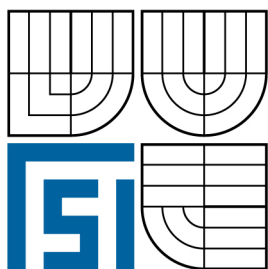


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VLASTNOSTI SVARŮ PŘI VYSOKOVÝKONNÝCH METODÁCH SVAŘOVÁNÍ

PROPERTIES OF WELD AT THE HIGH-POWERED WELDING METHODS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. VENDULA TRESOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. JAROSLAV KUBÍČEK

BRNO 2008



## ABSTRAKT

Vlastnosti svarů při vysokovýkonných metodách svařování. Popis MIG/MAG svařování, LaserHybrid, Time Twin Digital. Charakteristika vysokopevnostní oceli IMEX 700/DILLIMAX 690 a vysokopevnostních plechů HARDOX a WELDOX. Zhodnocení svarů metodou Time Twin Digital. Vyhodnocení tahové, ohybové zkoušky, zkoušky tvrdosti a struktury svarového povrchu.

### Klíčová slova

Svařování, MIG, MAG, Time Twin Digital, svarové spoje, vysokopevnostní materiály, IMEX 700/DILLIMAX 690, HARDOX, WELDOX

## ABSTRACT

Properties of weld at the high-powered welding methods. Description of MIG/MAG welding, LaserHybrid, Time Twin Digital. Steel Characteristic IMEX 700/DILLIMAX 690. Evaluation of weld with methods Time Twin Digital. Results of drawing, bending examinations, examination of hardness test and structure of weld surface.

### Key words

Welding, MIG, MAG, Time Twin Digital, weld wiring, high-strength materials, IMEX 700/DILLIMAX 690, HARDOX, WELDOX

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TRESOVÁ, Vendula. *Vlastnosti svarů při vysokovýkonných metodách svařování*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 76s., 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vlastnosti svarů při vysokovýkonných metodách svařování vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 20. 5. 2008

.....  
Bc. Vendula Tresová

## **Poděkování**

Děkuji tímto Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce a Ing. Michalu Felixovi za pomoc při experimentální části.

**OBSAH**

Abstrakt .....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah .....	6
ÚVOD .....	8
1 VÝZNAM TECHNOLOGIE MIG/MAG .....	9
1.1 MIG svařování .....	11
1.1.1 Princip metody .....	11
1.1.2 Ochranné plyny pro MIG svařování neželezných kovů.....	11
1.2 MAG svařování.....	12
1.2.1 Princip metody .....	12
1.2.2 Ochranné plyny pro MAG svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí 12	
1.3 Přenos kovu v oblouku.....	12
2 LITERÁRNÍ STUDIE ZAMĚŘENÁ NA TECHNOLOGII MIG/MAG A KOMBINACE S JINÝMI ZPŮSOBY SVAŘOVÁNÍ.....	15
2.1 Laserové svařování .....	15
2.2 CMT- Cold Metal Transfer .....	15
2.2.1 Využití CMT .....	19
2.3 MIG metody s kombinací s laser .....	19
2.3.1 Proces Laser-Hybrid .....	20
2.3.2 Geometrie svaru .....	22
2.3.3 Inovační technologie v automobilovém průmyslu .....	23
2.3.4 Parametry svařovacího procesu:.....	24
2.3.5 Svařovací hlava pro svařování postupem Laser-Hybrid .....	24
2.3.6 Přínos nové technologie.....	25
2.3.7 Využití metody .....	26
2.4 Time Twin Digital (svařování vysokovýkonným drátem) .....	28
2.4.1 Princip svařování.....	28
2.4.2 Provozní režimy .....	30
2.4.3 Oblasti použití a aplikace .....	33
3 SVAROVÉ SPOJE .....	37
3.1 Vznik svarového spoje .....	37
3.2 Názvy a druhy svarových spojů.....	37
3.3 Vady svarových spojů .....	38
3.4 Tepelné procesy při svařování.....	39
4 MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA .....	40
4.1 Svařitelnost ocelí.....	40
4.1.1 Svařitelnost termomechanicky zpracovaných ocelí.....	40
4.2 Otěruvzdorné plechy HARDOX a vysokopevné plechy WELDOX .....	41
4.2.1 Teplota výrobku během svařování .....	42
4.2.2 Dodatečné zpracování .....	42
4.2.3 Volba přídatného materiálu.....	43
4.2.4 Použití měkkých elektrod při svařování materiálu HARDOX .....	43
4.3 IMEX 700/DILLIMAX 690.....	44

4.3.1 Označování a obor platnosti.....	44
4.3.2 Chemické složení .....	44
4.3.3 Mechanické a technologické vlastnosti .....	45
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	46
5.1 Vyhodnocení svařování .....	47
5.1.1 První vzorek-koutový svar .....	47
5.1.2 Druhý vzorek-koutový svar .....	51
5.2 Vyhodnocení vlastností svarů .....	56
5.2.1 Tahová zkouška .....	56
5.2.2 Ohybová zkouška.....	59
5.2.3 Zkouška tvrdosti .....	61
5.2.4 Mikrostruktury svarového spoje .....	65
6 ZÁVĚR.....	72
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	73
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	75

## ÚVOD

Svařování patří v současné době ke stále se rozvíjejícímu odvětví průmyslu. S požadavkem zvyšování produktivity práce se v našem průmyslu se zvyšují i požadavky na automatizaci a robotizaci jednotlivých výrobních procesů. Rozvoj robotizace umožnil výrobu tvarově složitějších výrobků a současně dokázal využít výhod svařování metodou MIG/MAG.

V mé diplomové práci se budu zabývat vlastnostmi svarů při vysokovýkonných metodách svařování. Tímto navazuji na moji bakalářskou práci na téma Zhodnocení nových technologií MIG/MAG.

U vysokovýkonného svařování se očekává vedle maximálního odtavného výkonu při vyšší rychlosti svařování i nejlepší kvalitu výsledků svařování, jakož i flexibilní možnosti použití systémů. Mezi tyto technologie patří MIG/MAG, TIME a TIME TWIN Digital, LaserHybrid. U vysokovýkonných svařovacích procesů se kladou mimořádně vysoké nároky např. maximální míra pracovní flexibility celého zařízení, stabilně vedený pracovní proces, spolehlivost, dlouhá životnost aj.

Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně inertního plynu – MIG získává na důležitosti vlivem růstu objemu konstrukcí, staveb, lodí a dopravních prostředků vyráběných z hliníkových slitin. Hlavními důvody rozšíření metody MIG/MAG jsou široký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů, snadná možnost mechanizace a robotizace, velký sortiment vyráběných svařovacích zařízení a především významné výhody a charakteristiky uvedené metody svařování.

TIME TWIN Digital je svařovací postup založený na tandemovém principu. Systém spočívá v tom, že dva samostatně regulovatelné svařovací zdroje pracují se dvěma vzájemně izolovanými drátovými elektrodami v jedné plynové hubici a ve společné tavné lázni. Toto řešení zkracuje taktovací doby a zvyšuje kvalitu svaru a hospodárnost.

Svařování Laser-hybrid vzniklo kombinací technologií laserového svařování a metody odtavitelné elektrody v ochranném inertním plynu. Termín hybridní znamená, že do místa svařování působí současně laser i elektrický oblouk. Výhodou je rychlost svařování, minimální stupeň promísení, minimální tepelně ovlivněná oblast a minimální deformace svařované součásti.<sup>9</sup>

Vysokopevnostní oceli nacházejí uplatnění tam, kde je potřeba snížit hmotnost. Úspěšně se používají při stavbě velkých mostů, výškových budov nebo konstrukce pro těžbu ropy a plynu na moři. Použití vysokopevnostních ocelí ovšem nepřináší zvýšení tuhosti, odolnosti na vzpěr, nebo vyšší únavovou životnost. Nelze proto plně využít meze kluzu těchto ocelí, ale lze je částečně řešit konstrukčními úpravami.

## 1 VÝZNAM TECHNOLOGIE MIG/MAG

Technologie svařování Metal Inert Gas (MIG) and Metal Active Gas (MAG), ev. také označované GMAW, jsou nejrozšířenějšími metodami svařování v Evropě, USA a Japonsku.

Důvodem značného rozšíření uvedených technologií je jejich vysoká produktivita a snadná automatizace. Svařování metodou MIG/MAG je založeno na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního (MIG) nebo aktivního (MAG) plynu. Napájení drátu elektrickým proudem je zajištěno třecím kontaktem v ústí hořáku tak, aby elektricky zatížená délka drátu byla co nejkratší. Drát je podáván podávacími kladkami umístěnými v podavači, vlastním hořáku, nebo kombinací obou systémů z cívky o běžné hmotnosti 15kg. Proudová hustota je u svařování MAG nejvyšší ze všech obloukových metod a dosahuje až  $600 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$  a svařovací proudy se pohybují od 30A u svařování tenkých plechu drátem o průměru 0,6 až 0,8 mm, až do 800 A u vysokovýkonných mechanizovaných metod. Charakter přenosu kovu obloukem závisí na parametrech svařování a ochranném plynu, přičemž běžný je zkratový pro tenké plechy a sprchový pro větší tloušťky plechů. U vysokých proudů se mění charakter přenosu kovu obloukem a vlivem elektromagnetických sil se dosahuje rotujícího oblouku. Teplota kapek se při MIG svařování pohybuje v rozmezí 1700 až 2500 °C a teplota tavné lázně se v závislosti na technologii, parametrech svařování, chemickém složení a vlastnostech materiálu pohybuje mezi 1600 až 2100 °C.<sup>2</sup>

Díky vysokým proudům se svařovací rychlosti blíží hranici  $150 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$  a rychlost kapek přenášeným obloukem přesahuje  $130 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ochranný plyn se volí podle druhu svařovaného materiálu, ovlivňuje však také přenos kapek v oblouku, rozstřík, rozsah chemických a teplotní poměry v oblouku.<sup>2</sup>

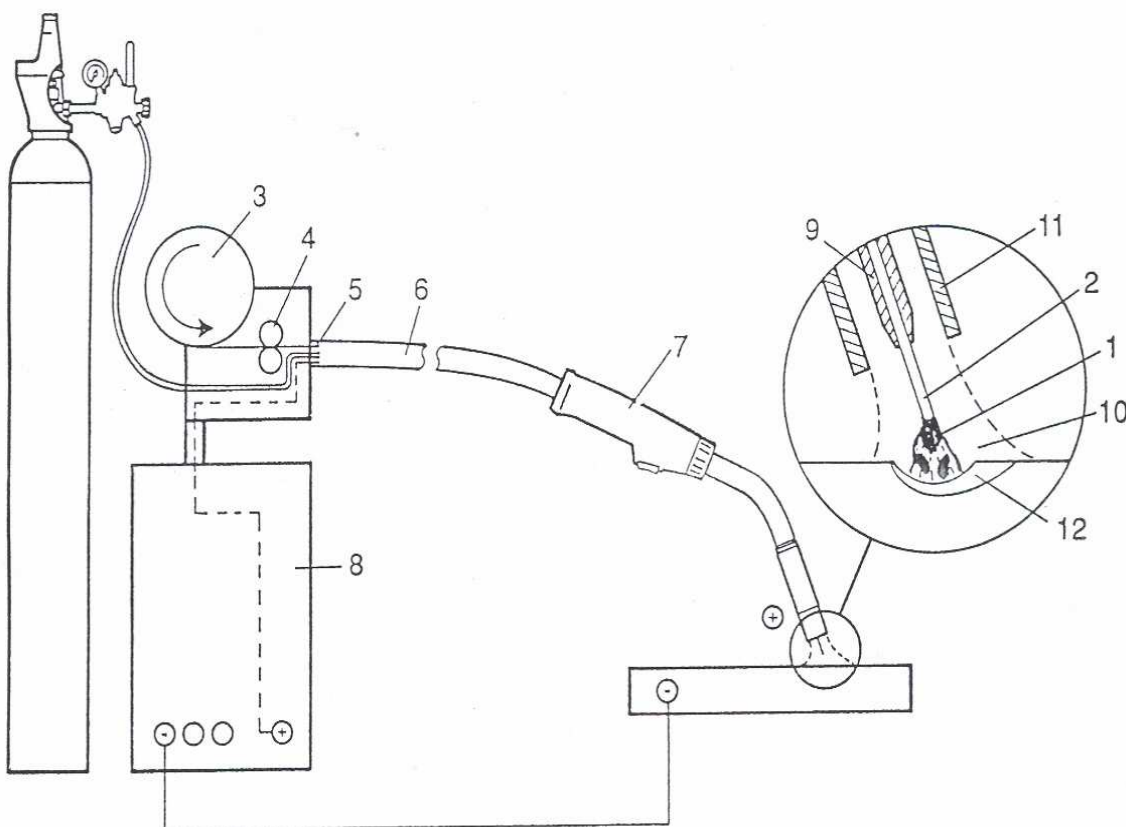
Využití nových technologií nabízí tyto výhody :

- nárůst produktivity svařování dosažený zvýšením rychlosti svařování a odtavovacího výkonu
- lepší kvalitu svaru jako výsledek potlačení, resp.odstranění strusky na povrchu svaru,
- zlepšení profilu závaru,
- minimalizace nebezpečí vzniku studených spojů,
- dosažení plynulého přechodu svar-základní materiál.
- velmi nízké investice s ohledem na dosahované výsledky<sup>4</sup>

### Zařízení pro svařování metodou MIG/MAG

V současnosti je vyráběný velmi široký sortiment zařízení pro svařování metodou MIG/MAG.

Svařovací zařízení mohou být monofunkční pouze pro MIG/MAG svařování, nebo multifunkční a zahrnovat i metody svařování WIG a ruční svařování obalenou elektrodou.<sup>2</sup>



Obr. 1.1 Základní schéma svařování metodou MIG/MAG

1 – elektrický oblouk, 2 – drátová elektroda, 3 – zásobník drátu, 4 – podávací kladky, 5 – rychloupínací spojka, 6 – hořákový kabel, 7 – svařovací hořák, 8 – zdroj svařovacího proudu, 9 – kontaktní svařovací průvlak, 10 – ochranný plyn, 11 – plynová tryska, 12 – svarová lázeň<sup>2</sup>

## 1.1 MIG svařování

### 1.1.1 Princip metody

MIG – Metal Inert Gas (GMAW). Při MIG svařování hoří elektrický oblouk mezi odtavující se drátovou elektrodou a základním materiálem. Drát je veden k základnímu materiálu jako přídavný materiál přes podávací zařízení a taví se v elektrickém oblouku. Ochranný plyn obtéká okolo drátové elektrody a chrání elektrický oblouk před vlivy okolního prostředí. Inertní ochranná atmosféra chemicky nereaguje se základním ani přídavným materiálem, ale podílí se na tvorbě prostředí v němž hoří elektrický oblouk, lze tedy úpravou jejího složení výrazně ovlivnit proces svařování. MIG svařování se vyznačuje vysokou bezpečností procesu, opakovatelností kvality a dobrým odtavovacím výkonem. Je využíváno u silně oxidujících materiálů, jako Al a jeho slitiny, vysokolegované oceli, aj.<sup>4</sup>

### 1.1.2 Ochranné plyny pro MIG svařování neželezných kovů

Při svařování metodou MIG se jako ochranné atmosféry používají inertní plyny argon, hélium a jejich směsi. Tyto ochranné plyny v průběhu procesu svařování nereagují se svařovaným materiálem, ale ovlivňují fyzikální procesy probíhající v elektrickém oblouku a tím celý proces svařování.<sup>4</sup>



Obr. 1.2 Svařování v ochranné atmosféře<sup>4</sup>

## 1.2 MAG svařování

### 1.2.1 Princip metody

MAG – Metal Active Gas (GMAW). Při MAG svařování hoří elektrický oblouk mezi odtavující se drátovou elektrodou a základním materiálem. Drát je veden k základnímu materiálu jako přídavný materiál přes podávací zařízení a taví se v elektrickém oblouku. Ochranný plyn obtéká okolo drátové elektrody a chrání elektrický oblouk před vlivy okolního prostředí. Jelikož se aktivní ochranná atmosféra přímo podílí na tvorbě prostředí v němž hoří elektrický oblouk, lze úpravou jejího složení výrazně ovlivnit proces svařování. MAG svařování se vyznačuje vysokou bezpečností procesu, opakovatelností kvality a dobrým odtavovacím výkonem. <sup>4</sup>

### 1.2.2 Ochranné plyny pro MAG svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí

Při MAG svařování těchto materiálů se používají směsi plynů na bázi argonu případně hélia s přídavkem oxidu uhličitého nebo kyslíku. Lze tvořit dvoj- nebo vícekomponentní směsi. Různé směsi plynů kromě ochrany svarové lázně před okolní atmosférou ovlivňují způsob přechodu přídavného materiálu do svarové lázně, stabilitu elektrického oblouku, charakter závaru, stupeň tekutosti svarové lázně, smáčení svarových ploch a také vznik kouře a dalších škodlivin. <sup>4</sup>

## 1.3 Přenos kovu v oblouku

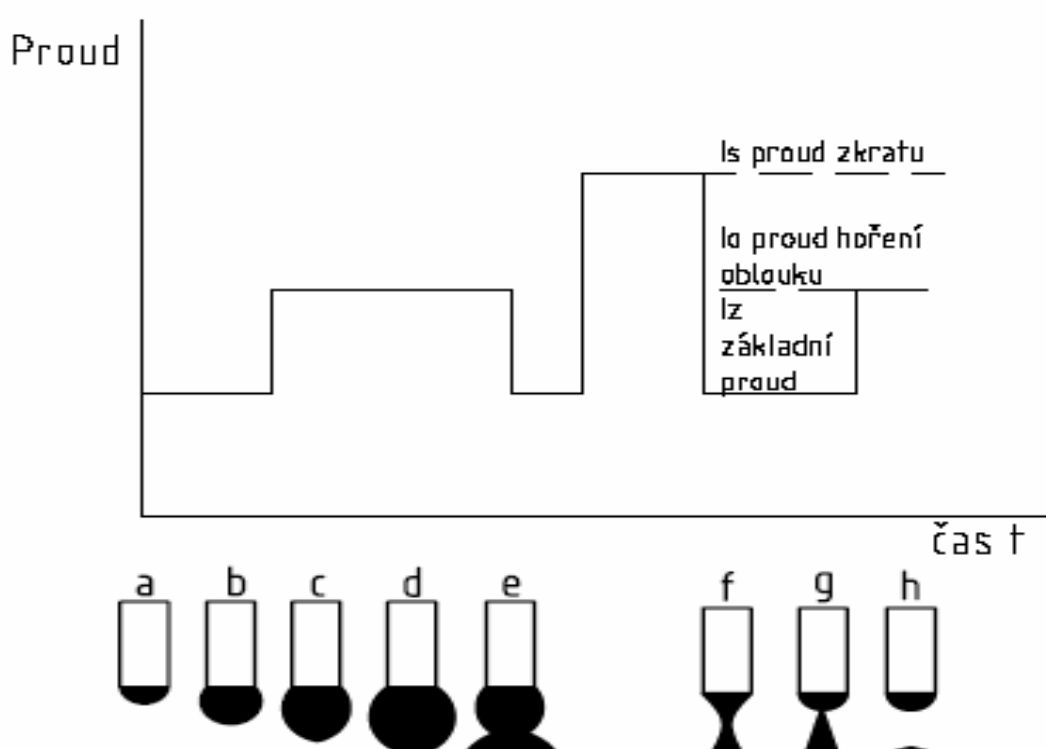
Přenos kovu v oblouku patří mezi základní charakteristiky metody svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou a závisí především na svařovacích parametrech tj. proudu a napětí. Významně však jeho charakter ovlivňuje složení ochranného plynu, druh přídavného materiálu a technika svařování

Přenos kovu v oblouku můžeme rozdělit na jednotlivé typy:

- krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu
- krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem
- přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty
- dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem
- impulsní bezzkratový oblouk
- moderovaný bezzkratový přenos
- dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu <sup>2</sup>

### 1.3.1 Řízené zkratové svařování

Klasický zkratový proces je statistický proměnný proces. Množství kovu elektrody přeneseného během každého zkratu se může měnit. Vliv na to má hlavně čas hoření oblouku, během kterého kapky narůstají. Například, když se přenese větší množství kovu, na co je potřebné prodloužení času hoření oblouku, proces potřebuje jistý čas, aby se vrátil do původní frekvence. Pokusy dosáhnout fixní frekvenci zkratů pulzujícím průběhem proudu a napětí byli neúspěšné kvůli náhodným výskytům netypických zkratů. Zlepšení řízení procesu je možné dosáhnout, když se proud řídí v závislosti od průběhu zkratu, jako to dokumentuje příklad na obr. 1. 4.<sup>4</sup>



Obr. 1.4 Schéma řízeného zkratového procesu průběhu proudu<sup>4</sup>

Velikost kapky se řídí objemem nataveného kovu ve fázi hoření oblouku (a, b, c, d) buď výškou proudu, anebo časem hoření oblouku. Fáze zkratu (e, f) se řídí výškou zkratového proudu a časem trvání zkratového proudu.

Při tomhle procesu se zjistí počátek zkratu z průběhu proudu a výkon se řídí elektronicky tak, aby se splnili výše uvedené požadavky. Protože možno dát do souvislosti rychlost podávání elektrody a frekvenci zkratu, řízení „jedním tlačítkem“ se může uplatnit stejně jako při impulsním přenosu. Tato varianta se nazývá „synergický zkrat“. Základní charakteristiky procesu zůstávají stejné jako při konvečním zkratovém procesu, ale stabilita hoření je lepší a rozstřík je menší.<sup>4</sup>

### 1.3.2 Dlouhý oblouk se sprchovým bezkratovým přenosem

Sprchový přenos je typický pro hodnoty svařovacího proudu do 200 do 500A a napětí 28 až 40V. tento typ přenosu se dá realizovat ve směsích plynů Ar s CO<sub>2</sub>, případně O<sub>2</sub>, nebo čistém Ar u svařování neželezných kovů. Vzhledem k vysokým hodnotám povrchového napětí v CO<sub>2</sub>, nelze tento přenos realizovat, poněvadž nelze získat dostatečně drobné kapky. Charakteristické pro sprchový přenos v Ar a směsích bohatých argonem (minimálně 80%) je, že díky snadné ionizaci plynu obklopuje plazma i konec tavící se elektrody a tím se urychluje ohřev drátu, který tvoří ostrý hrot. Tomu přispívá i předeřev drátu vlivem odporového tepla při dlouhém výletu. Účinkem magnetického pole jsou tvořící se drobné kapky ustříženy a jsou osově urychleny ve vysoké frekvenci směrem do tavné lázně. Při celé periodě oddělované kapky je proud vcelku konstantní. Oblouk nezhasíná a do základního materiálu se přenáší velké množství tepla. Proto je sprchový přenos charakteristický velkou hloubkou závaru, který roste lineárně s hodnotou proudu, klidným hořením oblouku a vysokým výkonem navaření. Akusticky se elektrický oblouk projevuje syčením, které občas přerušuje prasknutí. Povrch svarové housenky je hladký a čistý s plynulým přechodem do základního materiálu a bez rozstříku. Parametry sprchového přenosu v závislosti na průměru drátu jsou uvedeny v tab.1.1. Sprchový přenos je využitelný pro výplňové housenky svarů středních a velkých tloušťek. Velikost tavné lázně s větším objemem tekutého kovu však dovoluje svařování ve vodorovné poloze a omezeně v polohách.<sup>2</sup>

Tab. 1.1 Nastavení parametrů pro sprchový proces v závislosti na průměru drátu<sup>4</sup>

průměr drátu (mm)	rychlost posuvu drátu ( m.min <sup>-1</sup> )	svařovací proud ( A )	svařovac í napětí ( V )
0,8	11	180	26
1,0	10	220	28
1,2	8	280	30

## 2 LITERÁRNÍ STUDIE ZAMĚŘENÁ NA TECHNOLOGII MIG/MAG A KOMBINACE S JINÝMI ZPŮSOBY SVAŘOVÁNÍ

### 2.1 Laserové svařování

Název LASER vznikl ze začátečních písmen Light Amplification by Stimulated Emission od Radiation- zesílení světla stimulovanou emisí záření.

- pevnolátkové lasery- proces má charakter řetězové reakce a je dále zesilován průchody rezonátorem-aktivním prostředím laseru, které je uzavřeno dvěma zrcadly se vzdáleností rovnající se násobku vlnové délky emitovaného záření
- diodami čerpaný Nd:YAG laser- u těchto běžných laserů je čerpání zajištěno kryptonovými výbojkami s bílým světlem, ze kteréhož absorbováno jen zelené a modré spektrum, absorpční rozsah Nd:YAG laseru je 0, 790 až 0, 830  $\mu\text{m}$ , účinnost laseru je tedy nízká do 5%
- plynový CO<sub>2</sub> laser-má aktivní prostředí tvořeno směsí plynů: He+N<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub> uzavřený ve skleněné trubici, podle směru proudění plynu v aktivní zóně se rozdělují na typy s podélným a s příčným prouděním plynu, mohou pracovat v kontinuálním nebo pulsním režimu a jejich výkon se pohybuje od 0, 5 do 20 kW, účinnost dosahuje až 20%.<sup>2</sup>

Při svařování laserem vzniká kapilára vyplněná parami kovu pod vysokým tlakem. Páry kovů jsou vysokou teplotou ionizovány a tato laserem indukovaná plazma tryská vysokou rychlostí z místa svaru. Ochranný plyn současně chrání tavnou lázeň a tuhnoucí svarový kov před oxidací vzdušným kyslíkem. Lasery umožňují velmi rychlý ohřev a svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí. Lasery jsou adaptabilní s rychlou změnou technologie, provoz je čistý a tichý, zplodiny lze snadno a účinně odsávat, mají snadnou automatizaci procesu.<sup>4</sup>

### 2.2 CMT- Cold Metal Transfer

S využitím procesu CMT je možné metalurgicky spojit materiály, které potřebují nižší teploty, aby nedošlo k propálení a zamezilo se rozstříku. Pojem „studený“ se musí samozřejmě při svařování chápat relativně. Nicméně, ve srovnání s běžným postupem MIG/MAG, se CMT jeví jako studený proces. Jeho průběh se může charakterizovat pomocí angličtiny jako: hot, cold, hot, cold, hot, cold. Toto střídání teploty působící na tavnou lázeň bylo umožněno novým technologickým vývojem ve firmě

Fronius. Především zapojením pohybu drátu přímo do řízení pracovního procesu. Výsledkem je bezroštíkové robotizované svařování a pájení MIG/MAG nejslabších plechů od tloušťky

0,3mm.<sup>6</sup>



Obr. 2.1 Svařovací hlava<sup>6</sup>



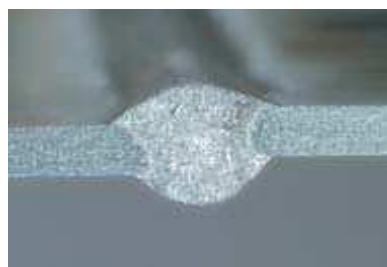
Obr. 2. 2 Uvolňování kapky při svařování <sup>4</sup>

První podstatný rozdíl oproti svařování krátkým obloukem je ten, že pohyb drátu je zde bezprostředně zapojen do řízení svařovacího procesu. Digitálně pracující řídicí obvod pozná zkrat a zpětným zatažením drátu podpoří uvolnění kapky. Vše prostřednictvím digitálního řízení. Drát koná pohyby vpřed a zpět, vpřed a zpět.

Druhým rozdílem je téměř bezproudový přechod materiálu. Drát se pohybuje dopředu a jakmile dojde ke zkratu, je ihned automaticky zatažen zpět. Samotný oblouk v důsledku toho vnáší v době, kdy hoří, teplo do materiálu pouze po krátkou dobu, což snižuje tepelné zatížení.

A právě z toho vyplývá třetí důležitý rozdíl. Drát provádí stále pohyby vpřed a zpět. Tento pohyb podporuje ve fázi zkratu uvolnění kapky. Výsledkem je bezostříkový přechod materiálu. Na podkladě těchto třech rozdílů jsou možné i takové aplikace, které byly dosud realizovatelné pouze s vynaložením značných nákladů.

Proces CMT je celosvětově naprosto jedinečný. Firmě Fronius se tím podařilo učinit velký vývojový krok, který bude svařovací techniku už natrvalo ovlivňovat. <sup>4</sup>

a)b)c)

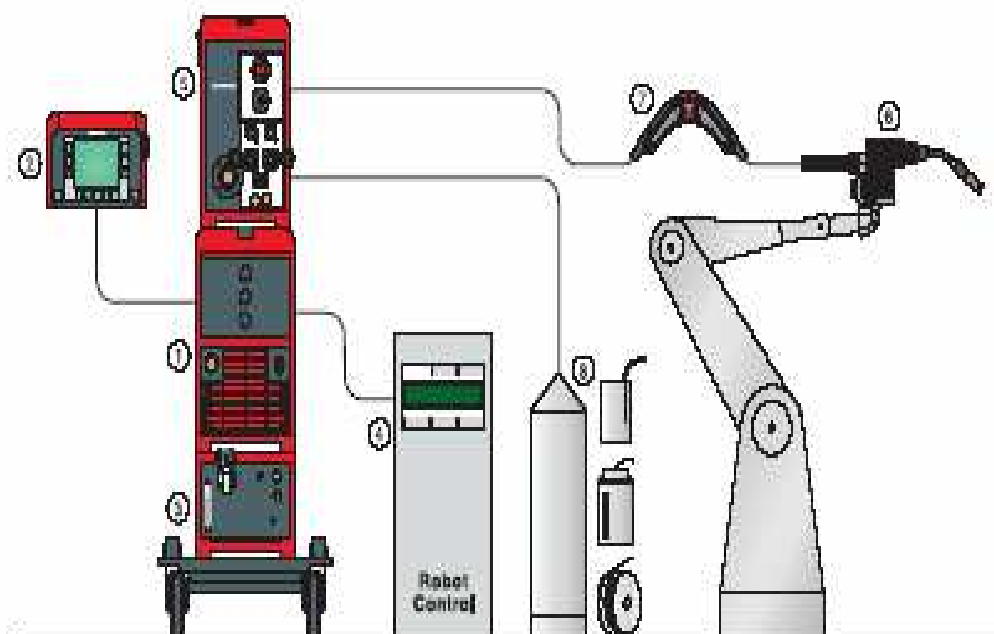
a) pájený spoj žárově a elektrolyticky zinkovaných plechů provedený technikou CMT, síla plechů 1mm, přídavný materiál CuSi3

b) koutový svar na plechu AlMg<sub>3</sub> o síle 1mm provedený svařovací rychlostí 2,0 m/min

c) tupý svar bez podložky na plechu AlMg<sub>3</sub> o síle 0,8 mm<sup>4</sup>

### 2. 2. 1 Konfigurace systému CMT

Proces CMT je absolutní novinkou. Z toho důvodu se u tohoto systému - ve srovnání s ostatními digitálními systémy - vyskytuje několik nových řešení. Všechny komponenty byly znovu prozkoumány, přizpůsobeny procesu CMT a jejich funkce byla vzájemně sladěna. V dalším textu přehled celého systému, přičemž existuje možnost různých variant v jeho provedení.<sup>6</sup>



Obr. 2.3 Zařízení pro svařování<sup>6</sup>

#### 1. Svařovací zdroj TPS 3200/4000/5000 CMT

Kompletně digitalizované, mikroprocesorem řízené a digitálně monitorované investory pro svařování MIG/MAG s vestavěným funkčním balíčkem pro proces CMT.

## 2. Dálkové ovládání RCU 5000i

Jednotka dálkového ovládání s textovým displejem, sledováním svářecích dat pomocí funkce Q-Master, jednoduchým vedením uživatele, systematickou strukturou nabídky, uživatelskou správou.

## 3. Chladicí modul FK 5000i

Robustní a spolehlivý. Zajišťuje optimální chlazení robotového svařovacího hořáku vybaveného vodním chlazením.

## 4. Rozhraní pro robot

Je vhodné pro všechny na trhu nabízené roboty, nezávisle na tom, zda jsou vybaveny řízením digitálním, analogovým, anebo směrnici Feldbus.

## 5. Podavač drátu VR 7000 CMT

Digitálně řízený podavač drátu pro všechny běžně používané způsoby balení drátu.

## 6. Robacta Drive CMT

Kompaktní robotový svařovací hořák s digitálně řízeným, bezpřevodovým, střídavým servomotorem disponujícím vysokou dynamikou. Zajišťuje exaktně pracující transport drátu a konstantní přítlak.

## 7. Pufrovací člen

Odděluje vzájemně oba ohony drátu a zastává funkci vyrovnávacího zásobníku drátu. Může být namontovaný přednostně na balanceru, anebo alternativně na třetí ose robota.

## 8. Zásobník drátu (cívka, sud, odvíječ)

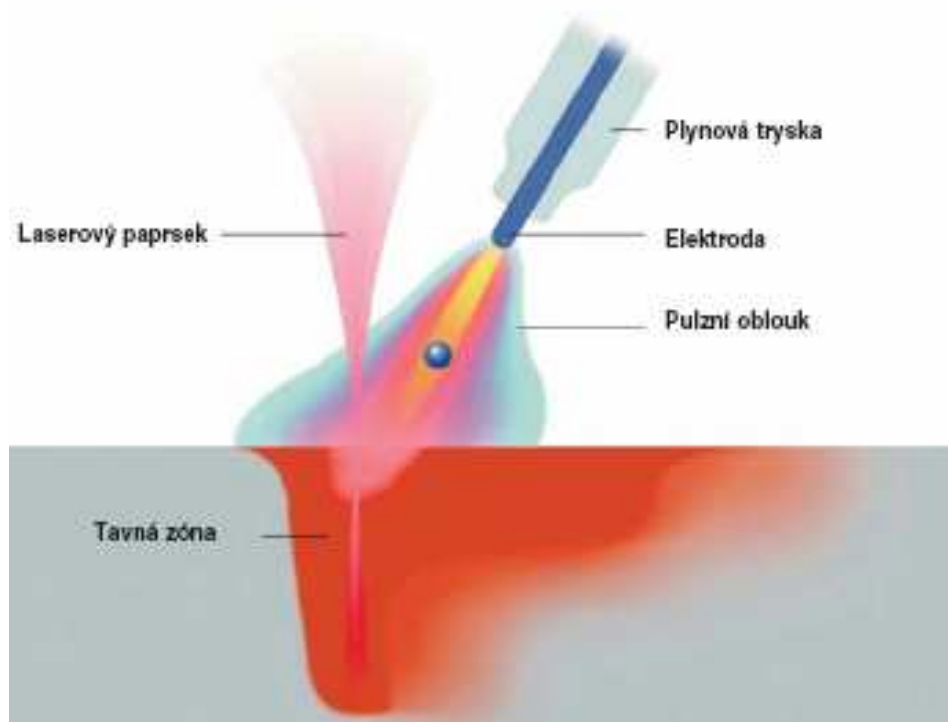
### **2.2.1 Využití CMT**

Jedná se především o všechny tenké až nejtenčí plechy od tloušťky 0,3 mm, MIG pájení pozinkovaných plechů a spojování ocele s hliníkem. Doposud bylo možné realizovat takovéto aplikace pouze pomocí nákladných opatření (např. podložka pod tavnou lázní), anebo se konstruktéři uchylovali k jiným.<sup>4</sup>

### **2.3 MIG metody s kombinací s laser**

V technice svarových spojů hraje významnou roli jednak vysoká svařovací rychlost a jednak také dobrá přemostitelnost spáry. Konvenčním laserovým svařovacím postupem však tyto dva požadavky nelze splnit, a proto se používá kombinovaného, tedy hybridního postupu, označovaného jako Laser-Hybrid. Ve svařovací technice se sice již delší dobu etablovalo svařování MIG i svařování laserové a obě metody mají ve spojovací technice svoje rozsáhlé oblasti použití. Současným využitím obou metod se získají nové možnosti a vytvoří se nové synergické efekty. Laserové záření vytváří velice úzkou tepelně ovlivněnou zónu s vysokým poměrem hloubky závaru k jeho šířce. Přemostitelnost spáry je při laserovém svařovacím procesu z důvodů malého průměru ohniska velmi malá, avšak lze docílit velmi značných svařovacích rychlostí. Svařovací proces MIG vykazuje podstatně menší hodnotu měrné energie, vytváří na povrchu

materiálu větší ohnisko a je charakterizován velmi dobrou přemostitelností svarové spáry.<sup>4</sup>

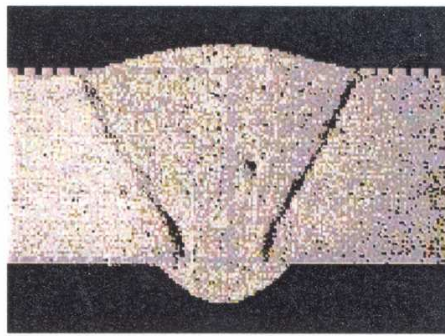
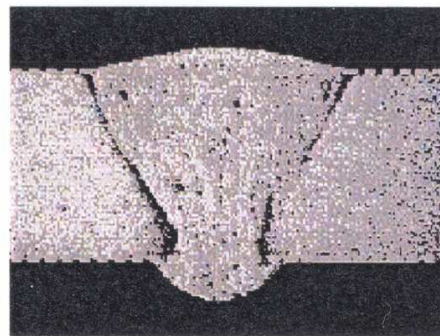
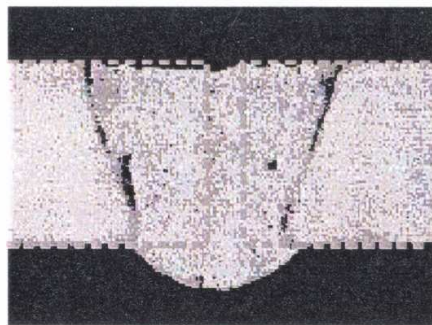
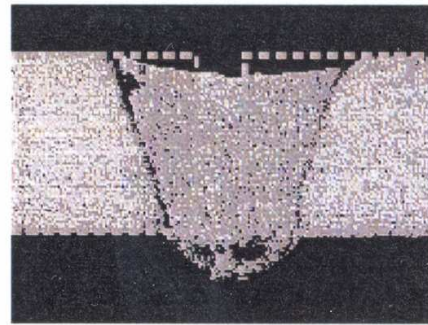


Obr. 2.4 Schematické znázornění svařovacího postupu Laser-Hybrid<sup>5</sup>

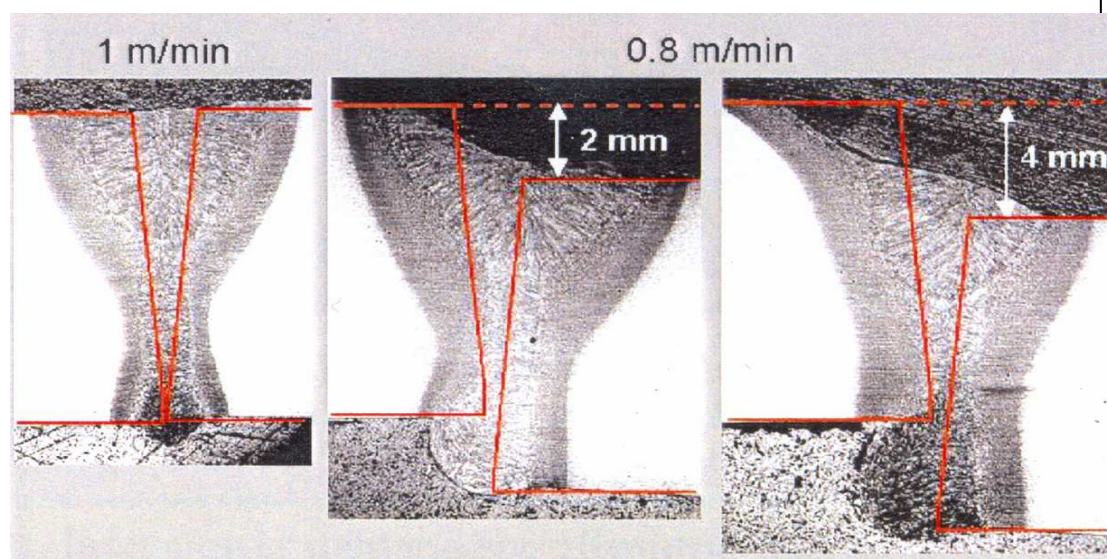
### 2.3.1 Proces Laser-Hybrid

Nová technologie laserového hybridního svařování byla vyvinuta s cílem optimálního využití výhod dvou různých způsobů. Jedná se o laserový paprsek a obloukové svařování MIG/MAG ve společné tavné lázni. Vysoká hustota tepelné energie natahuje základní materiál v úzkém rozsahu při dosažení hlubokých průvarů. Makrovýbrusy svarových spojů ukazují úzký průvar dosažený světelným zdrojem kombinovaný s přídatným drátem, mezi nímž a základním materiálem hoří elektrický oblouk. Tepelný příkon od laserového paprsku velmi výrazně zvyšuje odtavný výkon.<sup>4</sup>

Tento kombinovaný proces významně rozšiřuje potencionální oblasti použití a MSG Laser hybridní svařování tím může být nasazeno všude tam, kde se zatím používá MSG obloukové svařování (MSG = MIG + MAG svařování v ochranné atmosféře). Například pro svařování vysoko a nízkolegovaných ocelí, hliníku a jeho slitin. V závislosti na základním materiálu jsou použity pro ocel různé typy plných nebo trubičkových drátů, s ohledem na aktuální požadavky.<sup>4</sup>

 $b_s=0 \text{ mm}$  $v_d=8,3 \text{ m/min}$  $b_s=0,4 \text{ mm}$  $v_d=8,1 \text{ m/min}$  $b_s=0,8 \text{ mm}$  $v_d=7,8 \text{ m/min}$  $b_s=1,2 \text{ mm}$  $v_d=7,1 \text{ m/min}$ 

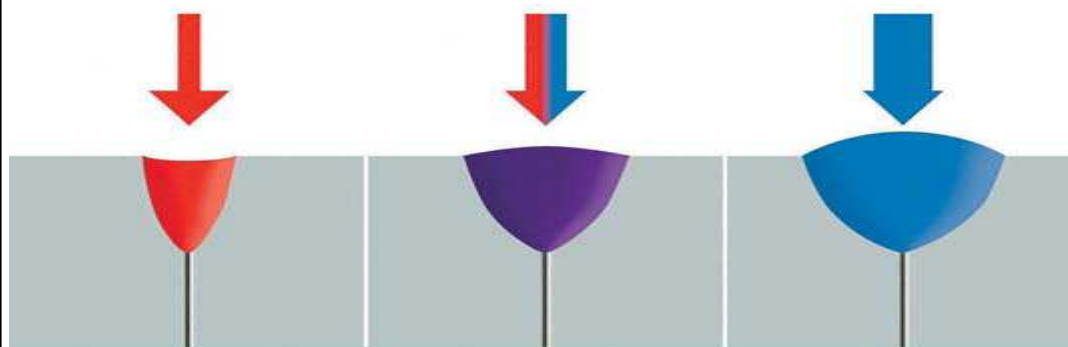
Obr. 2.5 Schopnost přemostění mezery během svařování Laser-Hybridem hliníkové slitiny o tloušťce 4mm. Tupý spoj v poloze PA, MIG impulsní oblouk, přídatný drát AlSi12,  $\varnothing 1,2 \text{ mm}$ , rychlost drátu  $v_d$ , ochranný plyn Argon, šířka mezery  $b_s$ , rychlost svařování  $2,5 \text{ m/min}$ <sup>4</sup>



Obr. 2.6 Svařování ocelových potrubí o tloušťce 10 mm, CO<sub>2</sub> laser výkon 10, 5 kW, přídatný drát G3Si1 o Ø1, 2 mm, rychlost svařování 5, 2 m/min, přídatný plyn: směs argonu s heliem <sup>4</sup>

### 2.3.2 Geometrie svaru

Porovnáme-li chování při závaru u procesů Laser, MIG a Laser-Hybrid, ukazuje se, že laserový svar je vydutý a MIG svar vykazuje při stejné hloubce závaru a stejné svařovací rychlosti velké převýšení i velkou šířku. Pro docílení stejné hloubky závaru u procesu Laser-Hybrid vystačí pouze poloviční rychlost drátu, tedy 5,5 m/min namísto 11 m/min. Při prohlídce svaru Laser-Hybrid zjistíme, že při stejné hloubce závaru se docílí jen mírného převýšení. <sup>5</sup>



Laser

PL:2000W

Laser-Hybrid

PL: 1500 W  
vD: 5,5 m/min

MIG

vD: 11 m/min

Obr. 2.7 Porovnání geometrie svaru při stejné hloubce závaru a stejné rychlosti <sup>5</sup>

Historie nového svařovacího postupu Laser-Hybrid je poměrně krátká.

V roce 2001 byl tento nový svařovací postup úspěšně prezentován na oborovém veletrhu v Essenu. Laser-Hybrid tak dospěl do stadia praktického využití. Neustále rostoucím nárokům zákazníků automobilového průmyslu, které se týkají zejména zvyšování užité hodnoty i výkonu automobilů, lze vyjít vstříc pouze pokračujícím zaváděním progresivních výrobních postupů. To platí zejména pro oblast svařovací techniky, kde se hledají stále dokonalejší a výkonnější svařovací procesy.<sup>5</sup>

### **2.3.3 Inovační technologie v automobilovém průmyslu**

V rámci vývoje vysokovýkonných svařovacích postupů byl v centru pro výzkum hliníku integrován do výrobní koncepce nového projektu vozu Audi A8 hybridní svařovací proces, certifikovaný již pro sériovou výrobu. Kombinací těchto dvou konvenčních spojovacích technik lze při výrobě docílit různých synergických efektů, které posouvají technologické hranice dnes používaných termických spojovacích postupů směrem k vyšší kvalitě, produktivitě a hospodárnosti. V porovnání s technologií laserového svařování s přídavným materiálem se zde zvyšuje provozní spolehlivost a schopnost překlenovat spáry, což se projevuje zvýšením kvality svarů. Přídavný materiál se do taveniny přivádí zcela jednoduchým způsobem prostřednictvím odtavující se drátové elektrody. V porovnání s konvenčním MIG-svařováním se výrazně zvyšuje svařovací rychlost a hloubka závaru při současné stabilizaci oblouku. V uvedeném případě se používá hybridní svařování pro napojování různých plechových dílů na lisovaný profil. Celkem bylo na jednom vozidle provedeno 65 svarů s celkovou délkou spáry cca pět metrů, přičemž délka jednotlivých svarů se pohybovala v rozmezí 30 až 260 mm. Při párování materiálů o velké tloušťce – 2 až 4 mm, které je zde nutností, bylo – v porovnání s prostým laserovým svařováním – možno zvýšením svařovací rychlosti snížit energetické zatížení této součásti, což se projevilo na minimum sníženou tepelnou deformací celé konstrukční podskupiny. Enormní citlivost dlouhých profilů na měrnou energii ve vztahu k rozměrové stálosti, vyžaduje minimalizovat energetické zatížení při spojovacích operacích, a to v našem případě přímo vyžaduje využití hybridního procesu Laser-MIG. Kromě toho byla – oproti konvenčnímu svařování laserovým paprskem – zvýšena spolehlivost pracovního procesu i kvalita svarového spoje, a to zejména jeho povrchu; projevila se rovněž zlepšená přemostitelnost spár mezi spojovanými díly.<sup>5</sup>

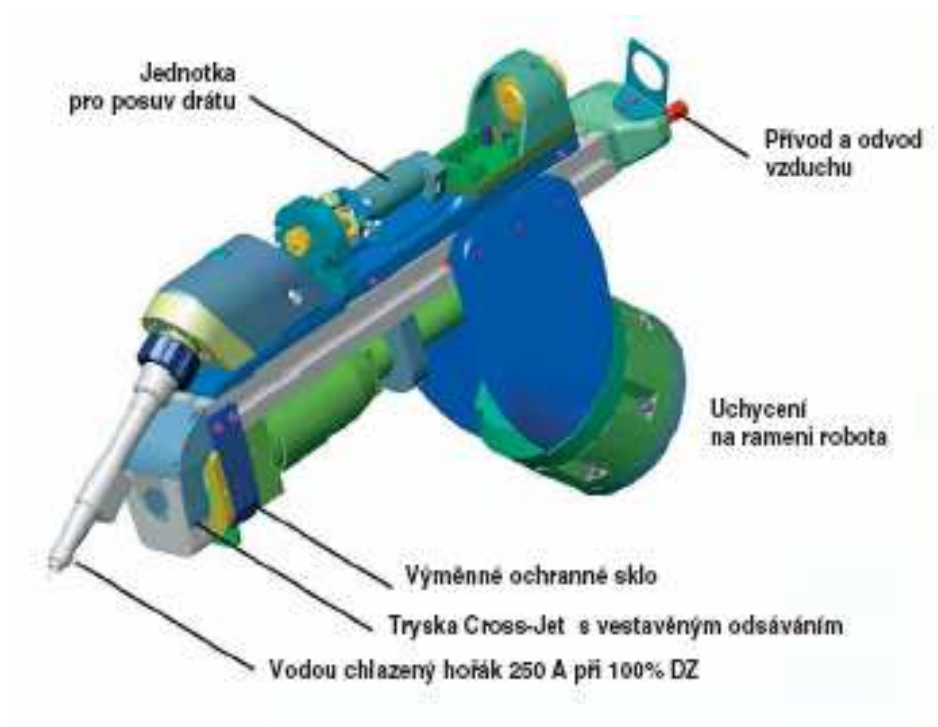
#### **2.3.4 Parametry svařovacího procesu:**

- výkon laseru  $P_L = 3,8 \text{ kW}$
- svařovací rychlost  $V_S = 3,6 \text{ m/min}$
- rychlost drátu  $V_D = 4,5 \text{ m/min}$

Firma Fronius vyrobila, v rámci vývojové spolupráce se společností Audi AG, celou část příslušného výrobního zařízení, od svařovacího zdroje až po elektrický oblouk a zajistila zároveň integraci optických komponentů do této soupravy. Zdroj laserového záření, robot a k tomu příslušující komponenty obstarala společnost Audi AG.<sup>5</sup>

#### **2.3.5 Svařovací hlava pro svařování postupem Laser-Hybrid**

Specifickým požadavkem u svařovací hlavy je snaha po docílení co nejmenších rozměrů, aby se zajistila co nejlepší přístupnost ke svařovaným dílům, což platí zejména pro výrobu karosérií. Proto je svařovací hlava navržena tak, že se může potočit o  $180^\circ$ , takže může nabýt zrcadlově symetrického tvaru a mimoto umožňuje značně velký vertikální posuv vůči svému uchycení na rameni robota, čímž je dosaženo zlepšené přístupnosti u třírozměrných součástí. Tryska Cross-Jet byla navržena tak, aby na jejím výstupu docházelo ke zvýšení rychlosti, takže lze dosáhnout nadzvukového proudění, v důsledku čehož se mohou rozstříky lépe odklánět. Aby proud vzduchu vystupující z trysky nezasahoval do oblasti určené ke svařování, odsává se do výfukového kanálu. Zároveň se pracovní prostor neznečišťuje svařovacím kouřem ani rozstříkem, takže práce probíhá stále v čistém prostředí. Svařovací hořák je vybavený dvouokruhovým chladicím systémem a je dimenzovaný na proud  $250 \text{ A}$  při stoprocentním dovoleném zatížení (DZ) a  $4 \text{ kW}$  výkonu laserového zdroje.<sup>5</sup>



Obr. 2.8 Svařovací hlava Laser-Hybrid jako součást pracovní soupravy<sup>5</sup>

### 2.3.6 Přínos nové technologie

Tato laser-hybridní technologie přinesla synergické efekty, které lze využít v široké oblasti spojovací techniky, zejména tam, kde by se tolerance spojovaných dílů, požadované pro svařování laserovým paprskem, nedaly realizovat, případně by vyžadovaly velké finanční náklady. Značné rozšíření aplikačních možností a výkonnosti kombinovaného postupu se v důsledku snížení investičních nákladů, výrobních časů i výrobních nákladů a rovněž zvýšení produktivity práce, projeví ve zvýšené konkurenceschopnosti.

Zavedením zúžené geometrie spár u přímo i nepřímo pohledových spojů se otevírají i nové možnosti pro designéry.<sup>5</sup>



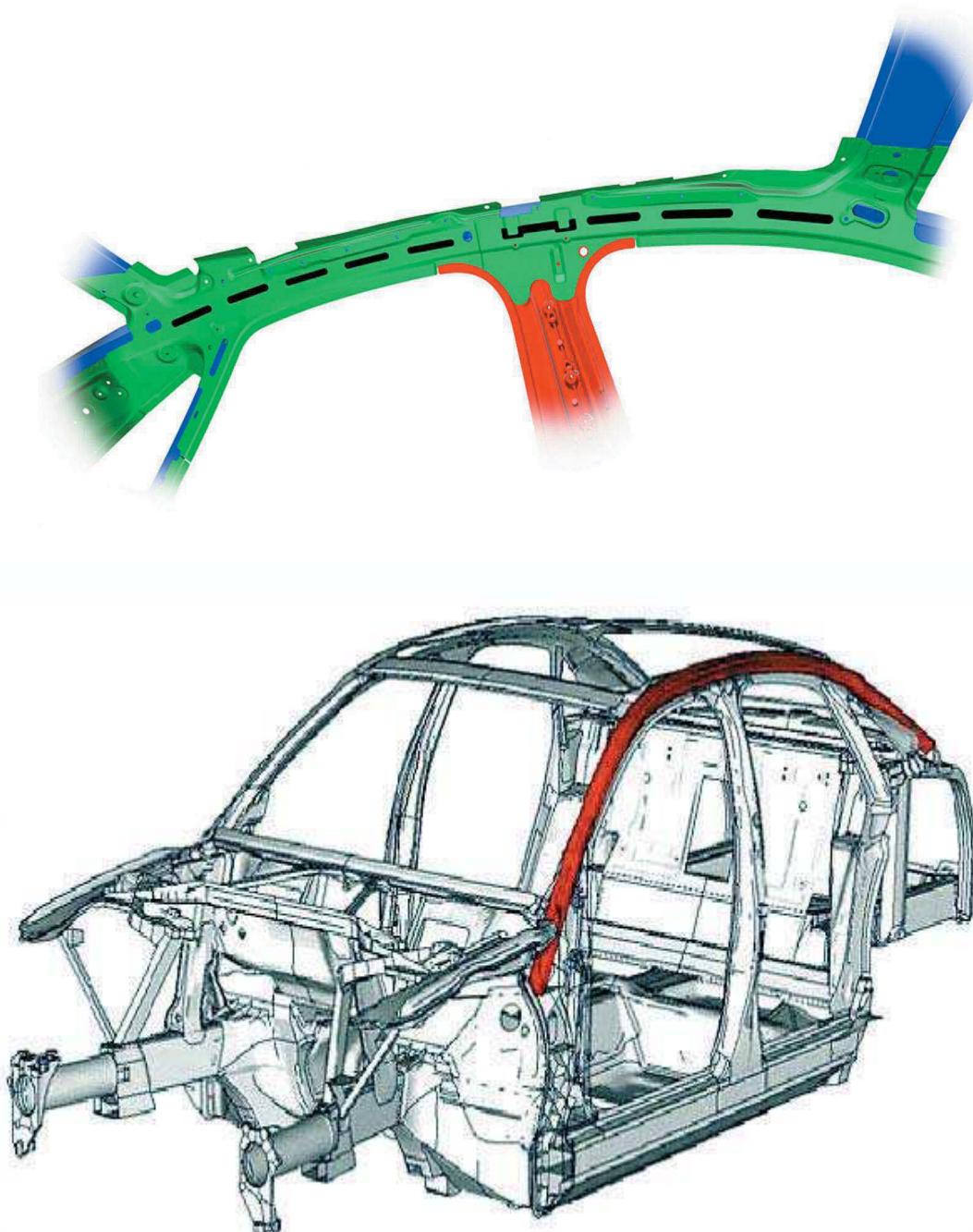


Obr. 2.9 Pohled na svar provedený hybridním procesem Laser-MIG a jeho příčný makrovýbrus<sup>5</sup>

Zavedení stabilního procesu se v počátcích podařilo dosáhnout na bázi disponibilních vyšších výstupních výkonů laseru v pevné fázi. V minulých letech se podmínkami pracovního procesu hybridního svařování laser-oblouk zabývala celá řada výzkumných projektů. Pod pojmem hybridního svařování se zde rozumí kombinaci svařování laserem a obloukem v jedné pracovní zóně (plasma a tavenina). Volbou vhodných pracovních parametrů lze cíleně ovlivňovat vlastnosti svaru, jako je jeho geometrie a složení svarového kovu. Obloukový svařovací proces zvyšuje prostřednictvím přísunu přidavného materiálu přemostitelnost svarových spár, určuje šířku svaru a tím snižuje nároky na přípravu svaru. Dosahuje výrazného zvýšení účinnosti výsledného pracovního procesu.<sup>5</sup>

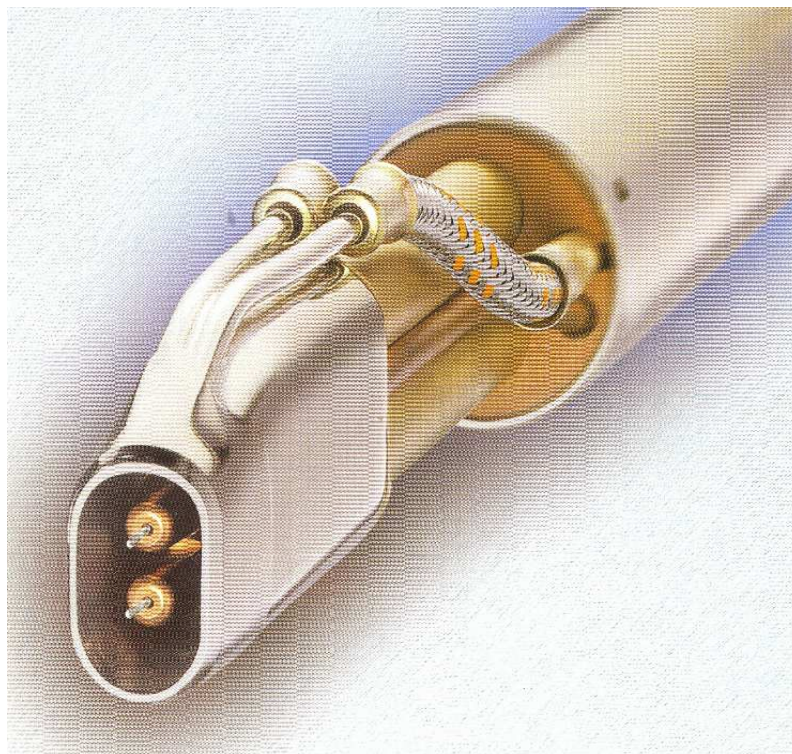
### **2.3.7 Využití metody**

Vysoké pořizovací náklady zpočátku předurčovaly místa uplatnění tohoto nového svařovacího postupu: byly to především velké koncerny vyrábějící automobily. Jak ale ukazují poslední zkušenosti Německa, zájem o jeho využití začínají projevovat i menší a středně velké podniky se zaměřením na zpracování plechů. Význam pro ně mají nejen synergické efekty a hospodárnost provozu nové technologie, ale také možnost jejího „střížení na míru“ v závislosti na podmínkách aplikace a vlastnostech svařovaných materiálů. Laser-Hybrid je maximálně flexibilní; je to kombinace laseru a oblouku, od svařování čistým laserem až po svařování čistým obloukem.<sup>5</sup>



Obr. 2.10 Svarová skupina střešního rámu na boční straně vozu Audi A8 <sup>5</sup>

## 2.4 Time Twin Digital (svařování vysokovýkonným drátem)



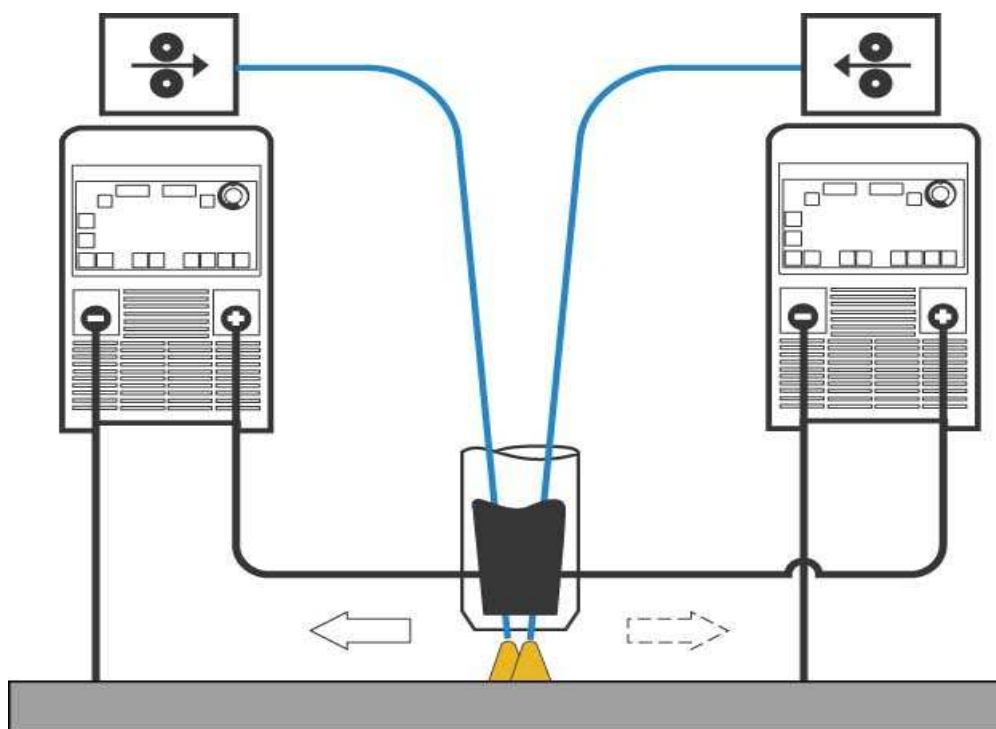
Obr. 2.11 Svařovací hlava <sup>4</sup>

### 2.4.1 Princip svařování

Time Twin Digital je svařovací postup v ochranné atmosféře na tandemovém principu. Dva samostatně řízené svařovací zdroje TPS 4000 nebo 5000 se dvěma vzájemně izolovanými drátovými elektrodami pracují společně v jedné plynové hubici a ve společné tavné lázni. Pracovní proces je kompletně digitalizován. Synchronizační zařízení koordinuje činnost obou drátových elektrod. Zapalování probíhá díky využití SFI (Spatter Free Ignitron = bezroštíkové zapalování) hladce a bez rozstříku. <sup>4</sup>

U tohoto systému je zvláště potřeba vyzvednout možnost záměny funkce vedoucí (=Leasing) a sledující (=Trailing) drátové elektrody. V důsledku toho odpadá změna orientace hořáku na koncích svaru při vícevrstvě svařování. Existují rovněž případy, kdy stačí svařovat pouze jedním drátem, např. kruhové svary. V takové situaci se dá druhé zařízení jednoduše vypnout. <sup>4</sup>

System spočívá v tom, že dva samostatně regulovatelné svařovací zdroje pracují se dvěma vzájemně izolovanými drátovými elektrodami v jedné plynové hubici a ve společné tavné lázni. Toto řešení zkracuje taktovací doby a zvyšuje rovněž kvalitu svaru i hospodárnost. <sup>4</sup>

Obr. 2.12 Princip dvoudrátového procesu <sup>11</sup>

### Výhody metody

- kratší taktovací časy a zlepšená kvalita svaru zvyšující hospodárnost
- důsledkem digitalizace je mimořádně stabilní oblouk, perfektně řízené odkapávání a nízké tepelné zatížení
- zlepšená přístupnost umožněná záměnou role vedoucí a sledující elektrody, při vícevrstevném svařování odpadá přeorientování hořáku na konci svaru
- minimální rozstřík, vysoká svařovací rychlost, nízké tepelné zatížení
- obě elektrody jsou plně pod kontrolou
- využití v automobilovém a dodavatelském průmyslu, při stavbě kolejových vozidel, potrubních vedení, lodí, speciálních vozidel či stavebních strojů <sup>4</sup>

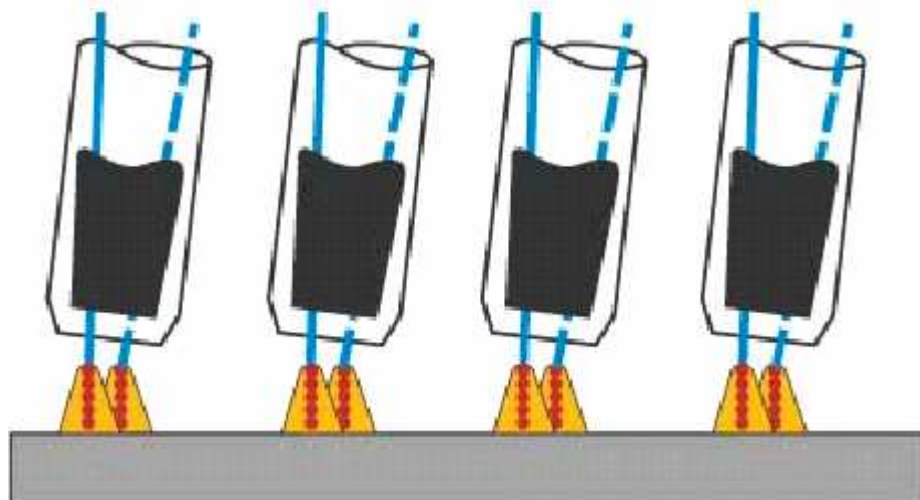


Obr. 2.12 Dvě vzájemně izolované drátové elektrody pracují v jedné plynové hubici a jedné společné tavné lázni<sup>7</sup>

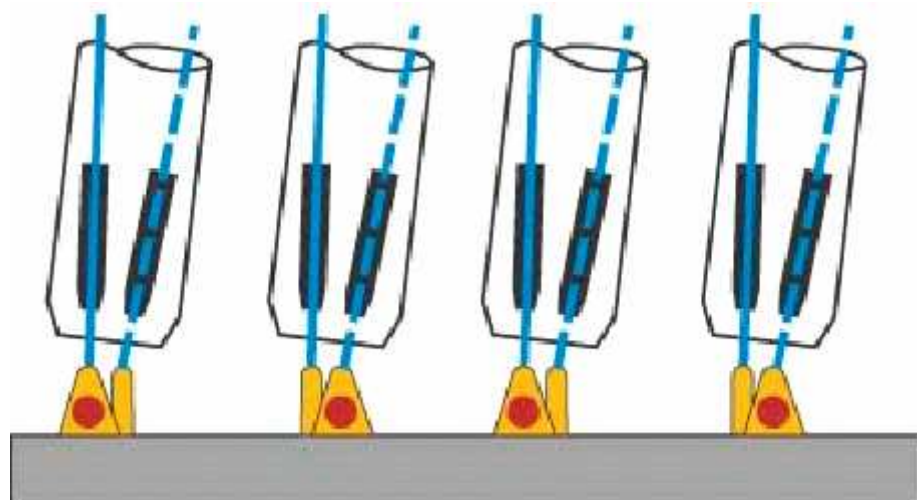
Tab. 2.1 Porovnání rychlostí svařování MIG a Time Twin<sup>4</sup>

Legované a nelegované oceli	Rychlost svařování [cm/min]	
	MAG	60
	TIME TWIN	140

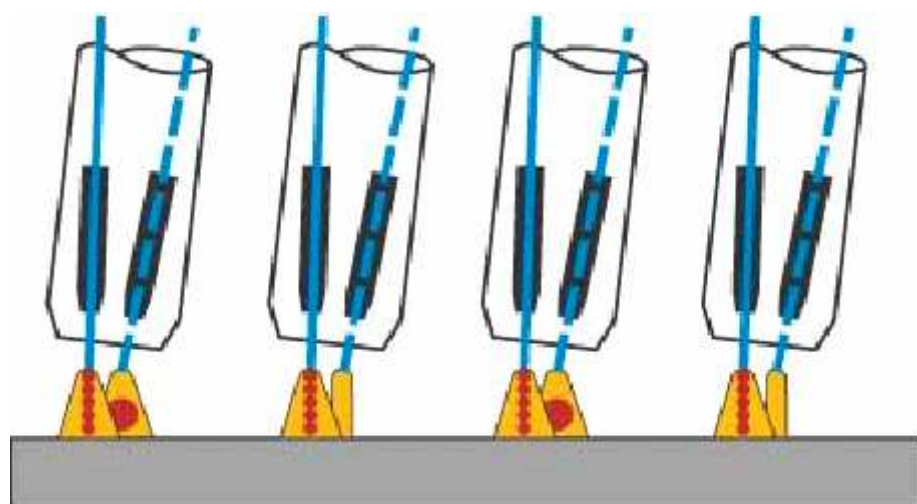
#### 2.4.2 Provozní režimy



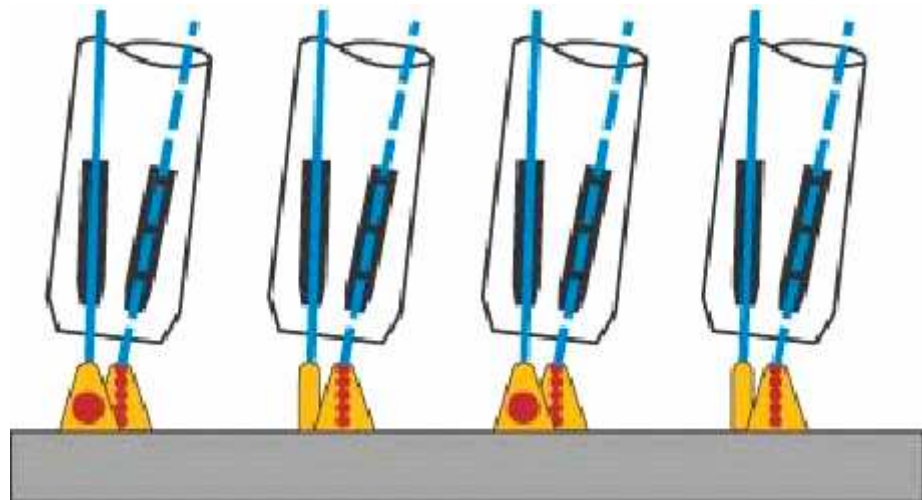
Obr. 2.13 Standard/Standard



Obr. 2.14 Puls/Puls



Obr. 2.15 Standard/Puls



Obr. 2.16 Puls/Standard

Tab. 2.2 Ochranné plyny při svařování Time Twin Digital <sup>4</sup>

<b>Nelegovaná a nízkolegovaná ocel</b>	
Pulzní svařování	Standardní plyn
	90% argon 10%CO <sub>2</sub>
	82% argon 18%CO <sub>2</sub>
Standardní svařování	95-98% argon 2-5%CO <sub>2</sub>

<b>Hliník</b>	
Pulzní svařování	argon směs argon/hélium

<b>Nerezová ocel</b>	
Pulzní svařování	97,5% argon 2,5 %CO <sub>2</sub>

### 2.4.3 Oblasti použití a aplikace

- stavba kolejových vozidel (profily)
  - reference: Alstom Itálie
  - díl: protlačovaný profil
  - druh svaru: V, koutový svar
  - základní materiál: AlMgSi 0,7
  - přídatný materiál: Al Mg 4,5 Mn
  - svařovací rychlost: 250 cm/min <sup>11</sup>



Obr. 2.17 Svařování kolejových vozidel <sup>11</sup>

- stavba lodí (koutové svary, profily)
  - reference: Lüerssen Werft
  - díl: boční žebra
  - druh svaru: koutový svar
  - základní materiál: S235 JR
  - přídatný materiál: G3 Si1
  - svařovací rychlost: 100 cm/min <sup>11</sup>



Obr. 2.18 Svařování při stavbě lodí <sup>11</sup>

- automobilový průmysl (přeplátované svary), např. firma Renault, Mercedes, VW, Alcan,
- stavba nádrží (tupé, podélné, přeplátované), např. firma Chromogen, Maersk
  - reference: Chromaden
  - obrobek: boiler
  - druh svaru: koutový a přeplátovaný
  - základní materiál: S235 JR
  - přídavný materiál: G3 Si1
  - svařovací rychlost: 300 cm/min <sup>11</sup>
- stroje pro zemní práce a speciální stroje, např. firma Caterpillar, Hyundai, Daewoo, Volvo

- reference: Schwing
- díl: výložník jeřábu
- základní materiál: S890 QL
- přídatný materiál: ZMn4CrNi2,5Mo
- svařovací rychlost: 150 cm/min <sup>11</sup>



Obr. 2.19 Svařování při stavbě speciálních strojů <sup>11</sup>

- stavba potrubních vedení (Popelína), např. firma Cranfield, Tectubi
  - reference: Cranfield
  - díl: potrubí
  - druh svaru: V svar
  - základní materiál: X100
  - přídatný materiál: Mn3Ni1Mo
  - svařovací rychlost: 130 cm/min <sup>11</sup>





Obr. 2.20 Svařování potrubního vedení <sup>11</sup>

### 3 SVAROVÉ SPOJE

Svařováním kovů vznikají nerozebíratelná spojení pomocí soustředěného tepla, nebo tlaku, případně obojím a s použitím, nebo bez použití přídavného materiálu, stejného, či podobného chemického složení jako spojované materiály. Spojení nastane působením meziatomových sil, vazeb na teplem nebo tlakem aktivovaných plochách, které jsou v oblasti svařování v roztaveném nebo plastickém stavu.<sup>2</sup>

#### 3.1 Vznik svarového spoje

V současnosti neexistuje metoda mechanického opracování povrchů kovových materiálů, která by mohla zajistit takovou přesnost umožňující při vzájemném styku dvou opracovaných povrchů přiblížení všech míst povrchů na meziatomovou vzdálenost tj. cca  $5 \cdot 10^{-8}$  cm. Nejvyšší přesností opracování lze docílit rovinnosti povrchu v rozmezí  $10^{-4}$  až  $10^{-6}$  cm. Přiblížením takto opracovaných povrchů se mohou uplatnit meziatomové vazby pouze v jednotlivých bodech, které představují nepatrnou část celkové plochy. Pevnost takto vytvořeného spoje je však nepatrná ve srovnání s pevností spojovaného kovu.

Aby se na povrchu dvou částí monokrystalů nebo polykrystalů mohly uskutečnit vzájemné vazby na celém povrchu je nutno použít dostatečně vysoký tlak ke stlačení výstupků a uskutečnit tak lokální plastickou deformaci. Ke vzniku svarového spoje však bez dodání potřebné energie samovolně nemůže dojít a je zapotřebí dodat aktivační energii nutnou pro překonání bariery potenciální energie soustavy atomů povrchových vrstev. Pro vznik svarového spoje za takto vytvořených podmínek je třeba dvoufázového procesu a to:

I.fáze - rozvoj fyzikálního kontaktu (přiblížení svarových ploch na vzdálenost nutnou pro uplatnění interakcí),

II.fáze - energetická interakce ukončující vznik spoje.<sup>2</sup>

Pro vznik spoje vyžaduje většina metod vytvoření vysoké lokální teploty pro natavení základního a přídavného materiálu.

Svarový spoj tvořený dvěma základními materiály stejného chemického složení a stejných fyzikálně-chemických vlastností se nazývá homogenním svarovým spojením. V opačném případě se jedná o heterogenní svarový spoj.<sup>2</sup>

#### 3.2 Názvy a druhy svarových spojů

Názvy svarů jsou rovněž normovány včetně základního znaku. Povrch svaru je zhotovován jako plochý, převýšený nebo vydutý. Dále se zhotovuje buď na podložce nebo bez tzv. podložení.<sup>2</sup>

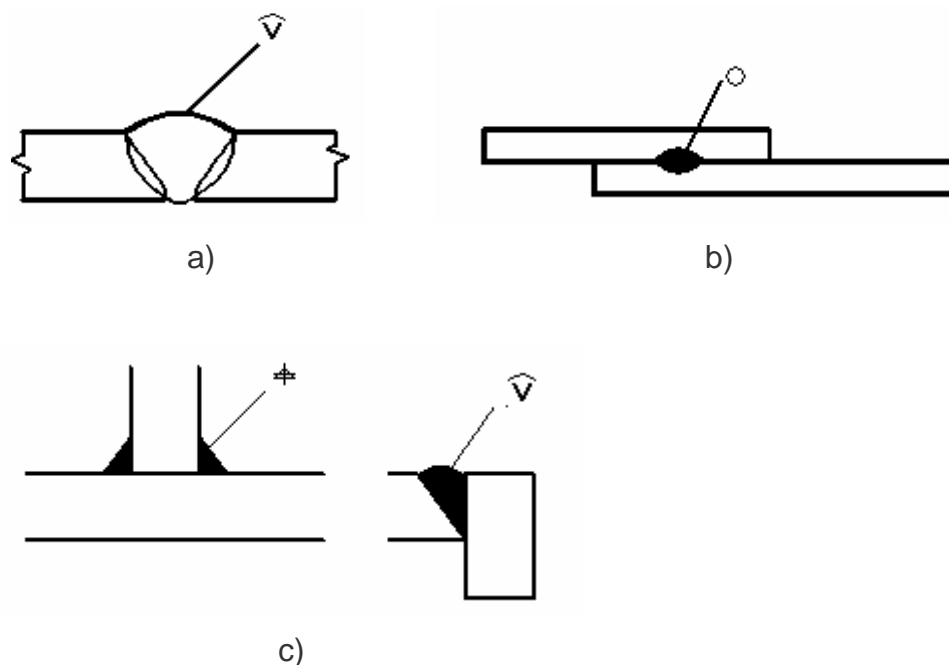
Základní tvar svarových ploch je stanoven normou ČSN s ohledem na použitou technologii svařování.

Norma ČSN EN 22553 zahrnuje svarové a pájené spoje-označování na výkrese.

Se zřetelem ke konstrukčním provedení existují tři základní druhy svarových spojů

- tupé (obr. 3.1 a)
- přeplátované (obr. 3.1 b)
- koutové tvaru T, křížové, rohové (obr. 3.1 c)

Ostatní druhy svarů jsou kombinací těchto tří základních typů.



Obr. 3.1 Druhy svarových spojů <sup>8</sup>

### 3.3 Vady svarových spojů

Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami a podmínkami. Defekty vyskytující se ve svarových spojkách a návarech se rozděluje do dvou hlavních skupin, a to vady plošné (vady typu trhlin, neprůvarů a studených spojů) a vady objemové (vady typu pórů, bublin, kovových i nekovových vměstků, nedodržení rozměrů, nepravidelnost povrchu svarů). Podle polohy vady ve svaru se rozdělují vady na povrchové a vady vnitřní. <sup>13</sup>

Trhliny se podle okamžiku vzniku dělí na trhliny za tepla, za studena, žíhací trhliny a laminární trhliny. Příčinou vzniku horkých trhlin je především chemické složení základního materiálu, trhliny za studena vznikají po skončení svařování při teplotách pod 300-200°C. <sup>13</sup>

Dutiny (např. bubliny, póry) jsou objemové vady kulovitého nebo protáhlého tvaru, vyplněné plynem. Vznikají při nedostatečné ochraně tavné lázně před vlhkostí vzduchu, při nedostatečně očištěných svarových plochách.<sup>13</sup>

Studený spoj vzniká nedokonalým tavným spojením svarového kovu se základním materiálem nebo navařenou housenkou. Hlavní příčiny jsou nízký svařovací proud, nesprávné vedení elektrody, velká rychlost svařování nebo nevhodně volený průměr elektrody.<sup>13</sup>

Klasifikaci vad obecně se vyskytujících ve svarech při svařování uvádí norma ČSN ISO 6520.<sup>13</sup>

Kontrola svarů se rozděluje podle vlivu na svarový spoj na nedestruktivní (nedochází k porušení svaru) a na destruktivní (porušení svaru).<sup>13</sup>

### 3.4 Tepelné procesy při svařování

Teplotní pole se označuje oblast okolí svaru o teplotě vyšší než je teplota okolí. Můžeme ji zobrazit izotermami, které mají u tavného svařování s bodovým zdrojem tepla přibližně tvar elipsy a spojitě definují pole od teploty tavení na teplotu okolí.

Plocha teplotního pole, ve které mohou být dosaženy teploty překrystalizace se nazývá tepelně ovlivněná oblast.

Teplotní změny vyvolané ohřevem při svařování jsou vždy provázené změnami délkovými, zapříčiněné teplotní roztažností materiálu. Protože u svařování dochází pouze k lokálnímu ohřevu základního materiálu brání okolní chladnější materiál těmto délkovým změnám. Během chladnutí se materiál smršťuje a současně roste jeho pevnost zůstanou ve svarovém spoji značná zbytková napětí v konečné fázi dosahující až meze kluzu. Překročením napětí meze kluzu dochází u svarů k plastickým deformacím, které se projevují změnou tvaru a rozměrů svařence. Podélné deformace dosahují velkých hodnot u dlouhých svarů a velkých průřezů svarové housenky. Příčné deformace závisí především na šířce teplotního pole. Deformace úhlové jsou způsobené nesymetrickým průřezem svaru, kde objem kovu na líci svaru smršťuje více než kořen svaru, nebo postupným kladením housenek.

## 4 MATERIÁLOVÁ CHARAKTERISTIKA

Vysokopevnostní materiály se používají pro svařované ocelové konstrukce na stavbách, stroje, těžní zařízení, jeřáby, mosty, vysokopevnostní nosné konstrukce. Lze je tvářit za tepla i za studena.

Základní rozdíl mezi klasickou a vysokopevnostní ocelí je v pevnosti, v mezi kluzu, tažnost a vrubová houževnatost zůstávají stejné. Využití těchto ocelí je hlavně tam, kde je nutnost snížení hmotnosti.

Při svařování se musí brát ohled na to, že vysokopevnostní materiály jsou náchylné k prasklinám vzniklým za studena. Důvodem je, že vodík nemůže uniknout z oblasti svaru a vlivem nárůstu molekulárního vodíku dochází k porušení vnitřní struktury svarového spoje. Chemické složení základního materiálu je důležité pro zamezení vzniku prasklin.

Při dodržování těchto pravidel se může zamezit vzniku prasklin

- předeštev provádět v závislosti na geometrii svaru, tloušťce materiálu a druhu oceli
- svarové spáry musí být čisté a suché
- pokud možno používat měkké, nelegované svařovací elektrod
- zvolit přídatné svařovací materiály s nízkým obsahem vodíku
- vhodným technologickým postupem svařování zamezit vysoké úrovni vnitřního pnutí.

### 4.1 Svařitelnost ocelí

Svařitelnost ocelí je komplexní charakteristika vyjadřující vhodnost kovu na zhotovení svarů s požadovaným účelem, při určitých technologických možnostech svařování a konstrukční spolehlivost svarového spoje. Při posuzování svařitelnosti se vychází z toho, že je svařovaný materiál schopen zachovat celistvost při svařování vhodnou technologií.<sup>1</sup>

#### 4.1.1 Svařitelnost termomechanicky zpracovaných ocelí

Termomechanické zpracování ocelí (TMZ) je nekonvenční způsob výroby polotovarů, které se dosahuje řízenou kombinací tváření materiálu s jeho fázovými a strukturními přeměnami. Takhle lze zpracovat téměř všechny polymorfnní oceli.

Mezi základní způsoby termomechanického zpracování je možné řadit:

a) zpracování niobem nebo vanadem legovaných, mikrolegovaných jemnozrnných ocelí metodou řízeného válcování

- b) termomechanické zpracování deformací před transformací – nejběžnější způsob, rozdělují se na vysokoteplotní a nízkoteplotní termomechanické zpracování
- c) deformace během transformace-zpevnění oceli se dosahuje u uhlíkových ocelí tvářením po rychlém ochlazení s následným ochlazením na vzduchu, dosáhne se malého zvýšení pevnosti, ale zvýšení houževnatosti
- d) deformace po transformaci-zvyšuje se mez kluzu materiálu při současném poklesu hodnot tažnosti a lomové houževnatosti

## 4.2 Otěruvzdorné plechy HARDOX a vysokopevné plechy WELDOX

HARDOX je nejrozšířenější v řadě otěruvzdorných plechů HARDOX. Vzhledem k vysoké úrovni houževnatosti a bezproblémové svařitelnosti se často používá jako otěruvzdorný a konstrukční plech současně.<sup>12</sup>

WELDOX jsou konstrukční vysokopevné otěruvzdorné plechy s mezemi kluzu od 420 do 1111 MPa. Jejich podstata je v dosažení daného pevnostního stupně při zachování co nejlepší svařitelnosti.<sup>12</sup>

Pro svařování plechů HARDOX je cílem udržet tvrdost tepelně ovlivněné zóny (TOZ) a dosáhnout vyhovující houževnatosti této oblasti. Pro plechy WELDOX je cílem zajistit odpovídající pevnost svaru, dosáhnout vyhovující houževnatost svaru.<sup>12</sup>

Obsahují málo legujících prvků, takže mají malý uhlíkový ekvivalent. Proto lze tyto plechy snadno svařovat ke všem konstrukčním plechům.<sup>12</sup>

Ocel s nízkým uhlíkovým ekvivalentem (CE) lze lépe svařovat než ocel s vysokou hodnotou CE. Obvyklé hodnoty CE pro konkrétní tloušťku plechu jsou uvedeny v našich specifikacích.<sup>12</sup>

Uhlíkový ekvivalent (podle IIW) lze vypočítat z této rovnice:

$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15$$

Tab. 4.1 Typy plechů HARDOX a WELDOX<sup>12</sup>

Typ oceli	Rozsah tloušťky [mm]	Uhlíkový ekvivalent CE *
S 355	5 -100	0,39 – 0,43
WELDOX 355	8 - 25	0,34 – 0,37
WELDOX 420	6 - 80	0,37 – 0,39
WELDOX 460	6 - 80	0,37 – 0,42
WELDOX 500	8 - 80	0,37 – 0,42
WELDOX 700	4 - 130	0,39 – 0,64

WELDOX 900	4 - 80	0,56
WELDOX 960	4 - 50	0,56 – 0,64
WELDOX 1100	5 - 40	0,68 – 0,72
HARDOX 400	4 -130	0,36 – 0,70
HARDOX 450	4 - 80	0,41 – 0,62
HARDOX 500	5 - 80	0,58 – 0,68
HARDOX 600	5 - 80	cca 0,82

\*) běžné hodnoty

#### **4.2.1 Teplota výrobku během svařování**

- Předehřev

Předehřev při svařování příznivě ovlivňuje pozvolné ochlazování svaru a snižuje hodnotu vnitřního pnutí a umožní lepší odvod vodíku ze svarového spoje. Je mimořádně důležitý při stehování a při svařování kořenových svarů. Čím je teplota během svařování a po svařování vyšší, tím snáz unikne vodík z oceli. Nutnost provést předehřev se zvyšuje s tloušťkou tak, aby se kompenzovalo rychlejší ochlazování tlustšího plechu, a také proto, že tlustší plech má vyšší hodnotu CE než tenký plech. Pokud se svařují různé typy oceli nebo pokud se ke svařování používají elektrody s vyšším uhlíkovým ekvivalentem CE než je ekvivalent základního materiálu, potřebný předehřev se stanoví podle oceli (nebo elektrody) s vyšším uhlíkovým ekvivalentem.<sup>12</sup>

- Dodatečný ohřev

Pokud se okamžitě po svařování provede ohřev svaru, také to usnadní únik vodíku z oceli. Teplota ohřevu po svařování by měla být stejná jako teplota předehřevu. Doba ohřevu by měla být minimálně 5 minut na milimetr tloušťky plechu, avšak celkem nejméně jedna hodina.<sup>12</sup>

#### **4.2.2 Dodatečné zpracování**

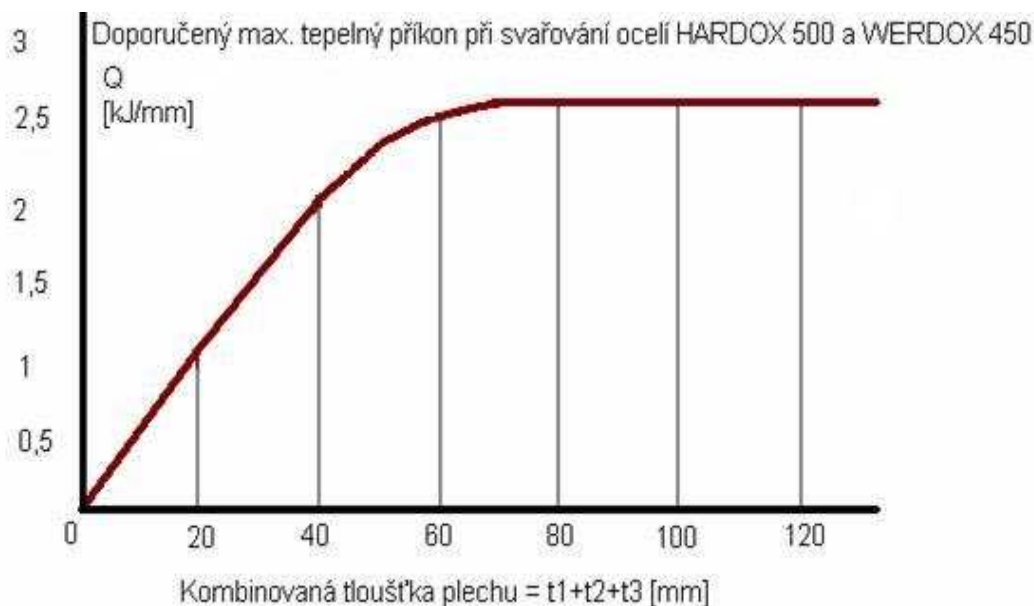
- Žihání ke snížení pnutí

Žihání ke snížení pnutí se provádí za účelem snížení zbytkového pnutí po ukončení svařování. WELDOX lze za účelem snížení pnutí žíhat pouze v případě, že tento postup vyžadují konstrukční předpisy. HARDOX a WELDOX 1100 se za účelem snížení pnutí nesmí žíhat.<sup>12</sup>

- Zvýšení meze únavy

Mez únavy svaru lze zvýšit různým dodatečným zpracováním. Tímto se docílí plynulejší přechod mezi svarem a plechem a sníží se koncentrace pnutí.<sup>12</sup>

Pro svařování materiálu HARDOX a WELDOX se doporučuje dodržovat níže uvedená omezení tepelného příkonu. Hodnoty tepelného příkonu pod níže uvedenými hodnotami zajišťují uspokojivou kombinaci houževnatosti, pevnosti a tvrdosti tepelně ovlivněné zóny (TOZ).<sup>12</sup>



Obr. 4.1 Hodnoty tepelného příkonu<sup>12</sup>

#### 4.2.3 Volba přídavného materiálu

Při svařování materiálu HARDOX a WELDOX lze použít veškeré obvyklé metody obloukového svařování, které jsou určeny pro svařování běžných a vysokopevnostních plechů. Volba přídavného materiálu vychází z požadavků, které jsou pro jednotlivé případy kladeny na mechanické vlastnosti svaru. Pro svařování materiálu HARDOX a WELDOX jsou vhodné bazické elektrody.<sup>12</sup>

#### 4.2.4 Použití měkkých elektrod při svařování materiálu HARDOX

HARDOX by se měl svařovat měkkými bazickými elektrodami. Měkká elektroda je přídavný materiál s mezí kluzu v tahu menší než 500 MPa. Tyto elektrody snižují úroveň zbytkového pnutí ve svaru a tím náchylnost materiálu na vznik trhlin ve studeném stavu. Pokud je svar umístěn tak, že je vystaven značnému opotřebení, lze pro krycí housenky použít tvrdé elektrody. Podmínky pro svařování pomocí austenitických nerezavějících přídavných materiálů:

- svařenec je pevně upnutý
- výrobek nelze předežhřát
- plech je silnější než 60 mm<sup>12</sup>

### 4.3 IMEX 700/DILLIMAX 690

Je vysokopevná svařitelná jemnozrnná ocel v zušlechtěném stavu se střední hodnotou meze kluzu 690 MPa. Materiál splňuje požadavky podle EN 10137. Upřednostňuje se pro svařované ocelové konstrukce na stavbách a strojích (stavební stroje, jeřáby, mosty, nosné konstrukce, atd.)<sup>10</sup>

#### 4.3.1 Označování a obor platnosti

IMEX 700/DILLIMAX může být dodáván ve třech jakostech

- základní materiál (B) se střední hodnotou vrubové houževnatosti při  $-20^{\circ}\text{C}$ , podle STN EN 10025 část. 6 DILLIMAX 690 B
- jakost (T) se střední hodnotou vrubové houževnatosti při  $-40^{\circ}\text{C}$ , podle STN EN 10025 část. 6 DILLIMAX 690 T
- zvláštní jakost (E) se střední hodnotou vrubové houževnatosti při  $-60^{\circ}\text{C}$ , podle STN EN 10025 část. 6 DILLIMAX 690 E<sup>10</sup>

#### 4.3.2 Chemické složení

Pro chemickou analýzu platí tyto hodnoty v %.

Tab. 4.2 Chemické složení:<sup>10</sup>

C	≤0,18	Cr	≤1,5
Si	≤0,50	Ni	≤1,8
Mn	≤1,6	Mo	≤1,8
P	≤0,03	V+Nb	≤0,1
S	≤0,01	B	≤0.004

### 4.3.3 Mechanické a technologické vlastnosti

Tab. 4.3 Hodnoty získané ze zkoušky tahem při pokojové teplotě-vzorky odebrané příčně na směr válcování<sup>10</sup>

Tloušťka plechu [mm]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Reh [MPa]	Tažnost As [%]
≤65	770 - 940	690	14
> 65 ≤ 100	770 - 940	670	14
>100 ≤ 150	720 - 900	630	14
>150 ≤ 200	700 - 880	610	14

Zkoušky se uskutečňují podle EN 10137 a to zkouška tahem a zkouška rázem v ohybu pro tavbu.<sup>10</sup>

Zkouška tahem se připravuje podle EN 10137. Zkoušky probíhají podle EN10002-1 na zkušebních vzorcích  $l_0=5,65\sqrt{S_0}$ .<sup>10</sup>

Zkouška rázem v ohybu se vykonává následovně v případě, není-li dohodnuto jinak, pokaždé při nejnižší teplotě odpovídající jakosti na Charpyho zkušebních těliscích s V vrubem podle EN 10045-1.<sup>10</sup>

Výsledky se dokumentují písemným osvědčením 3. 1 B podle EN 10204, není-li dohodnuto jinak.<sup>10</sup>

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Ve firmě Fronius byly svařeny dva vzorky z materiálu IMEX 700/DILLIMAX 690. Jeden koutový a jeden tupý svar. Technologie svařování Time Twin Digital-svařování dvoudrátém. Rozměry vzorků 100x100 mm, tloušťka 10 mm. Cílem je najít vhodné parametry svařování, aby mohly být vyhodnoceny vlastnosti svarů.

První zkušební svařování proběhlo na zkušebním kusu z uhlíkové oceli, délka úkosu 800 mm. Na svařovací robotu se nastavují rychlost podávání obou drátů, korekce délky oblouku a napětí a proud. Při zkušebních svarech se nastavovaly různé parametry, pro nalezení vhodného svařovacího postupu. Oba dráty nastaveny v provozním režimu puls/puls. V tab. 5.1a 5.2 jsou výsledky zkušebních svarů. Lze usoudit, že při vyšším podávání drátu a vyšší rychlosti vzniká větší rozstřík a zápal. Dále bylo zjištěno, že při zvýšení rychlosti na  $v_s=1,7$  m/min nevzniká zápal a svar je převyšovaný.

Tab. 5.1 Vznikl minimální zápal a malý rozstřík,  $v_s=1,0$  m/min

Rychlost podávání drátu [m/min]	Korekce délky oblouku [dílký]	Napětí [A]/proud [V]	Skutečně naměřené napětí [A]/proud [V]
13	-10, 0	320 A / 29,3 V	320A / 25,3 V
11	-5, 0	298 A / 28,7 V	326 A / 27,8 V

Tab. 5.2 Vznikl velký rozstřík a zápal,  $v_s=1,2$  m/min

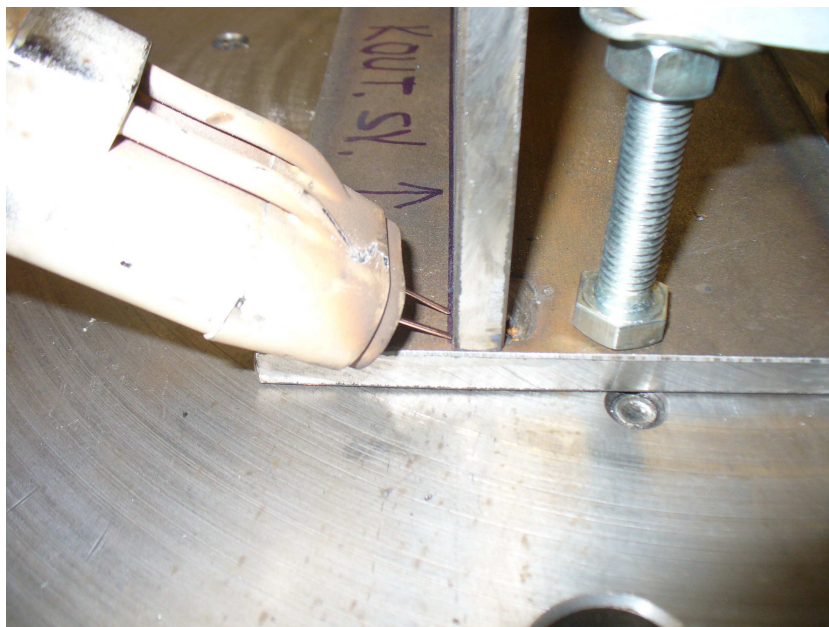
Rychlost podávání drátu [m/min]	Korekce délky oblouku [dílký]	Napětí [A]/proud [V]	Skutečně naměřené napětí [A]/proud [V]
15	-5, 0	320 A / 29,3 V	330A / 27,2 V
14	-3, 0	310 A / 29,0 V	348 A / 26,8 V

Po několika zkušebních svarech byly zvoleny parametry pro svařování, které jsou uvedeny v tab.5.3.

## 5.1 Vyhodnocení svařování

### 5.1.1 První vzorek-koutový svar

- materiál IMEX 700/DILLIMAX 690
- svařován koutový svar
- metoda Time Twin Digital
- maximální svařovací rychlost robotu je 6m/min



Obr.5.1 Svařovací hlavice při nastavování svařovací polohy

#### 5.1.1.1 Volba přídatného materiálu

Přídatný materiál se volí s ohledem na požadované hodnoty svarového kovu a musí odpovídat podmínkám svařování (vnesené teplo, přechodová teplota). Proto musí tyto materiály zajistit zamezení vzniku vad typu studených trhlin a trhlin za horka.

Použit trubičkový drát s kovovou náplní, který netvoří strusku. Aplikuje se na offshore konstrukce, jeřáby, tlakové nádoby, strojní zařízení. Dále na díly a komponenty s vysokou pevností. Pro vysokopevnostní svary nutno dodržet stanovené hodnoty vneseného tepla. Má dobré zapalování oblouku. Svařování na více vrstev je bez nutnosti čištění svaru od nečistot, má dobré přemostění vůlí v kořenových vrstvách a vysokou efektivitu svařování pro ekonomickou výrobu svarků. Normy: EN 12535: T 69 4 Mn2NiCrMo M M 1 H5

AWS/ASME-SFA-5.29:E 111 T1-K4

AWS/ASME-SFA-5.28:E 110 C-G

Chemické složení svárového kovu: C=0,05%, Mn=1,6%, Si=0%, P<0,015%, S<0,015%, Cr=0,5%, Ni=2,2%, Mo=0,5%.

Tab.5.3 Mechanické vlastnosti svarového kovu

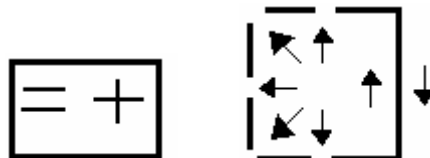
Tepelné zpracování	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_5$ [%]
u	>690	760-960	>17
s	>670	760-850	>17

	Nárazová energie [J]	
	-20°	-40°
u	>60	>47
s	>60	>47

u: po svaření, s: žíhání na odstranění prutí

Průměry trubičky: Ø1,0 – 2,4 mm

Polarita:



Tab.5.4 Svařovací parametry robotu

Rychlost podávání drátu [m/min]	Korekce délky oblouku [dílký]	Napětí [A]/proud [V]	Skutečně naměřené napětí [A]/proud [V]
13	-5, 0	320 A / 26,3 V	330A / 27,2 V
12	-3, 0	310 A / 29,0 V	348 A /26,8 V

V tab. 5.4 jsou uvedeny parametry svařovaného procesu, první řádek jsou parametry pro první drát, v druhém řádku potom pro druhý drát. Korekce délky oblouku je rozdílná u prvního a druhého drátu. Nastavují se podle vzájemného chování obou oblouků. Svařovací rychlost  $v_s=1,2$  m/min.

Specifické vnesené teplo:

$$Q_s = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{1000 \cdot v_s} [kJ \cdot mm^{-1}]$$

$$1,2m \cdot \text{min}^{-1} = 20mm \cdot s^{-1}$$

$$Q_{s1} = \frac{0,80 \cdot 330 \cdot 27,2}{1000 \cdot 20} = 0,36 [kJ \cdot mm^{-1}]$$

$$Q_{s2} = \frac{0,80 \cdot 348 \cdot 26,8}{1000 \cdot 20} = 0,37 [kJ \cdot mm^{-1}]$$

Pro oba dráty vypočteme vnesené teplo. Hodnota  $\eta=0,80$ .

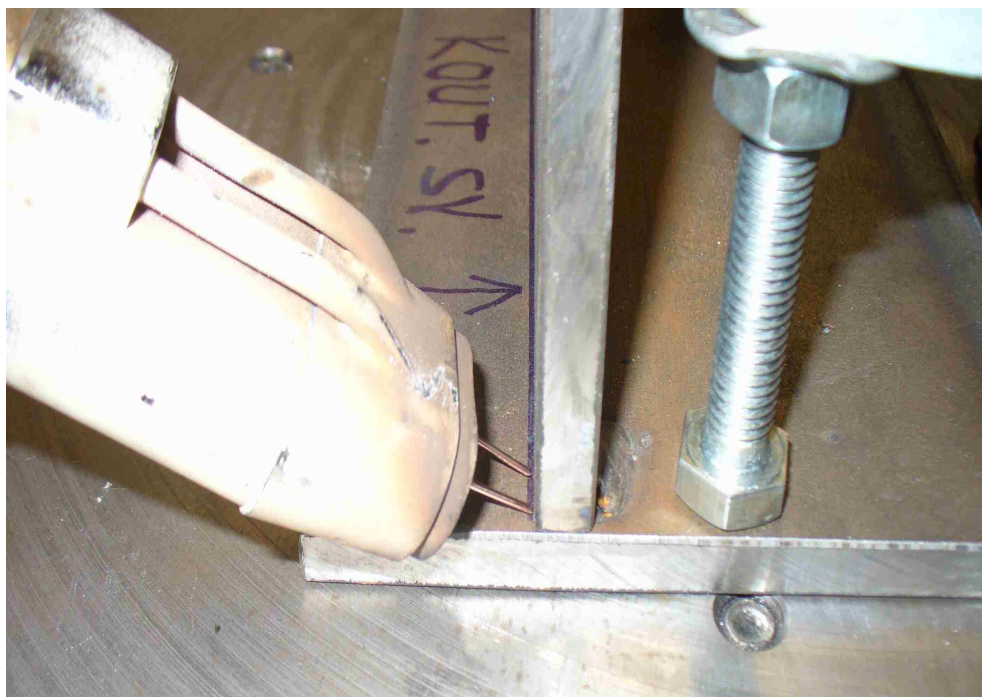
	$Q_s [kJ \cdot mm^{-1}]$
1. drát	0,36
2. drát	0,37

$$Q_s = Q_{s1} + Q_{s2}$$

$$Q_s = 0,39 + 0,45 = 0,84 kJ \cdot mm^{-1}$$

Hodnota  $Q_c$  (celkové vnesené teplo) je na nízké úrovni.

Při svařování koutového svaru nastal problém zadržování prvního drátu. Z tohoto důvodu nemohla být housenka svařena najednou, ale nadvakrát. Rozstřík je mírný.



Obr. 5.2 Svařování první housenky

Pro dosažení kvalitního svaru bylo potřeba najít vhodné parametry svařování. Jelikož se jedná o vysokopevnostní ocel, je třeba jiných parametrů než při svařování běžné oceli. Větší rozstřík se objevil při větší rychlosti podávání drátu.



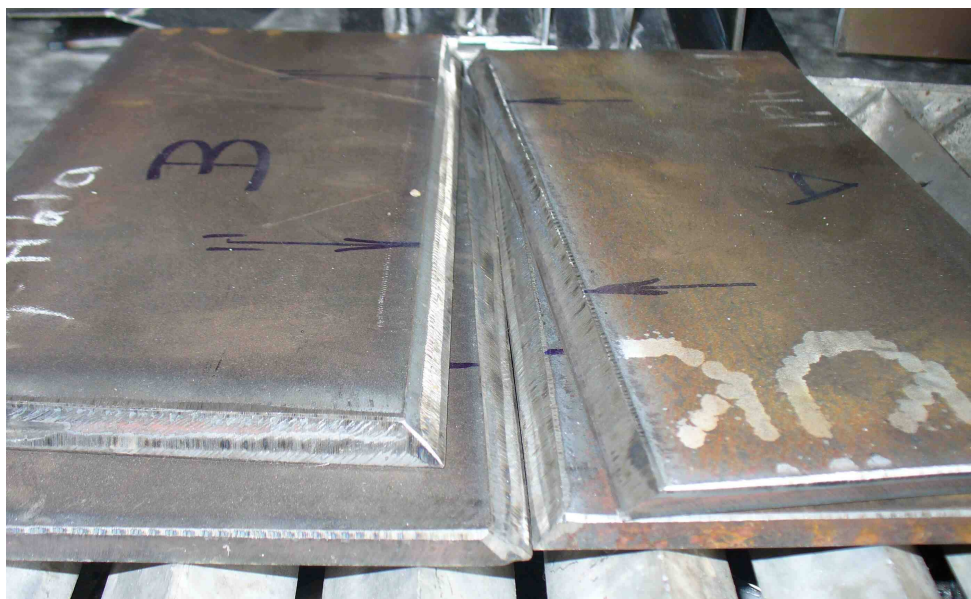
Obr. 5.3 První svar

Při svařování první housenky se drát přivařil.



Obr. 5.4 Druhý svar

### 5.1.2 Druhý vzorek-koutový svar



Obr.5.5 Zkušební vzorky

Druhý zkušební vzorek byl svařován dvěma vrstvami

Tab.5.5 Zvolené parametry svařování

Rychlost podávání drátu [m/min]	Korekce	Napětí [A]/proud [V]	Skutečně naměřené napětí [A]/proud [V]
12	-15, 0	310 A / 26,9 V	359A / 23,4 V
10	-5, 0	286 A / 28,4 V	348 A / 26,8 V

Svařovací rychlost prvního svaru zvolena  $v_s=1,3$  m/min. Na obr.5.6 je vidět již očištěný svar.



Obr. 5.6 První svar na zkušebním vzorku z uhlíkové oceli

Opět vypočítáme vnesené teplo pro oba dráty.

$$1,3m \cdot \text{min}^{-1} = 21,6mm \cdot s^{-1}$$

$$Q_{s1} = \frac{0,80 \cdot 359 \cdot 23,4}{1000 \cdot 21,6} = 0,31 [kJ \cdot mm^{-1}]$$

$$Q_{s2} = \frac{0,80 \cdot 348 \cdot 26,8}{1000 \cdot 21,6} = 0,34 [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$$

	$Q_s$ [kJ.mm <sup>-1</sup> ]
1. drát	0,31
2. drát	0,34

$$Q_s = 0,31 + 0,34 = 0,65 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Také zde je hodnota celkového vneseného tepla poměrně nízká.

Na dalším obr.5.7 je svar při zvýšení rychlosti podávání drátu a zvýšení výkonu a proudu. Svařovací rychlost je nižší,  $v_s=1,0$  m/min.

Tab. 5.6 Parametry svařování

Rychlost podávání drátu [m/min]	Korekce	Napětí [A]/proud [V]	Skutečně naměřené napětí [A]/proud [V]
15	-5, 0	340 A / 30 V	377A / 25,2 V
14	-7, 0	330 A / 29,7 V	365 A / 25,2 V



Obr. 5.7 Svar při zvýšené rychlosti podávání drátu

$$Q_{s1} = \frac{0,80 \cdot 377 \cdot 25,2}{1000 \cdot 16,6} = 0,45 [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$$

$$Q_{s2} = \frac{0,80 \cdot 365 \cdot 25,2}{1000 \cdot 16,6} = 0,44 [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$$

	$Q_s$ [kJ.mm <sup>-1</sup> ]
1. drát	0,45
2. drát	0,44

$$Q_s = 0,45 + 0,44 = 0,89 \text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Podle výpočtu je vidět, že celkové vnesené teplo má vyšší hodnotu při vyšší rychlosti podávání drátu.

Na obr. 9 je vidět krycí vrstva. Svar je očištěn. Svařovací rychlost  $v_s=1,0$  m/min.

Tab.5.7 Parametry krycí vrstvy

Rychlost podávání drátu [m/min]	Korekce	Napětí [A]/proud [V]	Skutečně naměřené napětí [A]/proud [V]
15	-5, 0	340 A / 30 V	368A / 25,9 V
14	-3, 0	330 A / 29,7V	357 A /27,2 V



Obr. 5.8 Krycí vrstva

	$Q_s$ [kJ.mm <sup>-1</sup> ]
1. drát	0,49
2. drát	0,46

$$Q_s = 0,49 + 0,46 = 0,95 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Je zřejmé, že vhodnější je varianta s vyšší rychlosti podáváním drátu. Svařovací parametry, kterými jsou svařeny vzorky jsou uvedeny v tab. 5.6 pro první vrstvu a v tab. 5.7 pro druhou vrstvu. Liší se pouze skutečné hodnoty proudu a napětí a hodnota korekce oblouku. Provozní režim svařování puls/puls.



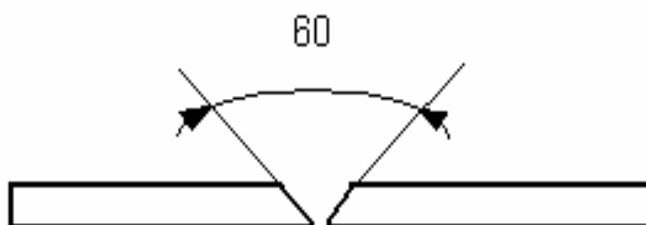
Obr.5.9 Digitální displej pro nastavení polohy svařování



Obr.5.10 Pracoviště pro svařování Time Twin Digital

## 5.2 Vyhodnocení vlastností svarů

Svařené vzorky byly nařezány plasmou PLASMA CUT 50 firmy ESAB. Byly nařezány úkosy a následovně nařezány na jednotlivé vzorky na zkoušky. Provedly se tři tahové zkoušky, a čtyři ohybové zkoušky-dva lícni a dva kořenové ohyby, dále zkouška tvrdosti a byly vyfoceny struktury povrchu svaru. Rozměry vzorků 125x250 mm, úkos 60°.



Obr.5.11 Tupý svar

### 5.2.1 Tahová zkouška

Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče jednoosým tahovým zatížením až do přetržení pro stanovení jedné napěťové a deformační

charakteristiky. Obvyklá teplota okolí je 10-35° C pokud není stanoveno jinak. Rychlost zatěžování obvykle v rozmezí 0,5-2,0 mm.min<sup>-1</sup>

Zkušební tyč je upnuta do čelistí trhacího stroje. Po spuštění elektromotoru se začne pohybovat střední příčnick. Zkušební tyč je zatěžována silou F, velikost této síly je registrována do zapisovacího programu M-TEST 1.7. Základní rozměry zkušebních tyčí dle ČSN 10002-1. Odběr vzorků ze svařovaného materiálu dle ČSN EN 1597-2. Teplota okolí 20°C. Základní rozměry zkušebních tyčí dle ČSN EN 10002-1.

Odběr vzorků ze svařovaného materiálu dle ČSN EN 1597-2.

Vyhodnocení zkoušky:

Vzhledem k vysoké tvrdosti materiálu v TOO a vrubovému účinku povrchu svaru v přechodu na základní materiál došlo k přetržení vzorku bez výrazného prodloužení. Tímto nebylo dosaženo maximálních hodnot uvedených v deklarovaném listu (viz. příloha 1). Výsledné meze kluzu odpovídají předčasnému lomu.

Na obr.5.12 jsou znázorněny tři výsledné grafy tahové zkoušky všech tří vzorků.

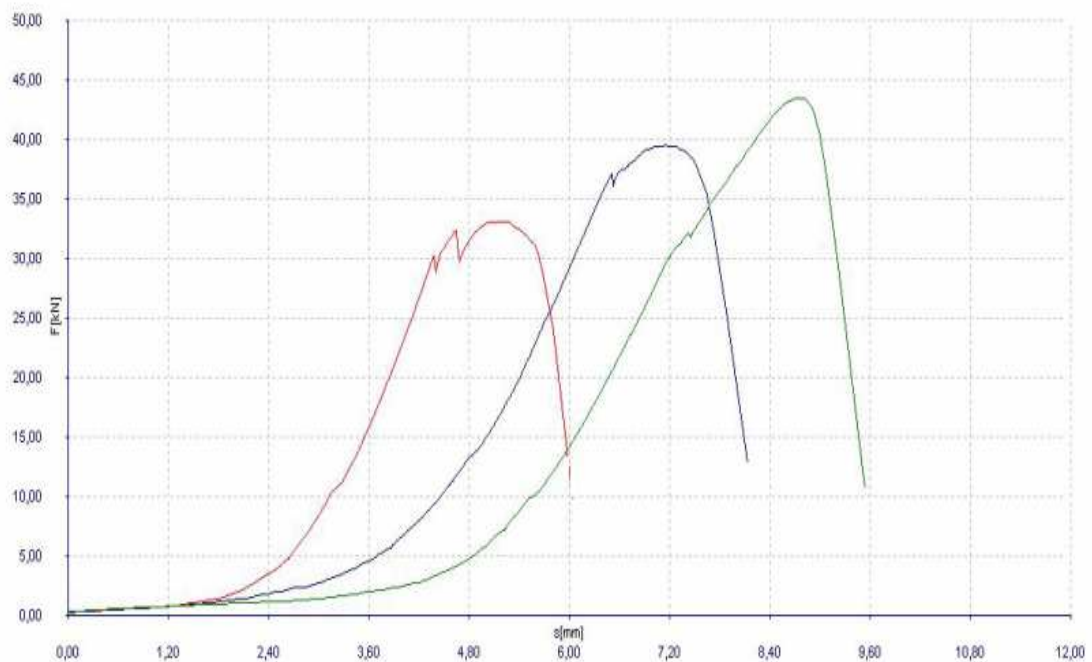
V tab.5.8 a 5.9 jsou hodnoty získané ze zapisovače.

Tab.5.8 Naměřené hodnoty při tahové zkoušce

vzorek číslo	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]
1	10,18	10,10	102,82
2	10,46	10,11	105,75
3	12,42	10,09	125,32

Tab.5.9 Naměřené hodnoty při tahové zkoušce

vzorek číslo	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>p2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [Mpa]
1	33129,20	320,93	322,21
2	39505,20	314,34	315,24
3	43539,20	343,60	347,43



Obr.5.12 Výsledné grafy tahové zkoušky

Pro porovnání jsou v následujících tabulkách uvedeny mechanické vlastnosti ze svarových zkoušek provedených dle zdroje 14. Vzorky byly svařeny jedním drátem, materiál IMEX 700/DILLIMAX 690. Bylo vyhodnoceno deset vzorků při teplotách  $-10^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ .

Tab. 5.10 Naměřené hodnoty při teplotě  $-10^{\circ}\text{C}$ , rozměry vzorku 10,15x12,5

č. vzorku	Fm [N]	Rm [MPa]	Rp2 [Mpa]
1	102353,6	813,9	
2	104440,8	830,5	805,7
3	101855,2	810,0	792,6

Tab.5.11 Naměřené hodnoty při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$ 

4	98065,6	779,8	768,8
5	94539,2	751,8	747,6
6	98780,4	785,5	773,3

Tab.5.12 Naměřené hodnoty při teplotě 80 °C

7	102569,6	812,4	800,3
8	10550,4	836,0	820,3
9	108672,4	860,7	822,3

Z naměřených hodnot je zřejmé, že při svařování jedním drátem je z dosáhnuto vyšších hodnot meze pevnosti i síly.

### 5.2.2 Ohybová zkouška

Princip zkoušky spočívá v tříbodovém ohybu. Vyhodnocuje se úhel ohybu, při kterém dosáhne trhliny 3 mm. Pro uhlíkové jemnozrné oceli se vyžaduje 180°C.

Zkouška se prováděla na trhacím stojci ZU 20, rozsah měření 100 kN, průměr trnu 30 mm. Dva vzorky se ohýbaly na lícové straně, dva na straně kořene.

Vyhodnocení zkoušky:

Na stroji byla změřena maximální síla, která stačila k porušení svaru. Získané parametry jsou uvedeny v tab. 5.13.

Tab.5.13 Naměřené hodnoty při ohybové zkoušce

	číslo měření	Fmax [kN]	úhel ohybu
líc	1	13	125°
	2	12,5	120°
kořen	3	11,4	130°
	4	28	150°



Obr. 5.13 Pohled na trhlinu v TOO při ohybové zkoušce na povrchu svaru



Obr. 5.14 Pohled na ohyb v oblasti kořene o úhlu  $150^\circ$



Obr. 5.15 Vzorky ohýbané na straně kořene



Obr. 5.16 Vzorky ohýbané na straně svaru

Z ohybové zkoušky lze usoudit, že svar i kořen na vzorcích praskly v TOO. Na jemnozrné ploše jsou viditelné relativně malé plynové póry.

### 5.2.3 Zkouška tvrdosti

Provádí se zkouška tvrdosti podle Vickerse. Vnikajícím tělískem je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu  $136^\circ$ . Odběr vzorků se provádí mechanickým řezáním, příčně na svarový spoj. Poté je provedena úprava povrchu tak, aby nedošlo k metalurgickým změnám povrchu.

Měření tvrdosti se provádí v základním materiálu, přes TOO až do svarového kovu. Výsledkem naměřených je graf průběhu tvrdosti ve svaru.

Vyhodnocení zkoušky:

Měření bylo provedeno na tvrdoměru ZWICK 3212 se zatížením HV1. V TOO se pozoruje nárůst tvrdosti. Vzorky byly nařezány, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění či ke změnám struktury. Poté byly zarovnány a vyleštěny.

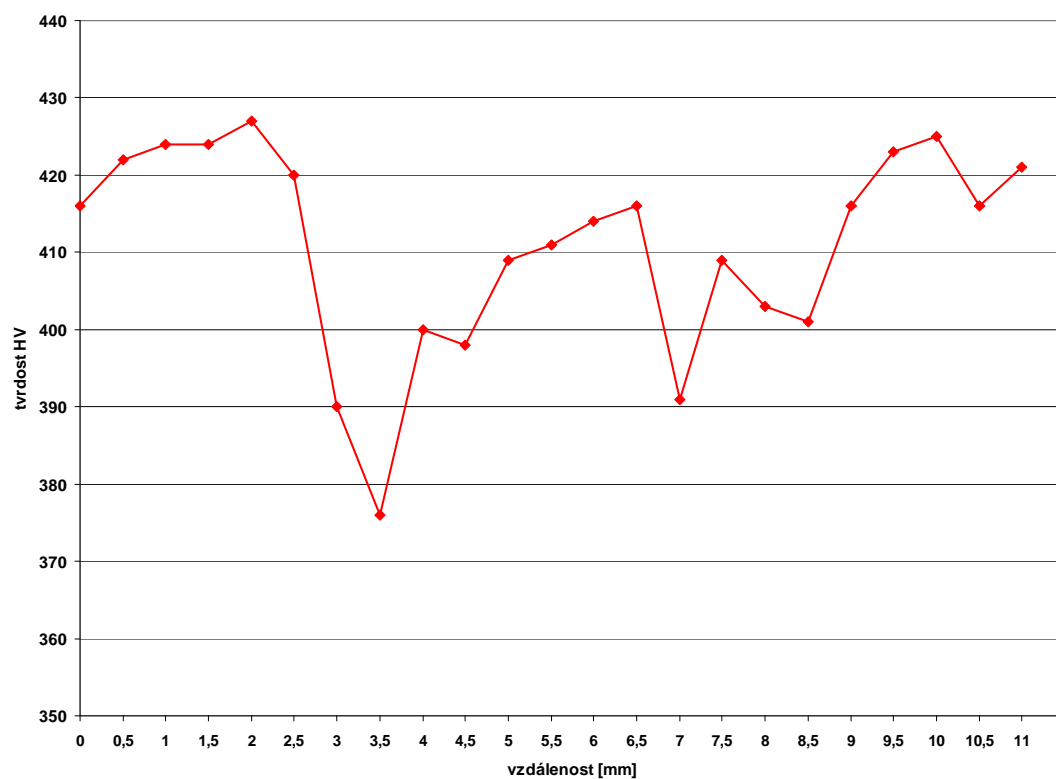
Na tvrdoměru byla změřena tvrdost kořenového svaru a krycí housenky. Měření se prováděla po 0,5 mm, měřítko 40:1.

Tab. 5.14 Naměřené hodnoty HV na kořenovém svaru

ZM*	přechod na svar	na svar	přechod na svar	ZM*
416	390	400	391	401

422	376	398	409	416
424		409	403	423
424		411		425
427		414		416
420		416		421

\*základní materiál



Obr. 5.17 Průběh tvrdosti na kořenovém svaru

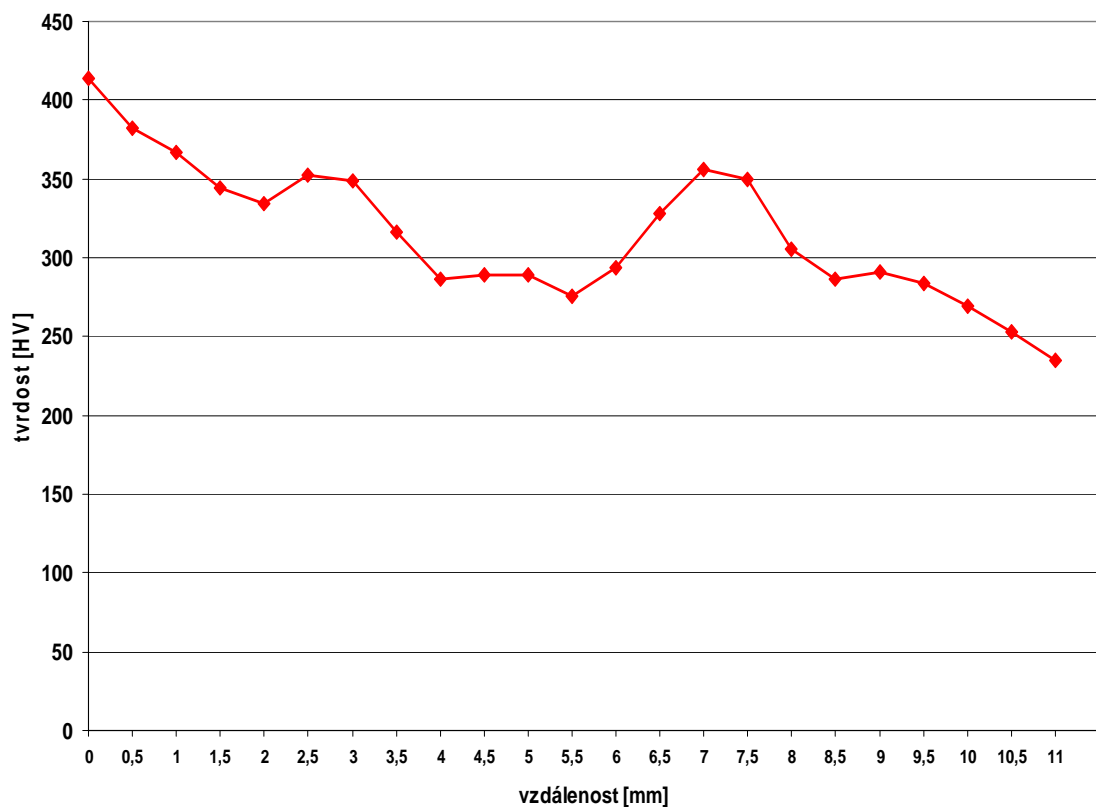
Podle naměřených hodnot lze usoudit, že hodnoty HV jsou v normě. Nižší hodnoty tvrdosti jsou v oblasti přechodu na svar.

Tab. 5.15 Naměřené hodnoty HV na krycím svaru

ZM*	přechod na svar	svar	přechod na svar	ZM*
414	349	286	276	356
382	316	289	294	350
367		289	328	305
344				286
334				291
352				284
				269
				253
				235

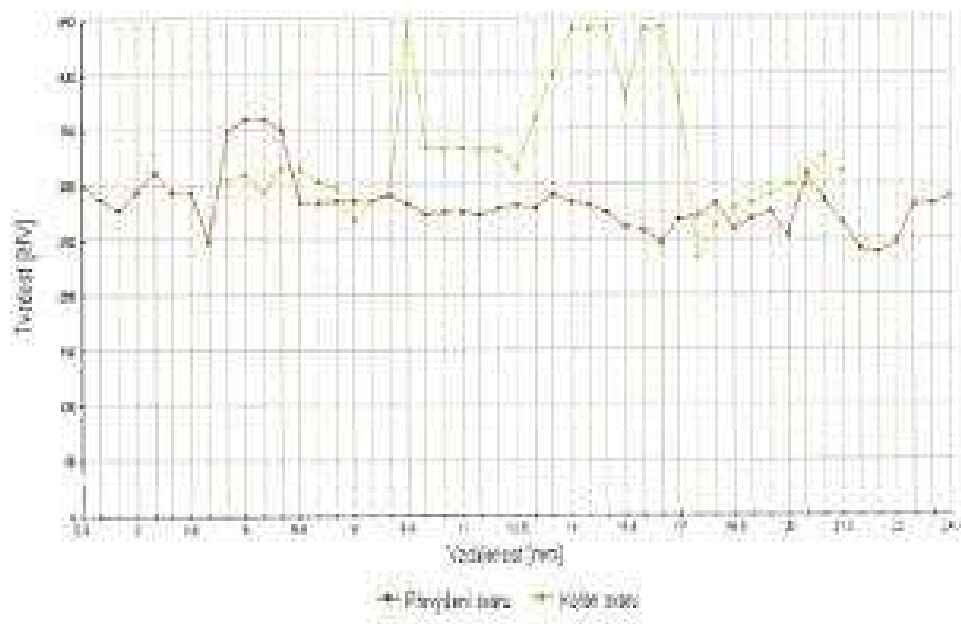
\*základní materiál

Hodnoty HV na krycím svaru více kolísají, může to být důsledkem póru či bublin ve svaru.

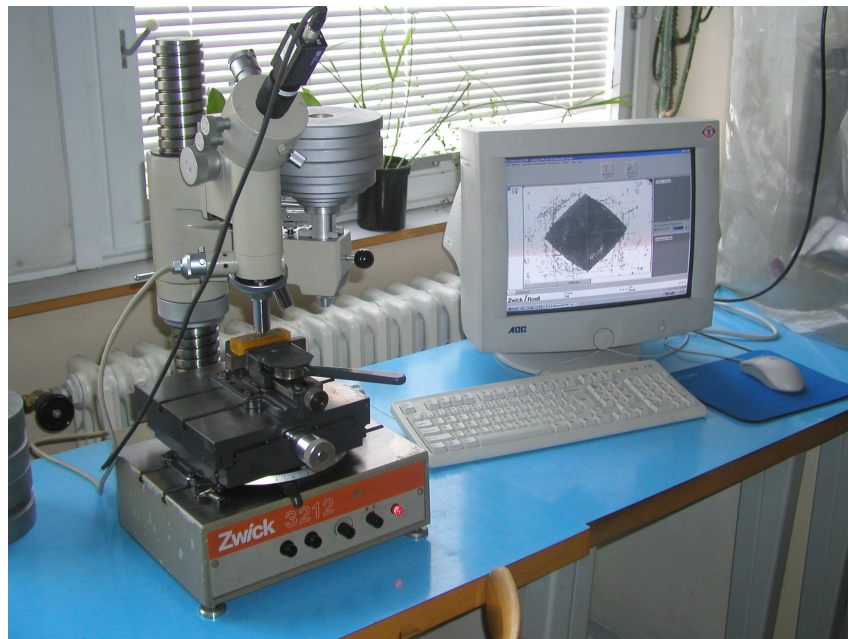


Obr. 5.18 Průběh tvrdosti na krycí housence

Na obr. 5.19 jsou znázorněny průběhy tvrdosti získané ze zkoušky tvrdosti svarů svařovaných jedním drátem. Z grafů lze usoudit, že na kořenovém svaru tvrdost více kolísá a to při přechodu do svaru a do základního materiálu.



Obr. 5.19 Průběhy tvrdosti<sup>14</sup>



Obr.5.20 Tvrdoměr ZWIK 3212

#### **5.2.4 Mikrostruktury svarového spoje**

Při odběru vzorků na metalografický výbrus nesmí dojít ke změně struktury (deformace, ohřev), proto byly vzorky odebrány mechanickým řezáním a broušením. Vzorky pro hodnocení mikrostruktury se brousí za mokra pod vodou, což dovoluje vyšší rychlost pohybu brusného papíru. Dále se vzorek leptá 2% nitalem (kyselina dusičná+líh). Leptáním se zviditelní mikrostruktura materiálu. Leptá se kratší dobu a několikrát. Poté se opláchne (voda+alkohol) a suší proudem vzduchu. Na obrázku 5.21 je základní materiál ve zvětšení 50x a na obr. 5.22 ve zvětšení 500x.

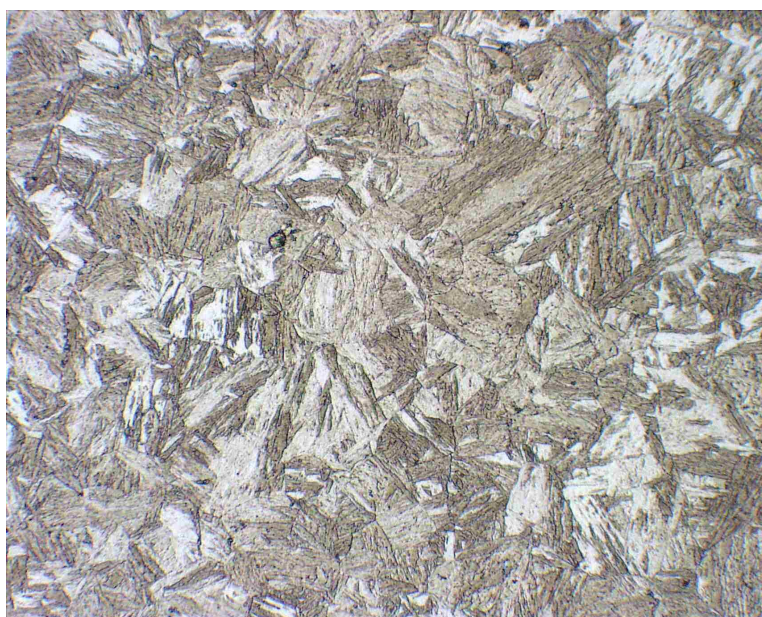
Základní materiál je tvořen nízkouhlíkovým martenzitem a ostrůvky acikulárního feritu v poměru cca 60/40. Struktura je velmi jemnozrná a odpovídá vysokopenostní oceli typu Q – kalení a popouštění po válcování.

Na obr. 5.23 a 5.24 je znázorněn přechod svarového kovu do základního materiálu, který je bez defektů s jen nevýrazným růstem zrna v tepelně ovlivněné oblasti ZM (větší plochy feritu a martenzitu jen v těsné blízkosti hranice ztavení - při 50x zvětšení).

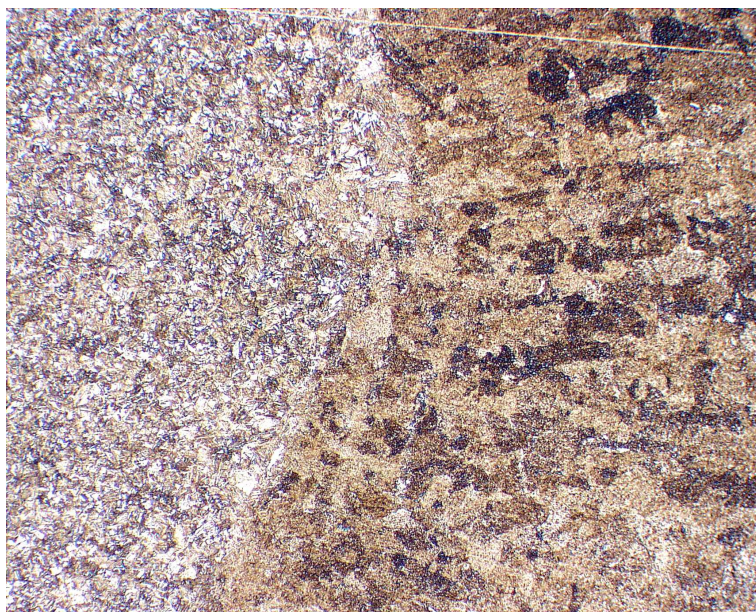
Obrázek 5.25 definuje přechod kořenové a krycí housenky, kde je vidět částečné tepelné ovlivnění kořene svaru. Obrázek 5.26 dokladuje strukturu svarového kovu tvořenou jemnozrným bainitem, jehlicemi martenzitu a ostrůvky jehlicovitého feritu.



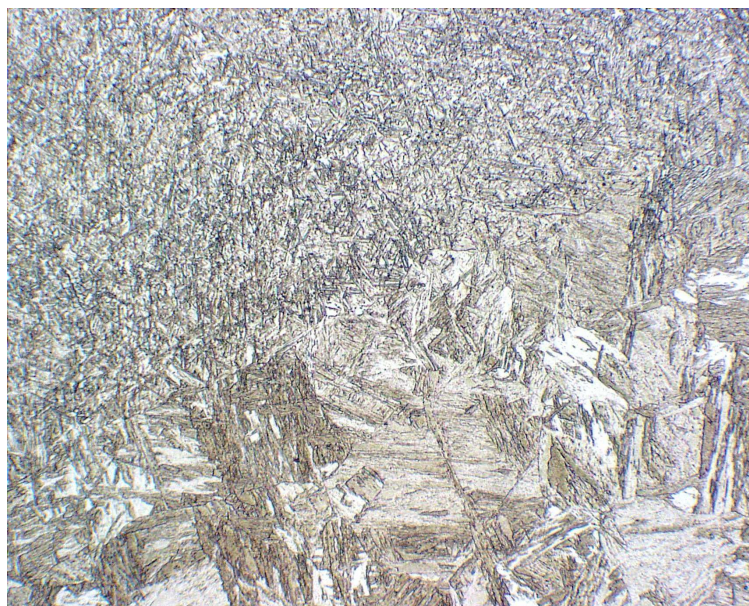
Obr.5.21 Základní materiál, zvětšeno 50x



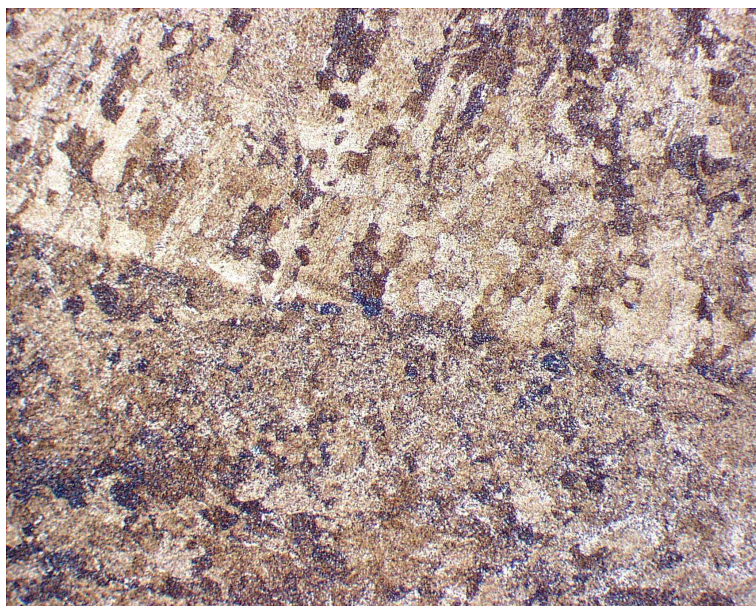
Obr.5.22 Základní materiál, zvětšeno 500x



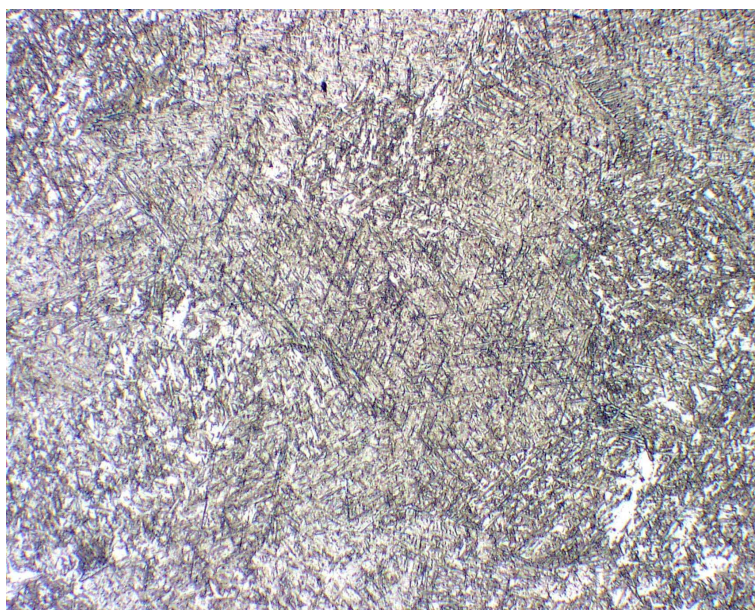
Obr.5.23 Přejchodová oblast kořene, zvětšeno 50x



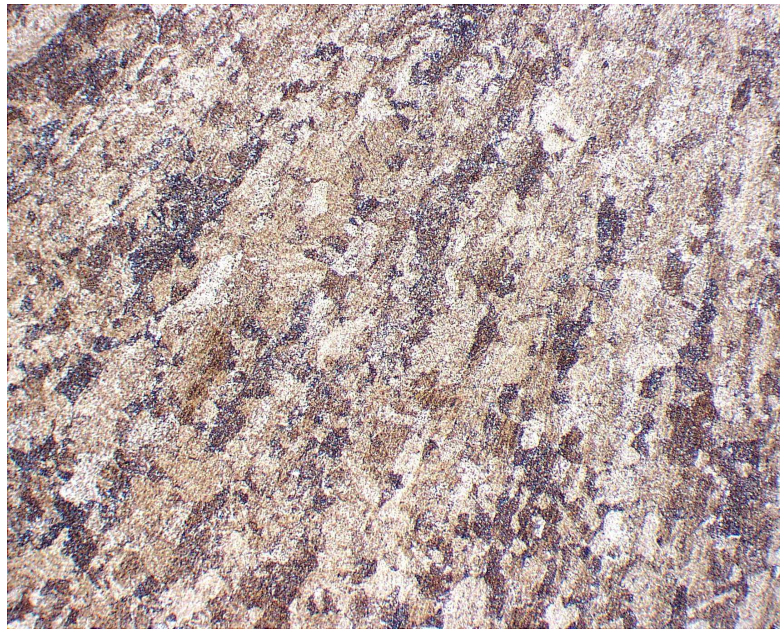
Obr.5.24 Přejchodová oblast svarového kovu kořene do základního materiálu. SK je nahoře, ZM dole , zvětšeno 500x



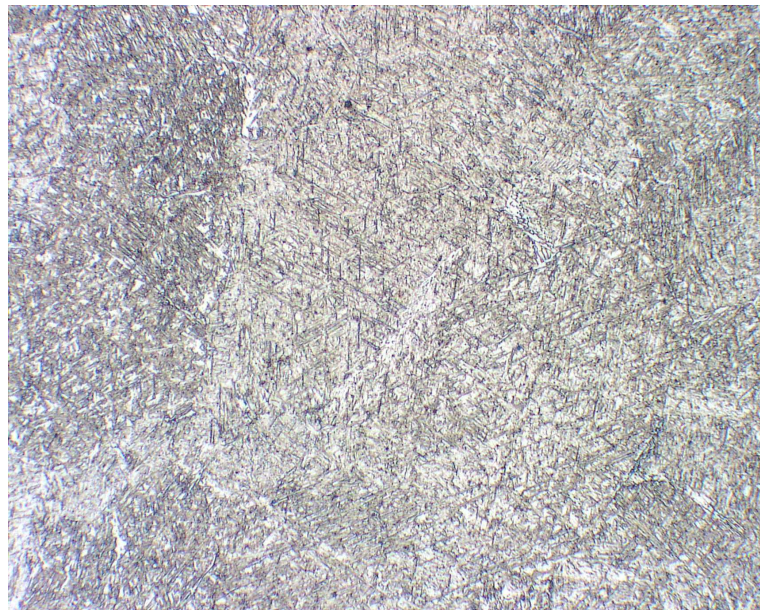
Obr.5.25 Přechodová oblast mezi housenkami, dole kořenová housenka  
nahore krycí housenka, zvětšeno 50x



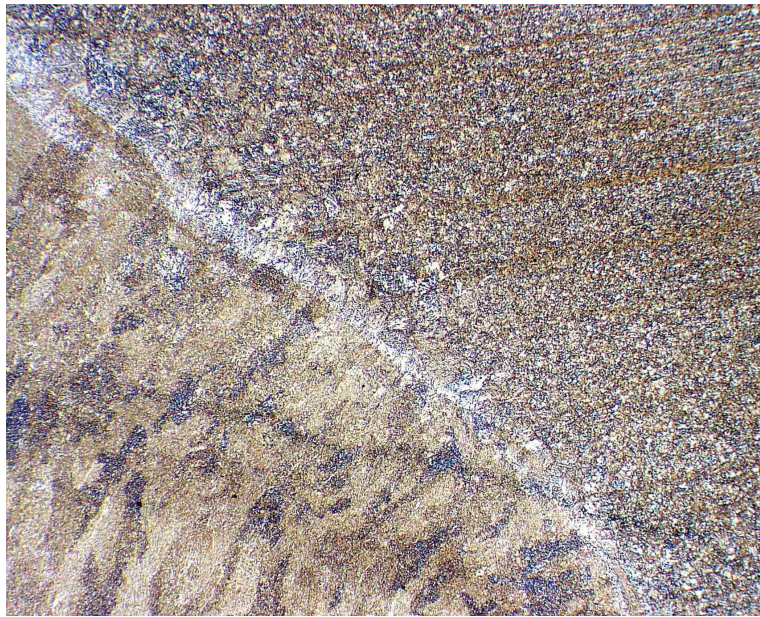
Obr.5.26 Svarový kov kořenové housenky, zvětšeno 500x



Obr.5.27 Svarový kov vrchní krycí housenky, zvětšeno 50x



Obr.5.28 Svarový kov vrchní krycí housenky, zvětšeno 500x



Obr.5.29 Přejchodová oblast mezi krycí housenkou a základním materiálem, zvětšeno 50x



Obr.5.30 Přejchod povrchu svarového kovu, do základního materiálu zvětšeno 50x

Svarový kov krycí housenky na obr.5.27 je charakteristický rozměrovými kolumnárními zrnými zřetelnými také na obr. 5.29 a na obr.5.30, kde je přechod do základního materiálu. Orientace zrn je rovnoměrně do středu svarového kovu.

Obr. 5.28 charakterizuje svarový kov krycí housenky při 500x zvětšení. Jsou zde opět bainitická zrna s jehlicemi martenzitu ohraničená malým množstvím feritu.

Celkově struktura odpovídá vysokopevnostnímu charakteru použitého přídatného materiálu s mezí kluzu nad 690 MPa.

Na obr.5.29 je na rozhraní svarového kovu a základního materiálu viditelné jehlicové vyloučení feritu dle mého přičina předčasných praskání zkoušek.

Díky velmi malému až kritickému vnesenému teplu je tepelné ovlivnění velmi malé a tomu odpovídá i vysoká tvrdost v celém průřezu svaru. Vysoká rychlost ochlazování vedla k transformaci strukturního složení o vysoké tvrdosti, a to bainitická a martenzitická fáze svarového kovu.

## 6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce je zhodnotit vlastnosti svarů při vysokovýkonných metodách svařování. Mezi tyto metody patří stále se vyvíjející metody, jako jsou kombinace s laserem, dále TimeTwinDigital, který se využívá pro svařování kolejových vozidel, stavbu lodí, v automobilovém průmyslu či pro stavbu nádrží.

Vysokopevnostní oceli se používají stále častěji. Největší uplatnění mají u ocelových staveb velkých rozměrů. Výhodou oproti klasické oceli je nižší hmotnost svařované konstrukce a zlepšení svařitelnosti. Ocel se nemusí předehřívat. Proto se tyto materiály používají tam, kde je nutné snížit hmotnost, z důvodu finančních nákladů na přepravu, i při zachování vysoké nosnosti a bezpečnosti.

Metodou TimeTwin Digital byly i svařeny zkušební vzorky ve firmě Fronius CS Jihlava. Svařován byl koutový svar z materiálu IMEX 700/DILLIMAX 690. Je to vysokopevnostní svařitelná jemnozrnná ocel, která se používá pro stavbu těžních zařízení, stavební stroje, jeřáby, vrat plavebních komor apod. Druhý vzorek je tupý svar.

Zkoušky na zjištění vlastností svarů byly provedeny na VUT v Brně. Byla provedena tahová a ohybová zkouška, dále zkouška tvrdosti a metalografické výbrusy. Z výbrusu byly vyfoceny mikrostruktury základního materiálu a svarového spoje.

Vlastní svařování probíhalo při extrémně nízkých hodnotách vneseného tepla 0,44 až 0,49 kJ.mm<sup>-1</sup>, které neumožnily vyžhání kořenové housenky, viz průběh měření tvrdosti. Při tahové zkoušce svary předčasně praskly, což lze přisoudit k vrubu na lící straně svarového spoje a vysoké tvrdosti martenzitické struktury. Průběh grafu z tahové zkoušky není proto konečný a nebylo dosaženo maximálních hodnot, které jsou uvedeny na deklarovaném listu (příloha 1). V experimentální části je porovnání vlastností svaru při tandemovém svařování a svařováním jedním drátem.

Pro získání optimálních výsledků doporučuji tandemové svařování zopakovat a to s menším rozevřením úkosu na 50° a použitím měděné podložky pro 100% zajištění provaření kořene bez nebezpečí provaření.

Specifikace postupu svařování je uvedena v příloze 2 – WPS.

V diplomové práci byla ověřena možnost využití dvoudrátové metody svařování vysokopevnostní oceli IMEX 700/DILLIMAX 690.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1.vyd. Ostrava : Zeross –svářečské nakladatelství. 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.

2. KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*. 1.vyd. Ostrava: Zeross –svářečské nakladatelství. 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.

3. KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. 1.vyd. Ostrava : Zeross – svářečské nakladatelství. 2000. 214s. ISBN 80-85771-72-5.

4. TRESOVÁ, V. *Zhodnocení nových technologií svařování MIG/MAG*. Bakalářská práce. Brno: FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie. 2005. 58 s.

5. FRONIUS. Česká republika. *Synergické efekty nové technologie*. [online] [cit. 15.2.2008]. Dostupné na www: <[http://www3.fronius.com/worldwide/ceska.republika/synergie\\_effekte.pdf](http://www3.fronius.com/worldwide/ceska.republika/synergie_effekte.pdf) >.

6.FRONIUS. Česká republika. *Cold Metal Trasfer*. [online] [cit. 15.2.2008]. Dostupné na www: <<http://www3.fronius.com/worldwide/ceska.republika/cmt.pdf> >

7. FRONIUS. Česká republika. *Vysokovýkonové svařování*. [online] [cit. 15.2.2008]. Dostupné na www: <[http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-0AFF0106-93228745/fronius\\_international/4000062140\\_weld\\_vision\\_Nr10\\_cz.pdf](http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-0AFF0106-93228745/fronius_international/4000062140_weld_vision_Nr10_cz.pdf) >.

8. DVOŘÁK, M. *Technologie II*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2004. 238 s. ISBN 80-214-2683-7.

9. KONSTRUKCE. Česká republika. *Heterogenní svarový spoj provedený metodou laser-hybrid*. [online] [cit. 20.3.2008]. Dostupné na www: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/913-heterogenni-svarovy-spoj-provedeny-metodou-laser-hybrid>>.

10. LEGA-INOX. Česká republika. *IMEX 700/DILLIMAX 690*. Firemní materiály a podklady.

11. MEDUNA, M. Česká republika. *Time Twin Digital*. [prezentace v powerpointu]. 2007.

12. GAMA OCEL. Česká republika. *Otěruvzdorné plechy WELDOX a vysokopevné plechy HARDOX*. [online] [cit. 20.3.2008] Dostupné na [www:<http://www.gamaocel.cz/4863/svarovani/>](http://www.gamaocel.cz/4863/svarovani/).

13. CVUT.CZ. *Vady svarových spojů*. [online] [cit. 15.2.2008]. Dostupné na [www: <http://u12123.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def\\_kontrola\\_sv.pdf>](http://u12123.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf).

14. GRYC, R. *Hodnocení svařitelnosti nových typů vysokopevnostních ocelí*. Diplomová práce. Brno: FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie. 2007. 76 s.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

<b>Zkratka/Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
CE	-	uhlíkový ekvivalent
$l_0$	mm	délka zkušebního vzorku
$v_s$	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	svařovací rychlost
a	mm	délka
b	mm	šířka
$S_0$	$\text{mm}^2$	plocha průřezu
Fm	N	zatěžovací síla
Rp2	Mpa	smluvní mez kluzu
Rm	Mpa	mez kluzu
A	%	tažnost
$\eta$	%	tepelná účinnost přenosu tepla do materiálu

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 Deklarační list

Příloha 2 WPS