

# LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ OTĚRUVZDORNÝCH PLECHŮ Z OCELI HARDOX 450

Robin Šoukal

Vedoucí práce: Ing. Petr Vondrouš

## **Abstrakt**

Účelem práce bylo zkoumat mechanické vlastnosti laserového svaru bez přídavného materiálu a s přídavným drátem, v závislosti na změnách svařovacích podmínek, před přípravy svarových ploch a metodou jejich dělení. Dalším cílem bylo porovnání výsledků s výsledky svařování prováděného metodou GMAW. Svařovaným materiálem byly ořezuvzdorné plechy Hardox 450, jako nejrozšířenější z tohoto typu materiálu. Používá se široce používané na korby vozidel, součásti zemní techniky atd.

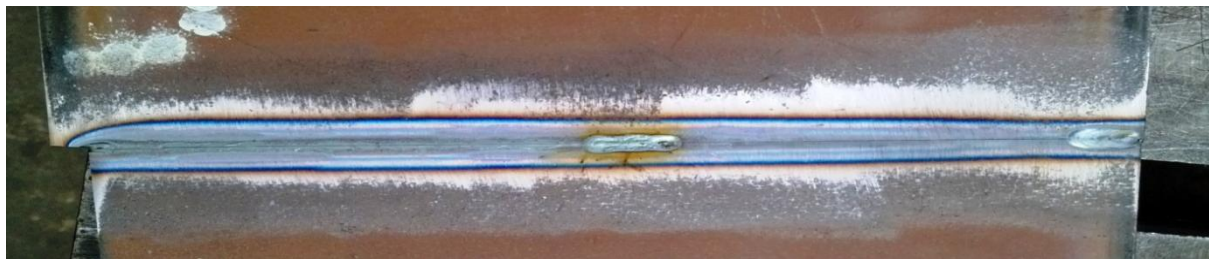
## **1. Plán experimentu**

Ořezuvzdorné ocelové plechy a další vysokopevnostní oceli jsou používány čím dál více v průmyslu stavebním, dopravním atd. Zvýšení pevnosti a tvrdosti je u těchto ocelí často dosaženo pomocí legování, tepelného zpracování či kombinace obojího. Při svařování těchto ocelí je třeba uvažovat, že tepelný příkon svařování výrazně ovlivňuje původní vlastnosti oceli. Z tohoto důvodu je potřeba technologii svařování důkladně odzkoušet, a pokud možné používat metody svařování s malým tepelným příkonem.

Cílem tohoto výzkumu je ověření možnosti laserového svařování ocelových ořezuvzdorných plechů bez přídavného a s přídavným materiálem, ověření pevnostních vlastností svarů a také porovnání výsledků s GMAW svařováním, které je stále nejrozšířenější technologií svařování. Na experimentu jsme spolupracovali s firmou MATEX PM, která disponuje potřebným technickým zázemím k provedení experimentu.

Experiment byl tedy prováděn na dvou pracovištích. V prostorech dílen FS ČVUT byly připraveny desky ke svařování, řez byl proveden oxy-acetylenovým plamenem se zřetelnou tepelně ovlivněnou oblastí. Rozměry desek resp. svarů byla cca. 15 cm. Příprava svarových ploch se lišila u jednotlivých vzorků a je popsána v kapitole „Svary“.

V areálu Matex PM se vzorky svařovali laserem. Vzorky byly prvně spojeny stehem a uloženy do přípravku - rychloupínače. Stehy eliminovaly deformaci vzorku během svařování z důvodu nedosednutí svařovaných ploch (viz. obr.1 ) a mezery mezi nimi byly po tepelné deformaci příliš velké. Stehy byly provedeny při výkonech do 1000 W.



**Obr. 1.** Zřetelná viditelnost stehů a tepelně ovlivněné oblasti u vzorku 1. ( po svařování)

Na svařencích byly zkoušeny požadované mechanické vlastnosti a výsledky byly porovnávány s mechanickými vlastnostmi svarů ořezuvzdorných plechů metodou GMAW. Provedené, či plánované zkoušky obsahují metalografické výbrusy, měření tvrdosti, měření ořezuvzdornosti, pevnostní charakteristiky atd.

## 2. Popis zařízení pro svařování

Proces svařování proběhl v prostorách společnosti Matex PM. Laserový paprsek byl generován přístrojem Laserline LDF 5000. Je to diodový laser se 6ti moduly, které se spojují do 1 pracovního vlákna. Na výstupu vlákna je „switch“, kterým je možno paprsek dělit do dvou optických vláken v případě potřeby.

*Tab.1. Vlastnosti laserového zdroje*

Laserline LDF 5000					
max. výkon	divergence paprsku	vlnová délka	max. příkon	rozměry	voltáž
5500 W	40 mm.rad	90 - 1030 nm	15 kW	1220 x 1100 x 1750 mm	360/480V, 3 fáze

Paprsek je tedy dopraven pomocí optického kabelu k 6ti stupňovému pohyblivému ramenu (od poučnosti KUKA). Na rameni byla připevněna laserova hlava. První užitá hlava bohužel nebyla vybavena podavačem drátu. Takže vzorky byly zhotoveny pomocí dvou různých hlav, druhá hlava byla vybavena samostatným vyhledáváním svaru, čehož jsme využili hlavně u vzorku č. 5. Obě byly od společnosti HighYag. Vzdálenost ohniska byla u obou 100 mm, taktéž jsme u všech vzorků použili stejnou polohu ohniska (přímo na povrchu svařence) tedy je možné přímé porovnání výsledků. Celý proces bylo možno vyhodnocovat pomocí pyrometru a řídit pomocí výkonu laseru.



*Obr. 2. Vybavení pracoviště*

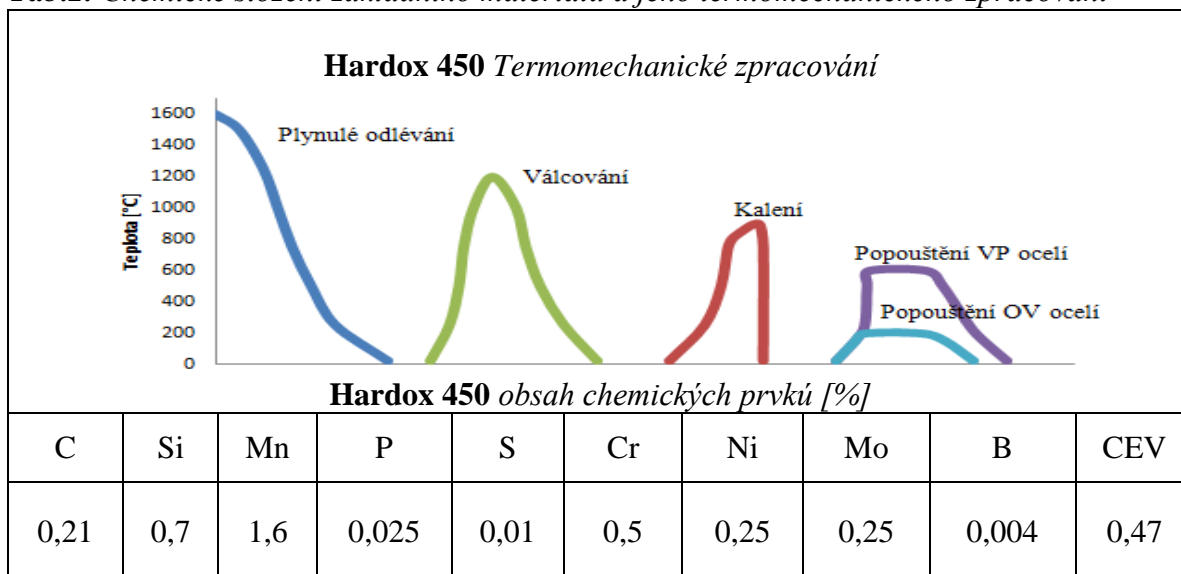
## 3. Svařovaný materiál

Základním materiálem je ořezavzdorný ocelový plech Hardox 450, což je typ ořezavzdorných plechů značky SSAB. Výrobce u této oceli garantuje dobrou svařitelnost díky malému množství legujícím prvkům (parametr CEV v tab.2.). Zařazením jde o nízkolegovanou jemnozrnnou ocel.

Hardox je možné svařovat s přidavným materiálem pro vysokopevnostní ocel, ale i běžnou konstrukční ocelí. V obou případech je nutno dbát na chemické složení. Což znamená, že speciální drát by měl mít podobné chemické složení jako hardox, aby byly zajištěny mechanické vlastnosti ve svaru. Naproti tomu drát z levnější nelegované oceli základní materiál spíše ředí, v důsledku by se měla zmenšit pevnost, vrubová houževnatost a ořezavzdornost, naproti tomu pokles pevnosti by neměl být velký a díky menšímu množství legujících prvků by nemělo docházet k mikrotrhlinám atd. Z předchozích poznatků o laserovém svařování víme, že svary dělané laserovým paprskem, jsou natolik kvalitní, že při namáhání vznikají poruchy primárně v základním materiálu. Proto jsme zde upřednostnili drát

cenově výhodnější a s minimem legūr, domnívaly jsme se, že výsledné mechanické vlastnosti svaru budou podobnější základnímu materiálu.

**Tab.2.** Chemické složení základního materiálu a jeho termomechanického zpracování



Hardox je možné svařovat s přídatným materiálem pro vysokopevnostní ocel, ale i běžnou konstrukční ocelí. V obou případech je nutno dbát na chemické složení. Což znamená, že speciální drát by měl mít podobné chemické složení jako hardox, aby byly zajištěny mechanické vlastnosti ve svaru. Naproti tomu drát z levnější nelegované oceli základní materiál spíše ředí, v důsledku by se měla zmenšit pevnost, vrubová houževnatost a ořezvzdornost, naproti tomu pokles pevnosti by neměl být velký a díky menšímu množství legujících prvků by nemělo docházet k mikrotrhlinám atd. Z předchozích poznatků o laserovém svařování víme, že svařování laserovým paprskem, jsou natolik kvalitní, že při namáhání vznikají poruchy primárně v základním materiálu. Proto jsme zde upřednostnili drát cenově výhodnější a s minimem legūr, domnívaly jsme se, že výsledné mechanické vlastnosti svaru budou podobnější základnímu materiálu.

**Tab.3.** Mechanické vlastnosti materiálu

<b>Hardox 450 mechanické vlastnosti</b>				
Mez kluzu Re [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost	Tvrdost HB	Rázová pevnost
		A [%]		
1200	1400	10	425 - 475	40J při -40°C

Ocel je náchylná ke vzniku trhlin za tepla i za studena, tyto trhliny ale hlavně souvisí s příkonem svařování, který je u laserového svařování menší než například u metody GMAW.

Základní požadavkem při tomto experimentu je dosáhnout stejných nebo podobných vlastností v celém průřezu materiálu. Pro oceli Hardox to znamená tvrdost a houževnatost v TOO. Výše uvedené hodnoty jsou platné k tloušťce svařovaných plechů (zde 8mm). Ochranná atmosféra byla tvořena směsí Argon 82% a C 18%.

Přídavný materiál byl drát o průměru 1 mm (kladkový podavač neumožňoval jiný). K dispozici jsme měli dva typy drátů.

1. Vysokopevnostní OK AristoRod 69l. Vhodný pro nízkolegované vysoko pevnostní oceli.
2. OK AristoRod 12.50 (G3sil, EN 14431A) pro svařování a na automatizovaném / robotizovaném pracovišti. Vhodný pro většinu svařovaných ocelí.

Výše uvedené hodnoty jsou platné k tloušťce svařovaných plechů, ta činila 8 mm. Ochranná atmosféra byla tvořena směsí Argon 82% a C 18%

**Tab.4.** Vlastnosti přídavného materiálu (stav ZT0)

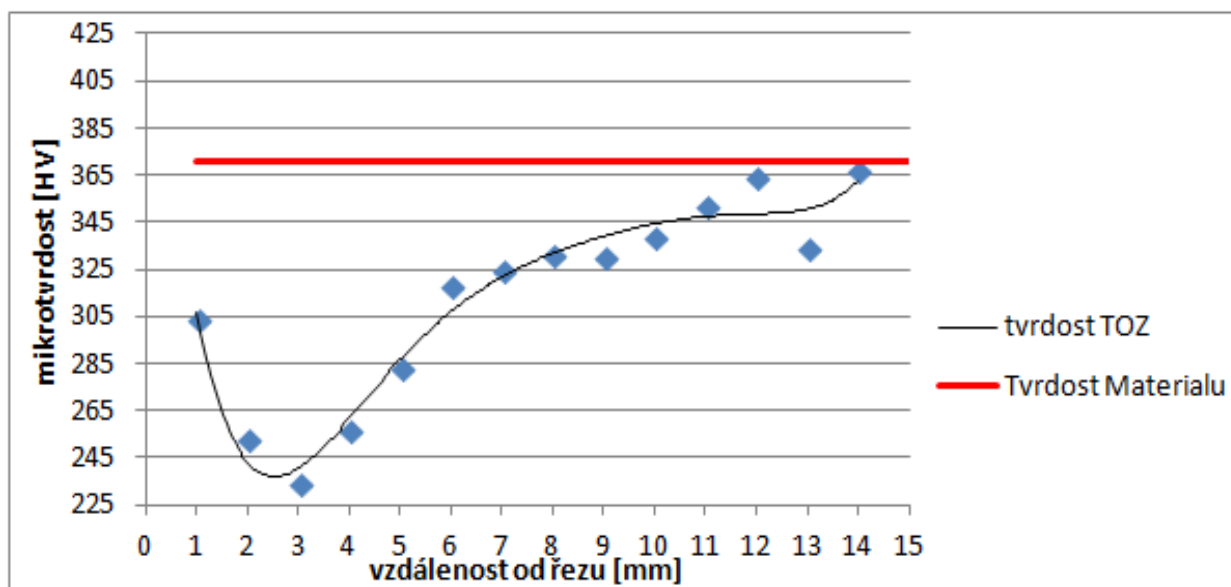
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Tažnost A	Mez pevnosti Rm
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[MPa]
OK AristoRod 69	0,08	0,60	1,60	0,30	1,40	0,25	19,00	800,00
OK Aristorod 12.50	0,09	0,90	1,50	-	-	-	22,00	480,00

#### 4. Svary

Svary byli prováděny v prostorech firmy MAPEX za pomoci jejich vybavení (zmněno v kapitole 2).

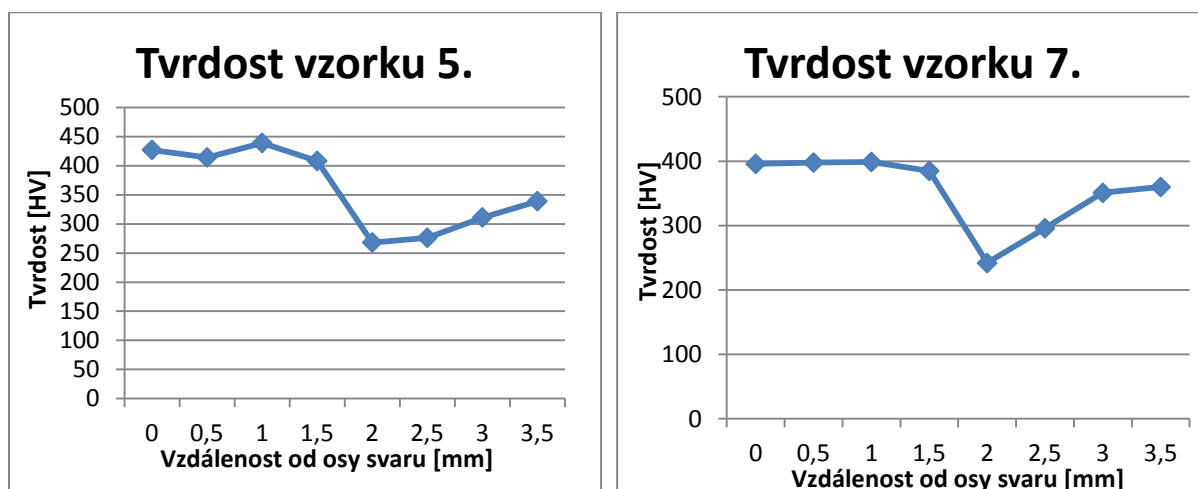
##### 4.1. Dělení desek

Desky byly děleny oxy-acetylenovým plamenem. Který svým tepelným příkonem vytváří značnou TOZ, tu můžeme sledovat na grafu.



**Obr.3.** Tvrdost tepelně ovlivněné zóny po řezání plamenem. Červená linka je tvrdost udávaná výrobcem.

Z tohoto grafu jasně plyne, tepelně ovlivněná zóna přesahuje 10mm. Jelikož jedna z hlavních předností laseru je minimální tepelně ovlivněná zóna, tak užitím oxy-acetylenového plamene k dělení materiálu o tuto výhodu naprosto přecházíme.



**Obr.4.a5.** Tvrdości vzorků

Snížená TOZ po dělení je patrná i z měření mikrotvrdości výsledných vzorků, nutno podotknout že cca 1 mm byl ubránó při broušení desek před svařováním, i tak je u obou zřetelný propad ve vzdálenosti 2 mm od osy svaru a dochází zde k minimu tvrdości (s ubraným 1 mm to odpovídá i obr.2.). Vzhledem k průměrné šířce svaru 5 mm můžeme říct, že minimální tvrdość je stále v oblasti svaru.

#### 4.2. Drsnost hran

Dalším velice důležitou součástí procesu laserového svařování je sesazení svarových ploch, tak aby byl docíleno co nejmenší mezery. K definici této mezry využíváme dle normy ČSN parametr Rz což je průměrný změřená výška profilu. Paprsek laseru pro svařování má obecně v průměru cca 1 mm a na kvalitu dopadajícího paprsku má vliv několik dalších faktorů například plazma nad svarem, která rozostřuje paprsek, dále kvalita paprsku definovaná jeho rozbíhavostí a v neposlední řadě jde také o typ laseru. Vzhledem k těmto důvodům je potřeba aby spára mezi deskami byla co nejužší. Kvůli charakteristickému povrchu vznikajícímu po dělení oxy-acetylenovým hořákem jsme museli vzorky zabrušovat na stolní brusce. Vyjímkou byl vzorek 3., který jsme tak nechali schválně kvůli pozorování rozdílů vůči ostatním svarům. V případě vzorku 6. a 7. Byla odstraněná vrstva vyšší, protože vzorky byli broušeny a následně hoblovány kvůli úkosům. V tab.6. můžeme vydfět výsledné drsnosti.

**Tab.5.** Drsnosti vzorků

		Rz	Ra	Rz max
Pálený stav	Horní část	7,37	1,57	9,2
	střed	12,87	2,33	16,1
	Spodní část	17,13	3,33	19,7
Po zabroušení		8,53	1,63	9,6

Drsnost Rz po řezání plamenem je příliš vysoká na to abychom mohli bez předpravy výsledné desky svařovat laserem. Toto poznání jasně plyne z metalografických výbrusů vzorku 3. (viz tab.5.). Pokud bšme tedy chtěli zařadit laser do výroby měli bšme se



zamyslet nad jiným způsobem dělení materiálu. Nejvhodnější zde bude dělení laserem, vzhledem k rychlosti a dosažené drsnosti.


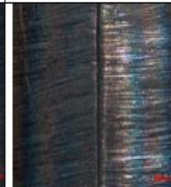
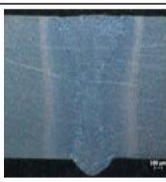
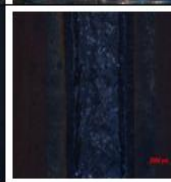


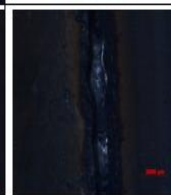

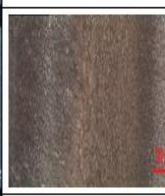
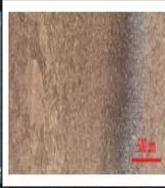
**Tab.6. Drsnost Ra dle metody dělení**

Metoda dělení Materialu	Ra
Vodním paprskem	< 3,2
Plazmou	cca 3,2
Laserem	cca 1,5

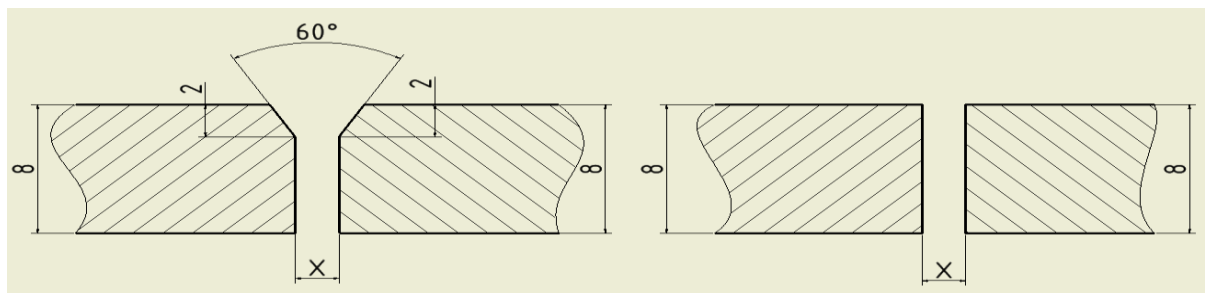
### 4.3. Vzorky

Experiment jsme sledovali na několika vzorcích. Vzorek 6. Je vynechám, jelikož byl svařován za stejných parametrů jako vzorek 7. V tabulce chybí některé snímky, které budou v brzké době doplněny.

**Tab.7. Tabulka vzorků**

Vzorek	Příprava svarových ploch	Rychlost [m/min]	Výkon [kW]	posuv drátu [m/min]	průtok plynu [l/min]	Vzdálenost ohniska [mm]	Průměr paprsku [mm]	Svár	Detail	Povrch svaru	Kořen svaru	
1.	Páleno a Broušení uhlovou bruskou	0,5	5,5	-	17,0	100	0,6					
2	Páleno a Broušení stolní bruskou	0,5	5,5	-	17,0	100	0,6					
3	Pouze páleno	0,5	5,5	-	17,0	100	0,6					
4	Páleno a Broušení stolní bruskou	0,4	5,5	-	17,0	100	0,6					
5	Páleno a Broušení stolní bruskou	0,5	2,5	5,5	-	17,0	100	0,6				
7	Páleno a hoblování	1,0	3,5	1,0	17,0	100	0,6					

Tloušťka svařenců je 8 mm s delkou svaru cca 15 cm. Zvar svaru je zachycen na obr.6.



**Obr. 6.** Skici svarů

### 5. Vyhodnocení vzorků

Vzorek 1 nebyl zcela provařen a bylo zjištěno, že na plný průvar je nutné zvýšit výkon až na 5,5 kW. Na obr.7 je vidět neprovařený kořen vzorku 1. Obr. 8 znázorňuje plně provařený kořen vzorku 2.



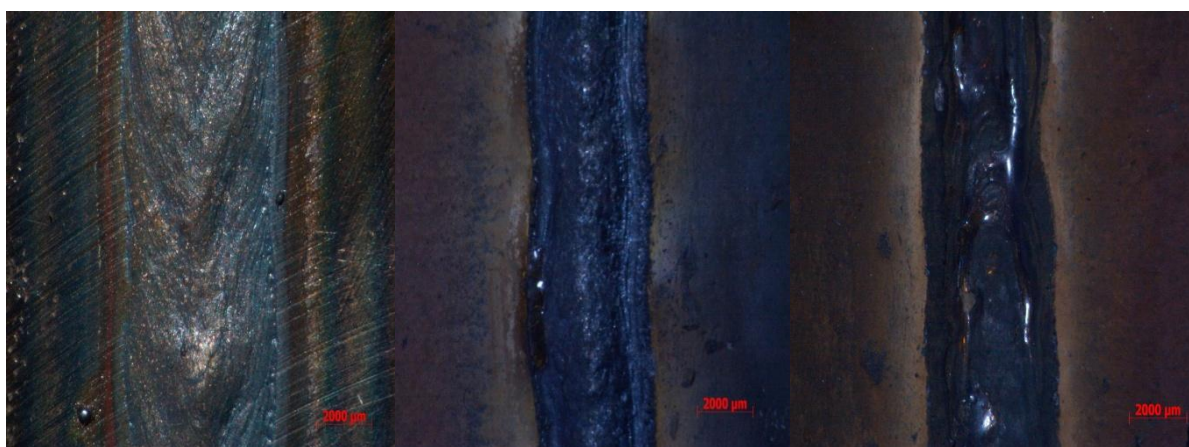
Vzorek 1.



Vzorek 2.

**Obr.6.a7.** Porovnání kořene vzorku 1 a 2, není plný průvar

Svarové plochy jsme se snažili přitisknout co nejbližší k sobě, nicméně u některých vzorků byla mezera vlivem nerovností povrchu. Vzorek 1 měl nejlépe sesazené plochy naproti tomu vzorek 3 nebyl vůbec broušen.



Vzorek 1.

Vzorek 2.

Vzorek 3.

**Obr.8-10.** Vrchní strany vzorku 1-3 viditelná změna svaru



U vzorků 5. a 7. Je možné pozorovat přechod z oblasti svaru do tepelně ovlivněné zóny. Důležitá je zde jemnost zrna po laserové svařování, poukazující na rychlé chladnutí vzorku.



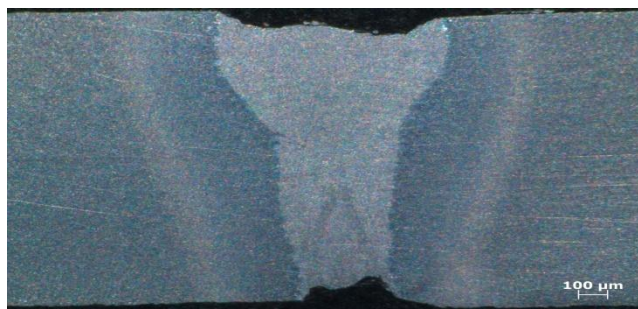
Vzorek 5.



Vzorek 7.

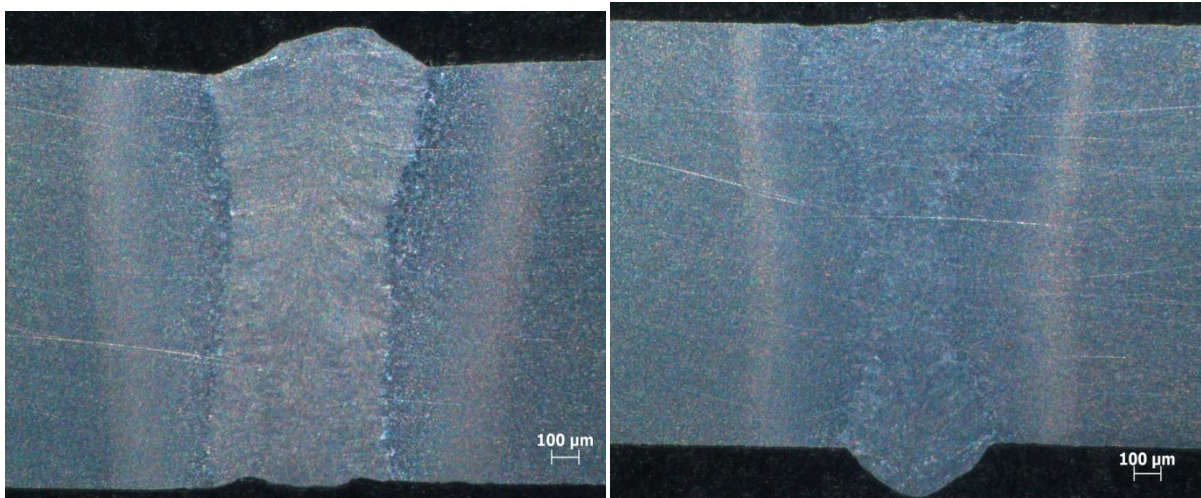
**Obr.8.-10. Metalografie vzorky 4-6**

Po provedení metalografických výbrusů u vzorku 3. Je zřejmé že pálenéhrany svařovat nejdou. Je zde nedostatek materialu v jehož důsledku dochází k propadu svaru, dále je zde vidět neprovařený kořen a taktéž vrub v kořeni.



**Obr.11. vzorek 3 makro**

Při porovnání makro snímků vzorku 2. a 4 uvidíme rozdílný tvar svaru. Oba vzorky byli svařovány naprosto stejnými parametry pouze u svařování vzorku 4. Byla snížena rychlost svařování z 0,5 na 0,4 m/min. Důsledkem této změny je viditelná změna tvaru svaru



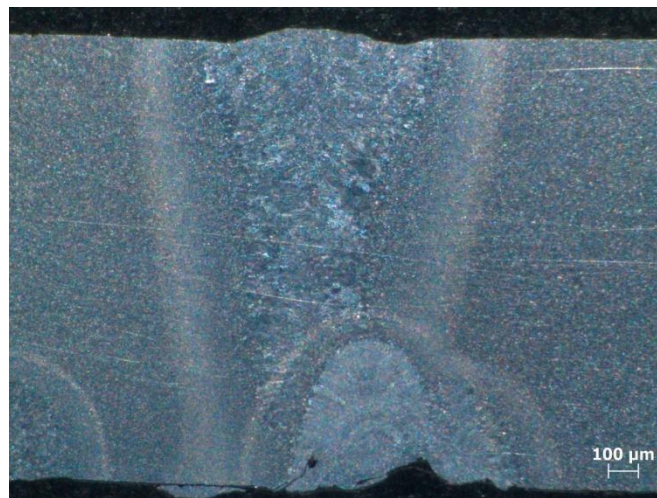
Vzorek 4

Vzorek 2

**Obr.12.a13. Vzorek 2 a 4, makro**

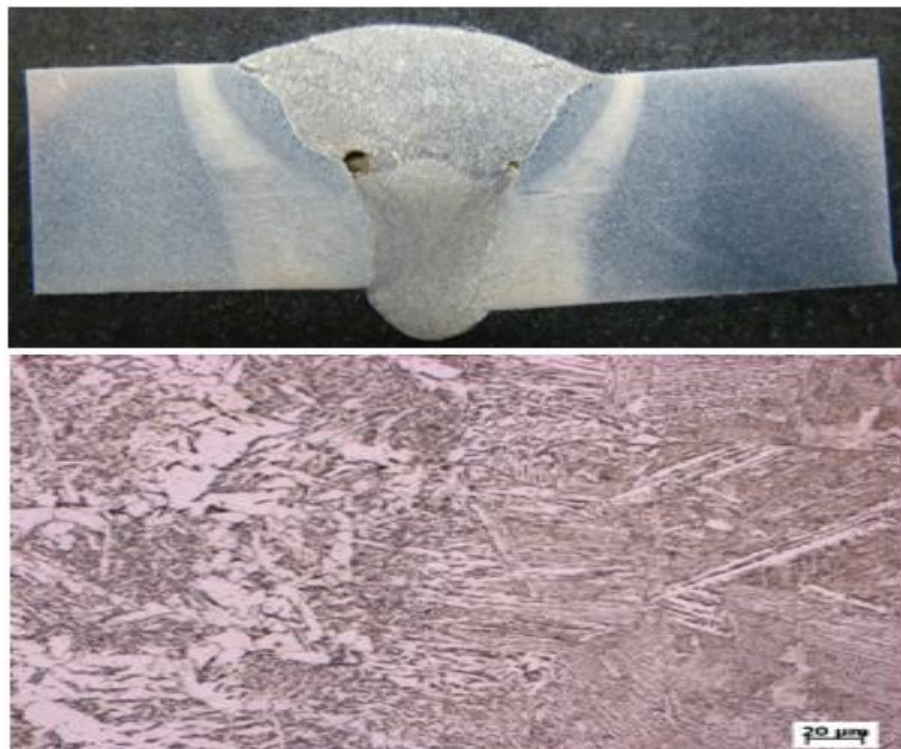


U vzorku 5 jsem se pokusil o oboustranné svařování. Pomoci zde měl systém vyhledávaná svaru hlavice HighYag. Svar ze spodní strany probíhal 5x rychleji než z horní, tomu odpovídá i poměr mezi oběma průvary (obr.14.)



*Obr.14. Vzorek 5, makro*

Pro porovnání je na obr 15. Metalografický výbrus se vzorku svařovaného metodou GMAW, zde bylo nutné svařovat na rozdíl od laseru s přídavným materiálem. Jako přídavný material byl u tohoto vzorku užito OK aristorod 12.50. Svar je znatelně širší než svar laserový a jsou zde patrné vady. Například pórovitost a mikrotrhlínky ve svaru. Největší devizou laserového svařování je rychlost. Oproti 0,5 m/min u laserového svařování, s metodou GMAW dosahujeme 0,12 m/min na každé z 2 stop. Na ob.16. můžeme vidět rozdíl ve strukturách jednotlivých vzorků, U laserového svařování je jemnější a tomu by měly odpovídat i mechanické vlastnosti.



*Obr.15a16.. Vzorek GMAW, makro a struktura ve svaru.*

Vzorky 6. a 7. Byly svařovány také s pomocí přídavného materiálu OK aristorod 12.50. o průměru 1 mm. Nicméně výbrus se nezdařil kvůli staženině ve svaru. Úkosy pro přídavný materiál ale nebyly provařené. Pokud by jsme chtěly dosáhnout „zaplnění“ úkosů bude nutné svařovat na alespoň 5 stop.

## **ZÁVĚR**

Po vyhodnocení se mi zdá, že pro aplikaci v průmyslové výrobě (například korby aut) je nejvhodnější užit jednostranně svařovaný I svár, kde dosáhneme plného průvaru při dostatečném výkonu a příprava hran není tolik náročná. Zároveň užit Laseru i k dělení svařovaných ploch.

V této práci nejsou uvedena zatím všechna data a výsledky, protože při zpracování došlo k neočekávaným zpožděním. Jelikož se ale jedná o bakalářskou práci, bude celá práce k dispozici na Fakultě strojní od června 2013.

## **Seznam použité literatury**

1. Laserline; LDF-fine beam quality, 2013
2. Využití laseru v průmyslu 2010/2011, Matex PM s.r.o, Plzeň 2011
3. Využití laseru v průmyslu 2012/2013, Matex PM s.r.o., Plzeň 2013
4. Svařování otěruvzdorných ocelových plechu pomocí metody gmaw; Bakalářská práce, Jan Mareš, Praha 2011