



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV SVAŘOVACÍCH PARAMETRŮ NA KVALITU A MECHANICKÉ VLASTNOSTI SVAROVÉHO SPOJE

THE INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON THE QUALITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF
THE WELD JOINT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Vlach

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Jan Vlach
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jaroslav Kubíček
Akademický rok:	2018/19

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

Vliv svařovacích parametrů na kvalitu a mechanické vlastnosti svarového spoje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá svařováním uhlíkové oceli C60E (1.1221) bez použití předehřevu. Výrazný je vliv parametrů svařování na výsledný výskyt trhlin ve svaru a na jeho mechanické vlastnosti. Úkolem je nalezení optimálních podmínek svařování uhlíkových ocelí bez nutnosti předehřevu.

Cíle diplomové práce:

1. Literární studie problematiky uhlíkových ocelí a možných technologií svařování se zaměřením na ocel 1.1221 a metodu MAG
2. Návrh experimentální práce včetně podmínek svařování, jejich parametrů a metod hodnocení svarů
3. Provedení experimentu a hodnocení svarů
4. Vyhodnocení experimentální práce

Seznam doporučené literatury:

AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.

FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Věra OLŠANOVÁ, Ivo HLAVATÝ, Jaroslav KOUKAL, František KRISTOFORY, Vladislav OCHODEK, Václav PILOUS, Jaroslav PURMENSKÝ, Drahomír, SCHWARZ a Július VESELKO. Materiály a jejich svařitelnost. 2 vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.

ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1vyd. ETERNA PRESS s.r.o. Bratislava 2003, ISBN 80-968359-5-5.

OLSON D.L. a kolektiv autorů. ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6,; vyd. Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.

HRIVŇÁK, Ivan. Zváranie a zvariteľnosť materiálov. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. :il., čb. fot. ISBN 978-80-227-3167-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

VLACH JAN: Vliv svařovacích parametrů na kvalitu a mechanické vlastnosti svarového spoje

Diplomová práce se zabývá možností MAG svařování uhlíkové oceli 1.1221 (C60E) bez použití předehřevu. Zkoumá se vliv základních parametrů svařování na výsledné charakteristiky svaru s cílem dosáhnout spoj prostý defektů, aniž by byl aplikován předehřev.

Klíčová slova: Uhlíková ocel, svařování, MAG, C60E, podmínky svařování

ABSTRACT

VLACH JAN: The influence of welding parameters on the quality and mechanical properties of the weld joint

The Master's thesis focuses on the possibilities of using MAG welding on carbon steel 1.1221(C60E) without using preheating. It researches the effect of basic welding parameters on the final characteristics with the goal being to find a welding seam without defects, without using preheating.

Keywords: Carbon steel, Welding, Preheat, MAG, C60E, Welding parameters

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VLACH, Jan. *Vliv svařovacích parametrů na kvalitu a mechanické vlastnosti svarového spoje*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117331>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 21. 5. 2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví, za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále pak celé rodině za podporu při celé době mého studia.

OBSAH	
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	5
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 UHLÍKOVÉ OCELI	11
2.1 Základní rozdělení ocelí	11
2.2 Systémy značení ocelí	12
2.3 Výroba a tepelné zpracování uhlíkových ocelí	13
2.3.1 Tepelné zpracování uhlíkových ocelí	14
2.3.2 Vlastnosti uhlíkové oceli C60E (1.1221).....	15
2.4 Svařitelnost uhlíkových ocelí	16
2.5 Předehřev uhlíkových ocelí.....	17
3 SVAŘOVÁNÍ.....	19
3.1 Metody svařování.....	19
3.1.1 Ruční obloukové svařování	20
3.1.2 Obloukové svařování netavicí se wolframovou elektrodou TIG.....	21
3.1.3 Plasmové obloukové svařování	21
3.1.4 Svařování laserem.....	22
3.1.5 Svařování elektronovým paprskem	23
3.1.6 Svařování tavící se elektrodou v aktivním a inertním plynu MIG/MAG	24
3.2 Zkoušky svarových spojů.....	26
3.2.1 Nedestruktivní zkoušky svarových spojů	26
3.2.2 Destruktivní zkoušky svarových spojů	26
4 EXPERIMENTÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ OCELI C60E (1.1221).....	28
4.1 Návrh experimentální práce	28
4.1.1 Základní materiál C60E	28
4.1.2 Výběr svařovacích parametrů	29
4.1.3 Vzorky	29
4.1.4 Výběr svařovacího stroje a ochranného plynu.....	30
4.2 Realizace experimentální práce.....	32
4.2.1 Svařování drátem DMO-IG	33
4.2.2 Svařování drátem DCMS-IG	34
4.2.3 Svařování drátem X70-IG.....	35
4.3 Výsledky zkoušek svarových spojů	36
4.3.1 Zkoušky svarových spojů svařovaných drátem DMO-IG	39
4.3.2 Zkoušky svarových spojů svařovaných drátem DCMS-IG	46
4.3.3 Zkoušky svarových spojů svařovaných drátem X70-IG.....	52
4.4 Vyhodnocení experimentu	58
4.5 Diskuze výsledků	60
5 ZÁVĚRY.....	61
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	66
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	67

ÚVOD [1], [2]

Uhlíkové oceli mají uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu. Běžně se používají jako nástrojové oceli, které mají zaručenou mez pevnosti a mez kluzu. Používají se jako oceli na odlitky pro výrobu přírub, armatur či jiných odlitků. Jako oceli nástrojové mají široké využití ve výrobě zemědělských nástrojů, přírub, hřídelí, barelů i potrubí. Dalšími produkty z uhlíkových ocelí jsou komponenty pro mechaniku, části vstřikovacích strojů, páky, táhla, matice, šrouby, pružiny. Nízkouhlíkové i vysokouhlíkové oceli jsou dobrou volbou z hlediska nákladů pro použití tam, kde není problém korozní odolnost. Příklady použití uhlíkových ocelí můžete vidět na obr. 1.

Dnešní požadavky na konstrukci a vlastnosti svařovaných dílů i sestav, jsou čím dál tím větší a náročnější. Technologie svařování je rychle se rozvíjející technologií, která je uplatňována téměř v každé strojírenské výrobě. Výrobky tak musí splňovat požadavky na kvalitu a mechanické vlastnosti svařovaných dílů. Použitím vhodných technologií, správných postupů a dodržení podmínek pro svařování různých typů ocelí, lze vyhovět všem těmto požadavkům. Problematikou svařování uhlíkových ocelí je nutnost předehřevu aby se dosáhlo kvalitního svarového spoje bez trhlin a jiných defektů.

Proto je cílem této práce zkoumání vlivu svařovacích parametrů na výsledný stav a vlastnosti svarového spoje. Současně se práce zabývá možností nalezení takových podmínek svařování oceli 1.1221 (C60E), které umožní svařování této oceli bez použití předehřevu při zachování výsledné kvality svarového spoje.



Obr. 1 Použití uhlíkových ocelí [3], [4]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [1], [5]

Problematikou práce je svařování uhlíkové oceli 1.1221 (C60E) bez použití přehřevu za současného zachování výsledné kvality svarového spoje. Základním problémem při svařování této oceli je vysoký obsah uhlíku v oceli, který při svařovacím procesu zapříčiňuje zakalení struktury v tepelně ovlivněné oblasti, a tím může dojít ke vzniku trhlin. Ocel C60E patří mezi podmíněčně svařitelné oceli, jelikož má obsah uhlíku vyšší než 0, 25 hm. %, V tomto případě jsou normou ČSN EN 1011-2 předepsány teploty přehřevu okolo 275 až 425 °C. Motivem zkoumání této práce je prověření možnosti svařování uhlíkové oceli bez aplikace přehřevu podle platné normy

Pro svařování vybrané oceli se dají využít běžné metody svařování. V našem případě je zvolena oblouková metoda tavící se elektrody v aktivním plynu, dále jen MAG. Metoda byla zvolena z důvodu praktického použití v reálném podniku.

Pro experiment jsou vybrány svařovací parametry, které nejvíce ovlivňují svařovací proces. Zkoušením těchto svařovacích parametrů na připravených vzorcích se dosáhne rozdílných výsledných kvalit těchto vzorků. Práce stanoví závislosti mezi zkoušenými parametry MAG svařování oceli C60E (při absenci přehřevu) a výslednou charakteristiku svarového spoje.

2 UHLÍKOVÉ OCELI [1], [6], [7], [8], [9]

Současná celosvětová výroba oceli překračuje miliardu tun oceli na rok. Největším producentem oceli je Čína, která vyprodukuje přes 820 milionů tun oceli, což je necelá polovina veškeré produkce oceli na světě. Dalšími velkými producenty oceli jsou Japonsko, Indie, USA, Rusko a mezi tradiční výrobce patří i Česká republika. Slitiny železa jsou snadno recyklovatelné a mohou být dále použity pro opětovnou výrobu. Produkce ocelí má stále velké uplatnění v automobilovém, leteckém, potravinářském i stavebním průmyslu, trendem dnešní doby je ovšem nahrazovat oceli v některých aplikacích lehčími slitinami hliníku, plasty atd.

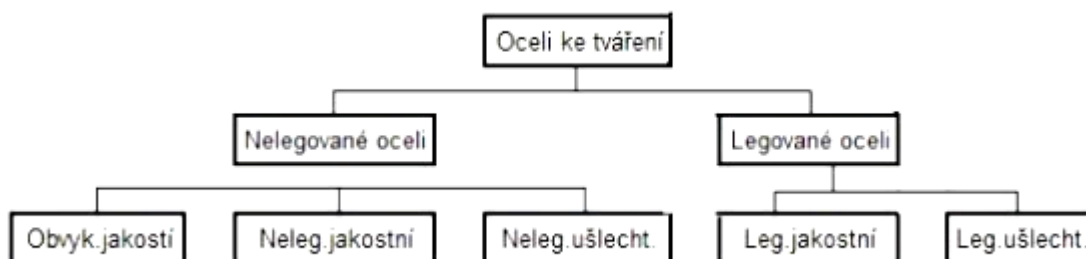
Za uhlíkovou ocel (obr. 2) se považuje slitina železa a uhlíku do obsahu uhlíku 2,1 hm. % a není stanoven minimální obsah legujících prvků. Skupina uhlíkových ocelí patří do slitin kovů, které se v dnešní době využívají jako technické kovové materiály v mnoha odvětvích průmyslu jako oceli ke tváření i oceli na odlitky.



Obr. 2 Polotovary z uhlíkové oceli

2.1 Základní rozdělení ocelí [6]

Základním rozdělením slitin železa je rozdělení na oceli a litiny. Následující rozdělení ocelí je na oceli ke tváření (obr. 3) a oceli na odlitky. Oceli ke tváření zaujímají většinu výroby zpracování ocelí, oceli na odlitky jsou méně využívanou skupinou materiálů, jelikož ve světovém měřítku se na výrobu odlitků používají převážně litiny.



Obr. 3 Rozdělení ocelí ke tváření[6]

Platnou českou normou, která rozděluje oceli ke tváření dle chemického složení je ČSN EN 10020 (obr. 2). Norma udává rozdělení nelegovaných a legovaných ocelí. Nelegované oceli se rozdělují do tří a legované do dvou hlavních skupin. Určujícím faktorem rozdělení mezi nelegované a legované oceli jsou mezní obsahy jednotlivých prvků uvedených v tab. 1.

Tab. 1 Obsah legujících prvků [6]

Prvek		hm. %	Prvek		hm. %	Prvek		hm. %	Prvek		hm. %
Al	hliník	0,10	Cu	měď	0,40	Ni	nikl	0,30	Ti	titan	0,05
B	bór	0,0008	La	Lanthanidy	0,05	Pb	olovo	0,40	V	vanad	0,10
Bi	bismut	0,10	Mn	Mangan	1,65	Se	selenium	0,10	W	wolfram	0,10
Co	kobalt	0,10	Mo	Molybden	0,08	Si	křemík	0,50	Zr	zirkon	0,05
Cr	chrom	0,30	Nb	Niob	0,06	Te	telur	0,10	-	ostatní	0,05

- **Nelegované oceli**
 - a) Oceli obvyklých jakostí
 - b) Nelegované jakostní oceli
 - c) Nelegované ušlechtilé oceli
- **Legované oceli**
 - a) Legované jakostní oceli
 - b) Legované ušlechtilé oceli

Běžné uhlíkové oceli se řadí mezi nelegované ocele k zušlechťování, které se dodávají do výroby většinou již v normalizovaném stavu nebo ve stavu tepelně zpracovaném. Evropská norma EN 10083 specifikuje rozdělení ocelí k zušlechťování a také udává požadavky na mechanické vlastnosti a chemické složení. Běžně se uhlíkové oceli dále dělí podle obsahu uhlíku do čtyř skupin, které jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Rozdělení uhlíkových ocelí [11], [12]

Třída	hm. % C
Nízkouhlíkové oceli	do 0,30
Středně uhlíkové oceli	0,3- 0,6
Vysoko uhlíkové oceli	0,6- 1,0
Velmi vysoko uhlíkové oceli	1,0- 2,1

2.2 Systémy značení ocelí [1], [6], [10]

Ve značení ocelí se v současné době setkáváme s problémy označení ekvivalentů ocelí mezi normami či obchodními názvy. Značení ocelí je dáno světovými, evropskými či národními normami. V České republice v minulosti značení ocelí ukládala česká národní norma ČSN 42 0002, která byla ovšem nahrazena evropskými normami ČSN EN 10 0027-1 a ČSN EN 10 0027-2. Dalšími národními normami pro značení ocelí jsou např. německá norma DIN a americká AISI.

Oceli se rozdělují dle evropské normy EN 10027 na dva systémy a to EN 10027-1, podle kterého se oceli značí zkráceně a EN 100027-2 s číselným označením. Evropská norma ČSN EN 10083-2 specifikuje uhlíkové oceli k zušlechťování. Stále se můžeme setkat se starým označením dle původní normy ČSN a podle toho se rozdělují uhlíkové oceli ke tváření do třídy 10, 11 a 12 a nelegované oceli na odlitky řady 42 26xx. Značení pro námi zvolenou uhlíkovou ocel C60E dle výše uvedených norem, jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Ekvivalentní značení ocelí [10]

ČSN EN 10027-1	ČSN EN 10027-2	DIN	AISI	ČSN 420002
C60E	1.1221	Ck60	1060	12061

2.3 Výroba a tepelné zpracování uhlíkových ocelí [6], [13], [14], [16], [37]

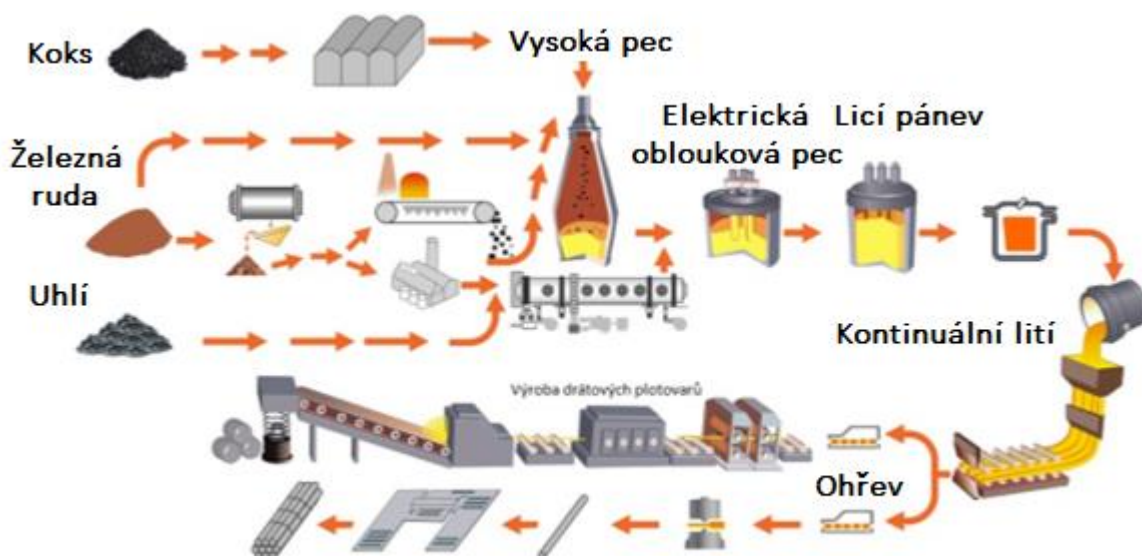
Každý rok se ve světě vyrobí více než miliarda tun oceli. Samostatnou výrobu oceli můžeme rozdělit podle několika základních fází. Výroba začíná zpracováním surové železné rudy ve vysoké peci (obr. 4). Tavením vsázky, která se skládá z železné rudy, ocelového šrotu, koksu a dalších přísad. K základním kovům se při výrobě vážou další přídavné materiály, které jsou přítomny jako nečistoty, některé skupiny zhoršují vlastnosti technických slitin a některé naopak vylepšují.

Dalším krokem je výroba oceli ze surového železa. V první fázi se recyklovaná ocel či surové železo zpracovávají v elektrických obloukových pecích a kyslíkových konvertorech, kde se taví kov až při 1650 °C. V současnosti se zhruba dvě třetiny výroby oceli odehrávají hlavně v kyslíkových konvertorech, obloukové pece se používají především na výrobu vysokolegovaných ocelí. V této fázi se snižuje obsah uhlíku, fosforu a síry a oxidací se odstraňují nežádoucí prvky. Následuje fáze rafinace a to je odkysličování oceli pomocí feroslitin manganu, křemíku či slitin hliníku. V poslední fázi dochází k odsiřování oceli.



Obr. 4 Vysoká pec [14]

Ocel je dále přepravována v licích pánvích a následně odlévána do ingotů, které se následně zpracovávají do požadovaných tvarů. V modernějších ocelárnách je však používáno tzv. kontilití, které je méně energeticky náročné a rychlejší než tradiční odlévání do ingotů, jsou ovšem nadále používány hlavně při odlévání výkovek velkých rozměrů. Schéma výroby oceli od samotného začátku až po výrobu polotovárů je znázorněno na obr. 5.



Obr. 5 Schéma výroby oceli [19]

Ocel se dále zpracovává tvářením za tepla (obr. 6), tvářením za studena a tvářením za částečného ohřevu. Tvářením za studena probíhá pod teplotou rekrytalizace, dochází k deformaci zrn materiálu a dojde tak k jeho zpevnění, za současného snížení tažnosti. Tvářením za tepla probíhá nad teplotou rekrytalizace. Ke tvářením tak potřebujeme menší tvářecí síly, ale vzniká nekvalitní povrch plný okují a může dojít k zhrubnutí zrna, což dále ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Tvářením za částečného ohřevu je kompromis mezi tvářením za tepla a za studena. Výška teploty nedosahuje teploty rekrytalizace. Dochází tak k deformačnímu zpevnění materiálu při menších hodnotách přetvárných odporů.

Metody tvářením polotovarů lze rozdělit nadále dle působení vnějších sil na objemové a plošné. Mezi objemové tvářením patří kování, protlačování, tažení, válcování a mezi metody plošné pak ohýbání nebo střihání.



Obr. 6 Válcování svitku plechu za tepla [14]

2.3.1 Tepelné zpracování uhlíkových ocelí [6], [16], [18]

Uhlíkové oceli se velmi často používají ve stavu tepelně zpracovaném. Klíčovým parametrem je obsah uhlíku, který udává schopnost oceli k dalšímu zpracování. Současně, předchozí tvářením má vliv na velikost zrna a ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti oceli.

Tepelné zpracování (dále jen TZ) uhlíkových ocelí lze rozdělit na žíhání, kalení a popouštění.

- Žíhání je tepelné zpracování, při kterém se uhlíková ocel nahřívá na danou teplotu, následuje výdrž na této teplotě (prodleva) a následné pomalé ochlazování na vzduchu nebo v peci, s cílem dosažení stabilní struktury. Podle probíhajících přeměn se žíhací procesy dělí na:
 - Žíhání s překrytalizací se provádí pro zajištění rovnoměrné struktury oceli a větší homogenity chemického složení. Probíhá při teplotách nad A_{c1}/A_{c3} a dochází k přeměně výchozí feriticko-perlitické struktury na austenit. Mezi základní žíhací zpracování oceli patří i) homogenizační žíhání pro dosažení stejnorodé struktury; ii) izotermické žíhání pro zlepšení obrobitelnosti a iii) normalizační žíhání, které se u uhlíkových ocelí uplatňuje nejčastěji. Normalizační žíhání spočívá v náhřevu mírně nad teplotu A_{c1}/A_{c3} s dostatečnou prodlevou pro vytvoření rovnoměrného jemného austenitického zrna v plném objemu zpracovávané uhlíkové oceli. Pozvolným chladnutím se vytvoří výsledná jemnozrná struktura feritu a perlitu, s velmi dobrým poměrem pevnosti, houževnatosti a s minimálním podílem vnitřních pnutí.
 - Žíhání bez překrytalizace se provádí pod teplotou austenitické přeměny. Nepochází u zpracovávané oceli k fázovým přeměnám. Výsledná změna struktury je dána procesy rekrytalizace, zotavení, koagulace apod. Základním zpracováním

je i) žíhání na snížení pnutí, ii) žíhání rekrystalizační a iii) u uhlíkových oceli často používané žíhání na měkko. Žíhání na měkko je způsob TZ bez překrytí, kdy aplikovaná teplota 650 – 720°C (pod Ac1) způsobuje sbalování perlitických lamel. Výsledný zrnitý perlit pak nabízí uhlíkovým ocelím výbornou obrobitelnost při ztrátě pevnosti.

- **Kalení** je tepelné zpracování, při kterém se polotovary ohřívají 30°C až 50 °C nad austenitizační teplotu pro podeutektoidní oceli nad Ac3 a pro nadeutektoidní nad Ac1. Při výdrži na austenitizační teplotě dojde k rozpuštění feritu a perlitu. Následným ochlazením rychlostí větší než kritickou dochází ke vzniku metastabilních struktur (martenzit a bainit). Po dosažení nerovnovážného stavu se hodnotí zakalitelnost (nejvyšší dosažená tvrdost) a prokalitelnost oceli (schopnost oceli dosáhnout nejvyšší dosažitelné tvrdosti v určité hloubce pod povrchem). Základním způsobem kalení je kalení i) přerušované, ii) se zmrazováním, iii) termální, iv) izotermické, iiv) martenzitické, které se používá nejběžněji. U uhlíkových ocelí se při martenzitickém kalení používá jako kalící médium nejčastěji voda z důvodu vysokých kritických rychlostí. Po správném zakalení ocel dosáhne vysoké tvrdosti, dobré pevnosti a odolnosti proti opotřebení. Nevýhodou je nízká houževnatost a vysoká citlivost vůči rázům, zejména při nízkých teplotách.
- **Popouštění** je tepelné zpracování, pod teplotou austenitizace, které je aplikováno pro snížení vnitřních pnutí, co nejdříve po zakalení. Toto komplexní TZ (kalení a popouštění) se nazývá zušlechťování. V praxi se rozlišují dva základní způsoby popouštění dle výšky popouštěcí teploty i) popouštění za nízkých teplot se provádí při teplotách 100 až 300 °C dochází ke snížení vnitřních pnutí, snížení podílu zbytkového austenitu a zlepšení houževnatosti se současným zachováním tvrdosti, ii) popouštění za vysokých teplot okolo 400 až 650 °C, umožňuje omezenou difuzi uhlíku a přeměnu martenzitu na strukturu jemných disperzních karbidů ve feritu (sorbit), Tato struktura propůjčuje uhlíkovým ocelím optimální mechanické vlastnosti s vyváženým poměrem pevnosti a houževnatosti.

2.3.2 Vlastnosti uhlíkové oceli C60E (1.1221) [10], [20]

Ocel C60E (1.1221) je nelegovaná ušlechtilá pro zušlechťování. Běžně je dodávána ve stavu žíhaném nebo normalizovaném Ocel C60E má dáno i chemické složení dle normy EN 10083 (tab. 4), které udává minimální a maximální povolené hm. % prvků v mikrostruktuře oceli. Povolené chemické složení má velký vliv na výsledné mechanické vlastnosti oceli. Obecný přehled mechanických vlastností je uveden v tab. 5. V tab. 6 je uveden přehled doporučeného tepelného zpracování pro ocel C60E

Tab. 4 Chemické složení oceli C60E dle ČSN EN 10083 [10]

Chemické složení dle ČSN EN 10083 [hm. %]							
C	Mn	S	Si	P	Ni	Mo	Cr
0,57-0,65	0,6-0,9	0-0,04	0-0,4	0-0,04	0-0,4	0-0,1	0-0,4

Tab. 5 Přehled mechanických vlastností oceli C60E [10]

Značka	Stav	Re min. [MPa]	Rm min. [MPa]	A min. [%]	Z min. [%]
C60E/ 1.1221	Zušlechtěný	580	850-1000	11	25
	Normalizovaný	380	430	24	-

Tab. 6 Přehled tepelného zpracování oceli C60E [10]

Tepelné zpracování	Normalizační žihání [°C]	Žihání naměkko [°C]	Kalení [°C]	Kalici prostředí	Popouštění [°C]
	820-860	600-680	800-840	Olej nebo voda	550-660

Ve vyžíhaném a normalizovaném stavu má ocel nízkou pevnost v tahu, ale dobrou tažnost. Ve srovnání s ocelí v zakaleném stavu, která má vysokou pevnost a tvrdost na povrchu. Ocel je tedy dobře obrobitelná ve stavu vyžíhaném naměkko. Tvrdost ve vyžíhaném stavu se pohybuje okolo 240 HB a tvrdost po zakalení jsou určeny křivkami prokalitelnosti a popouštěcími křivkami.

2.4 Svařitelnost uhlíkových ocelí [1], [5], [21]

Průběh svařování uhlíkových ocelí je ovlivněno chemickým složením a zejména obsahem uhlíku v mikrostruktuře oceli. Obsah uhlíku je zásadní faktor pro určení svařitelnosti nelegovaných ocelí. Oceli s obsahem uhlíku $C < 0,25$ hm. %, je možné svařovat bez zvláštních opatření.

Vliv chemického složení na svařitelnost ocelí se vyjadřuje tzv. uhlíkovým ekvivalentem C_e . Ten posuzuje vliv jednotlivých prvků na strukturu a náchylnost k zakalení. Mohou tak vznikat nežádoucí struktury jako spodní bainit a martenzit, čím hůře je ocel svařitelná. Uhlíkový ekvivalent tedy slouží i jako ukazatel svařitelnosti. Pro jeho výpočet bylo sestaveno několik vztahů.

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024s \quad [\%] \quad (1.1)$$

kde: s je tloušťka plechu [mm]

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (1.2)$$

$$C_{ET} = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\%] \quad (1.3)$$

Vzorec 1.1 se běžně používá pro výpočet uhlíkového ekvivalentu a zahrnuje i vliv tloušťky materiálu. Vztah 1.2 byl navržen mezinárodním svářečským institutem pro ocele s $C > 0,18$ hm. %. Vztah 1.3 zohledňuje především obsah a v praxi se používá pro výpočet přehřevu dle metody B udané normou ČSN EN 1011-2.

Dalším opatřením je i vhodná konstrukce svařovaných dílů a technologický postup svařování. Postup a konstrukce by měli být navrženy tak, aby vnesené teplo při svařování bylo rovnoměrně rozprostřeno po konstrukci a aby některé části nebyly tepelně ovlivněny více než druhé. Materiál by již před svařováním měl být v uklidněném stavu, při opaku může

dojít k deformacím, jako jsou póry a trhliny ve svaru. Vhodnou volbou přídavných materiálů určíme, jaké bude mít výsledný svar mechanické vlastnosti. Při svařování materiálů velkých tloušťek je nebezpečí vnitřního prnutí, materiál se dodatečně vyžihá ke snížení vnitřního prnutí.

2.5 Předehřev uhlíkových ocelí [1], [5]

V těchto ocelích je obsah obvykle $C > 0,25$ hm%, což pro uhlíkové ocele znamená, že patří mezi podmíněně svařitelné oceli. Pokud tedy chceme zajistit kvalitní svařový spoj bez defektů trhlín a s požadovanými vlastnostmi, musíme dodržet určitá opatření.

Při svařování uhlíkových ocelí se doporučuje určitá teplota předehřevu. Předehřev způsobí, že svařový spoj se ochlazuje pomaleji a nedojde tak k zakalení a přeměně na nežádoucí struktury v TOO. Riziko zakalení struktury se zvyšuje s obsahem uhlíku (obr. 7). Tvrdost se zvyšuje s obsahem martenzitu, který se vyskytuje v tepelně ovlivněné oblasti. Stejný vliv má i zvolení většího příkonu stroje při sváření, během svařovacího procesu se do kovu vnese větší teplo a svařenec se poté rychleji ochlazuje. Vliv teploty ochlazování na strukturu svaru určují tzv. diagramy ARA „in situ“, které jsou konstruovány přímo pro dané podmínky svařování. Diagramy slouží k určení struktur v základním materiálu při teplotách ochlazování.

K řízení ochlazování materiálu je nutno využít předehřevu. V případě uhlíkových ocelí lze běžně využít starší výpočet teploty předehřevu dle Séferiána.

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \quad [^\circ\text{C}] \quad (1.3)$$

kde: T_p je teplota předehřevu

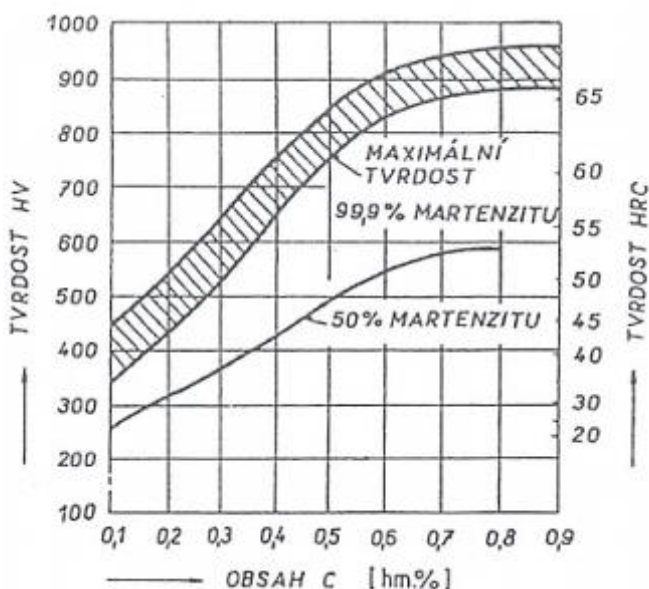
$$C_p = C_c + C_s \quad (1.4)$$

$$C_c = \frac{360C + 40(Mn + Cr) + 20Ni + 28Mo}{360} \quad [^\circ\text{C}] \quad (1.5)$$

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c \quad (1.6)$$

Norma ČSN EN 1011-2 udává výpočet teploty předehřevu pro nelegované, nízkolegované a jemnozrnné oceli metodami A a B.

- Metoda A je využívána pro uhlíkovo-manganové typy ocelí. Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu CE je použit vzorec 1.2. Norma specifikuje další kroky ke stanovení T_p z diagramů pro definované uhlíkové ekvivalenty pomocí zjištěného stupně obsahu



Obr. 7 Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku způsobená přítomností martenzitu [1]

vodíku, stanovené kombinované tloušťky v mm a tepelného příkonu v kJ/mm. Tyto hodnoty se určují z příslušných tabulek uvedených v normě ČSN EN 1011-2

- Metoda B je využívána pro výpočet teploty předehřevu pro nízkolegované vysokopevnostní ocele. Chemické složení oceli a jeho vliv na studené praskání je vystiženo pomocí výpočtu uhlíkového ekvivalentu CET dle vzorce 1.3. Teplota předehřevu T_p se vypočte dle vzorce 1.7. Teplota předehřevu je součet teplot předehřevu v závislosti na uhlíkovém ekvivalentu CET (T_{pCET}), na tloušťce plechu d v mm (T_{pD}), na obsahu vodíku HD ve svarovém kovu (T_{pHD}), na tepelném příkonu Q (T_{pQ}). Tepelný příkon se vypočte pomocí vztahu 1.12, kdy je zapotřebí znát svařovací proud I v A, svařovací napětí U ve V, rychlost svařování v mm/s a koeficient k , který určuje tepelnou účinnost jednotlivých metod svařování.

$$T_p = T_{pCET} + T_{pD} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.7)$$

$$T_{pCET} = 750 \cdot \text{CET} - 150 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.8)$$

$$T_{pD} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.9)$$

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.10)$$

$$T_{pQ} = (53 \cdot \text{CET} - 32) \cdot Q - 53 \cdot \text{CET} + 32 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1.11)$$

$$Q = k \cdot \frac{(U \cdot I)}{v} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kJ}/\text{mm}] \quad (1.12)$$

3 SVAŘOVÁNÍ [1], [2]

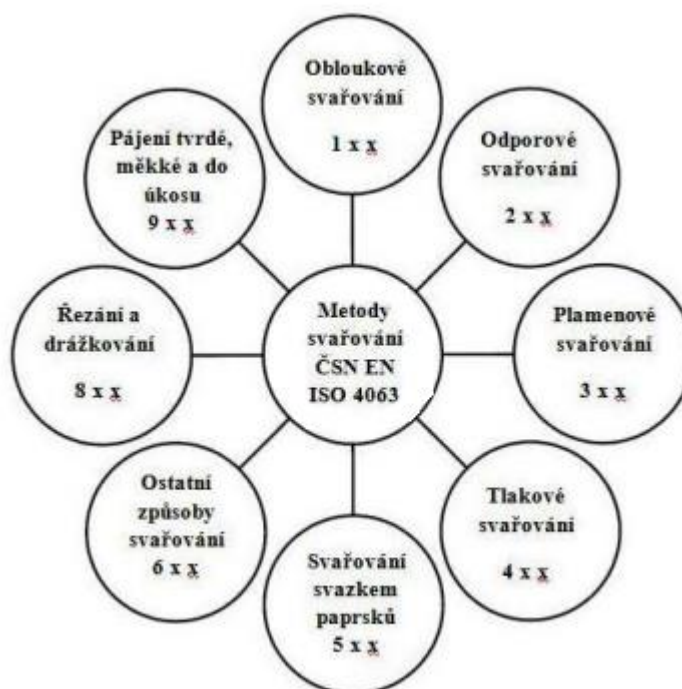
Svařování je rychle se vyvíjející technologií, která se uplatňuje téměř ve všech odvětvích průmyslu od strojírenského, potravinářského, chemického či stavebního. Základem technologie je vytvoření nerozebratelného spoje dvou materiálů. Princip spočívá na vytvoření meziatomární nebo mezimolekulární vazby a difuze materiálů v místě spoje. Svařovaným materiálem mohou být plasty, oceli či neželezné kovy. Na svařované konstrukce a jejich kvalitu se klade velký důraz. Je nutné, aby svarové spoje a tepelně ovlivněná oblast vyhovovaly mechanickým požadavkům, které jsou kladeny na finální produkt. Svařování je ve strojařské praxi vnímáno jako metoda spojování kovových součástí. Na výsledný svar se nahlíží jako na kritickou část výrobku, bývá označován jako metalurgický vrub

3.1 Metody svařování [1], [2], [22], [23]

Metody svařování se rozdělují podle normy ČSN EN ISO 4063 do tří základních kategorií:

- za působení tepla,
- za působení tepla a tlaku,
- za působení tlaku.

Dále se rozdělují a označují metody svařování podle jednotlivých principů technologií. Každá technologie je vhodná pro různou škálu materiálů, a tloušťky materiálů. Jsou dosahovány odlišné kvality a vlastnosti výsledného svarového spoje. Základní rozdělení a značení metod je uvedeno na obr. 8.



Obr. 8 Přehled základních metod svařování a jejich značení [24]

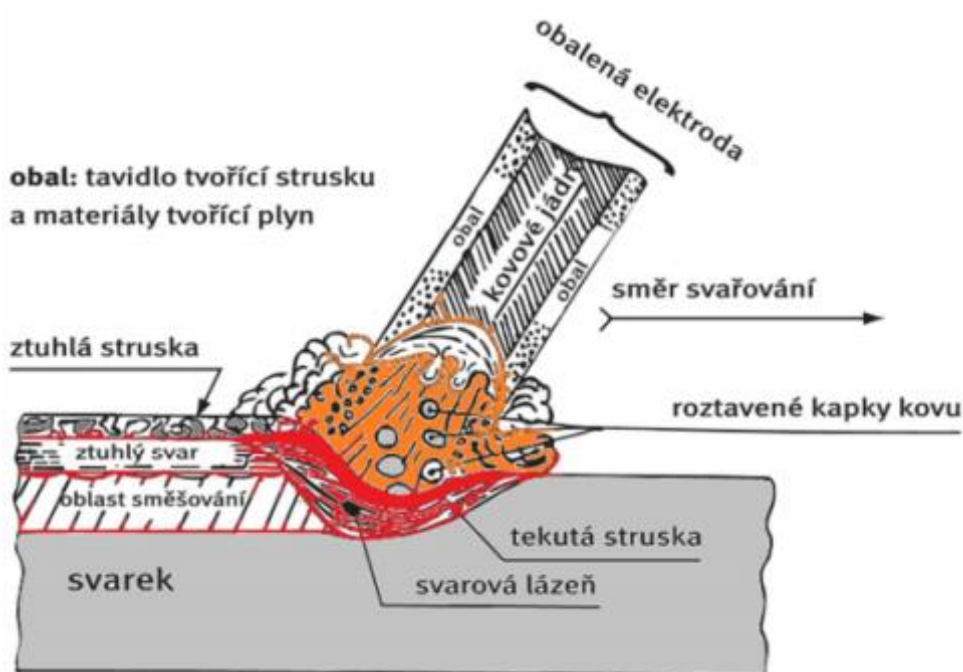
Uhlíkové oceli jsou vhodné pro svařování jakoukoli technologií při dodržení podmínek, které byly uvedeny v kapitole 2.5. Nejčastěji používané technologie svařování uhlíkových ocelí jsou metody obloukového svařování, které jsou využívány v běžné praxi ve strojírenských podnicích. Tyto metody jsou již také automatizovány a vývoj nových zařízení a přídavných materiálů umožňuje stále větší uplatnění. Aplikace technologií jako elektronový paprsek nebo laser, jsou využívány pro jejich vysokou produktivitu a účinnost v mnoha

odvětvích, laser je využíván v automobilovém průmyslu a odvětvích, kde se dá tato metoda dobře automatizovat. V následujících kapitolách byly vybrány metody svařování, které se používají, nebo by je bylo možné aplikovat ve výrobě v daném podniku.

3.1.1 Ruční obloukové svařování [22],[23]

Manuální metoda ručního svařování, která patří mezi jednoduché a flexibilní metody. Tato metoda využívá elektrody, která má kovové tělo a mezi ní a svařovaným materiálem vzniká elektrický oblouk. Elektrický oblouk, který vznikne od konce elektrody, taví základní materiál a elektrodu. Materiál elektrody se tak roztaví a ve formě kapek se pod ochranným plynem přenese do svarové lázně (obr. 9)

Proces ručního svařování není náročný na vybavení a podmínky, které musí být dodrženy, ale kvalita svarového spoje velmi záleží na zkušenosti a dovednostech svářeče. Použití této metody je široké, v situacích kde se nedají využít mechanizované metody, opravy, hůř přístupná místa jako svařování na staveništích, v nádržích a na různých konstrukcích. Metoda je využívána i pro svařování hliníku, mědi, niklu a jejich slitin. Princip metody je zobrazen na obr. 9.

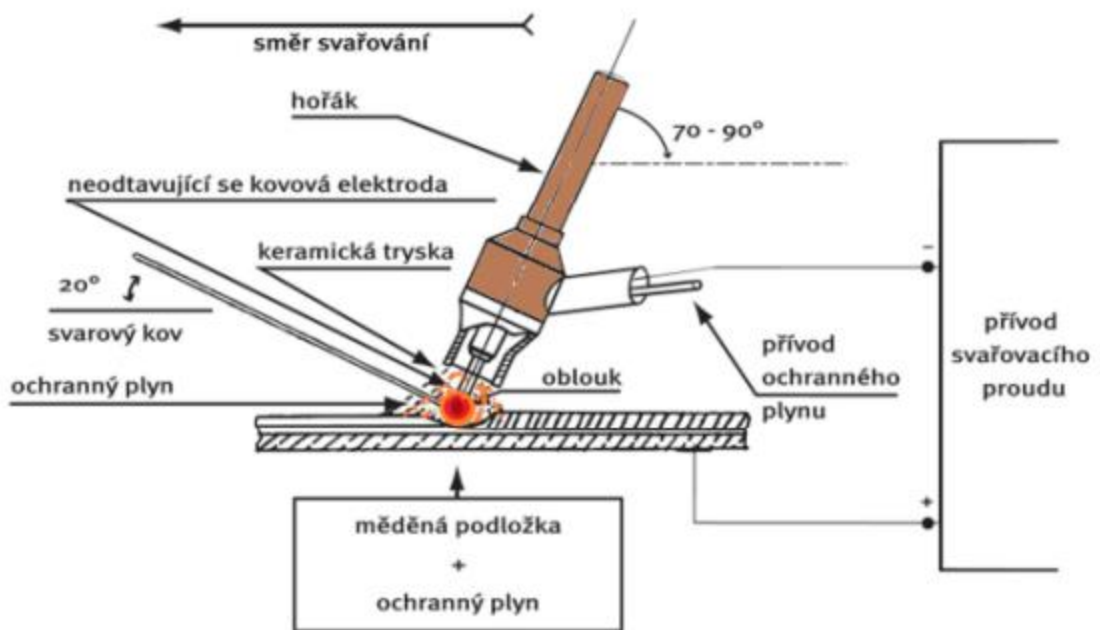


Obr. 9 Princip metody ručního obloukového svařování [22]

- Výhodou je jednoduchost metody, její velká flexibilita v použití. Ochranný plyn na elektrickém oblouku lze používat v jakékoli ze svářecích poloh.
- Nevýhodou je nutné mít zkušenou a kvalitní obsluhu, častá výměna elektrody, její očištění musí probíhat při vypnutí oblouku, tyto manipulace zapříčiní menší produktivitu. Horší mechanizace procesu, nahrazováno jinými metodami.

3.1.2 Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou TIG [23], [25]

Svařování metodou netavící se wolframové elektrody (obr. 10), využívá hořícího oblouku mezi základním materiálem a wolframovou elektrodou. Elektrický oblouk hoří v ochranné atmosféře inertního plynu, většinou helium, argon nebo jejich směsi. Během svařování se podává přídatný materiál ručně popř. automaticky. Pro svařování ocelí, mědi, titanu a jejich slitin se využívá stejnosměrný proud a střídavý proud pro svařování hliníku, hořčíku a slitin těchto kovů.



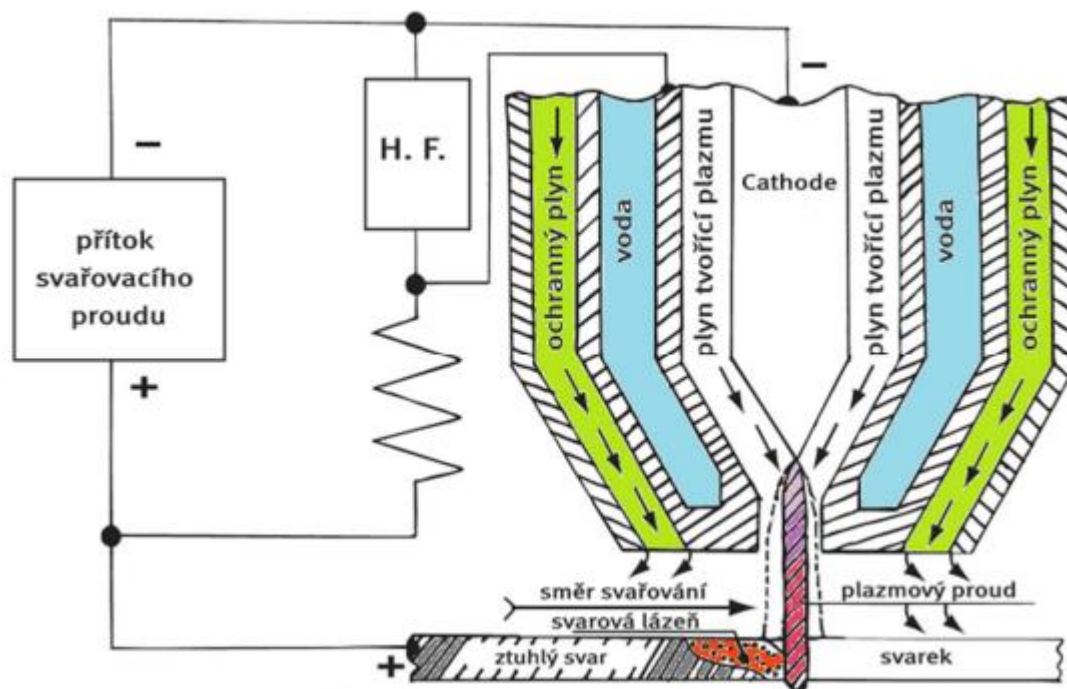
Obr. 10 Princip metody TIG [22]

- Výhodou je snadná obsluha zařízení, není velké opotřebení wolframové elektrody, vzniká stabilní oblouk a je možno vytvořit velmi malou svarovou lázeň, která se nataví na velmi malé oblasti, můžeme řídit průvar a tvar svaru, lze svařovat i na místech nižší dostupnosti.
- Nevýhodou je zkušenost obsluhy, vzniká poměrně velké převýšení svaru, nutné brousit elektrodu do špičky, malá produktivita.

3.1.3 Plasmové obloukové svařování [22],[23], [26], [27]

Při svařování plasmou vzniká oblouk mezi elektrodou a svařencem. Tenký a energeticky silný proud plasmy vychází z trysky, která obsahuje plyn, který tvoří plasmu a plyn, který fokusuje proud plasmu do paprsku. Celá svařovací hlava (obr. 11) druhou obsahuje komoru, ze které vychází proud ochranného plynu. Jako ochranné plyny se používají plyny jako při běžných obloukových metodách, tudíž čistý Ar, směs Ar-He nebo Ar-H₂.

Velmi výkonný proud plasmy dokáže dosáhnout velkých průvarů. Paprsek má velmi vysokou energetickou účinnost, teplota paprsku se pohybuje mezi 10 000-20 000 °C, při pohybu svařovací hlavy dochází k natavení povrchu základního materiálu a k vytvoření svarové lázně, svarová lázeň se sama uzavírá díky povrchovému napětí a za tzv. „keyhole“ (keyhole je dutina, která vzniká dopadem plasmového proudu) a dojde k svaření materiálu. Přídavné materiály mohou být ve formě prášku, drátů nebo trubiček na bázi železa, niklu či kobaltu. Princip metody je zobrazen na obr. 11.

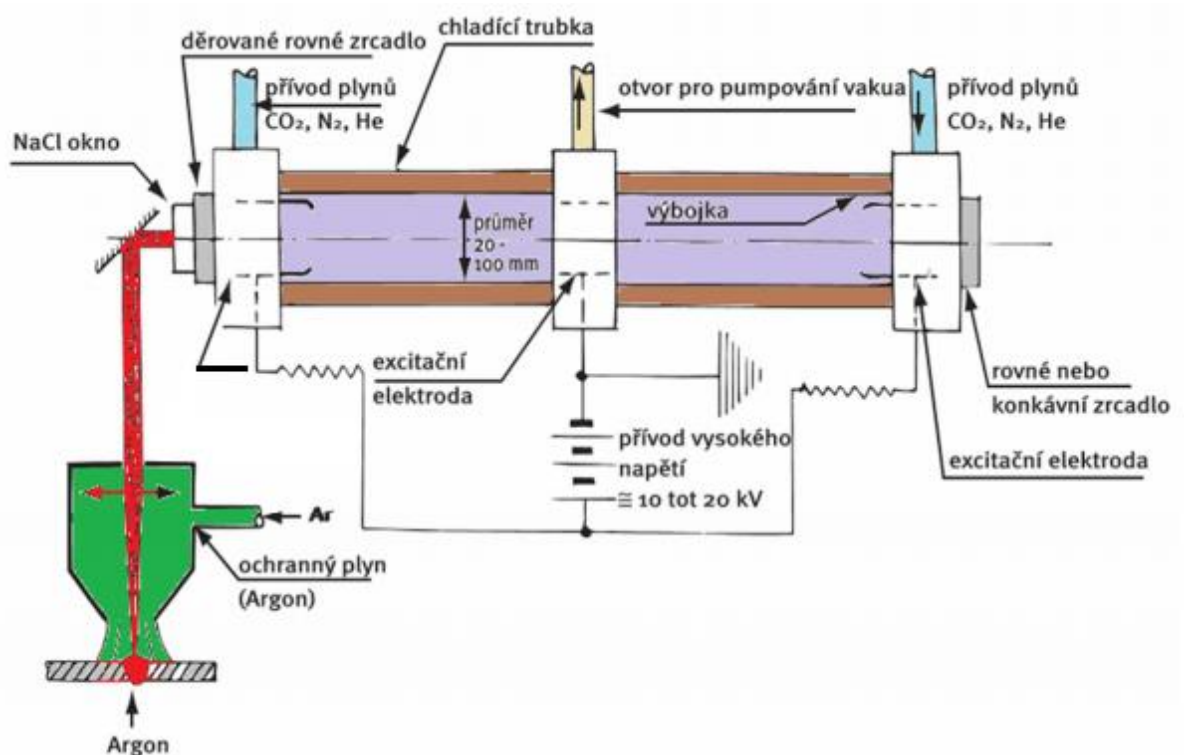


Obr. 11 Princip metody svařování plasmou [22]

- Výhodou je stabilní plasmový oblouk, který je dobře ovladatelný. Poměrně velká svařovací rychlost a vznik malé tepelně ovlivněné oblasti. Možnost svařovat mikroplasmou do 30 A malé tloušťky, naopak nad 100 A lze svařovat průvarem tlusté plechy. Vzniká nám velmi kvalitní svar bez vad, který má i dobrý vzhled. Není náročné svar dále upravovat, jelikož převýšení svaru není veliké v porovnání s metodami TIG/MIG. Lze svařovat i těžko tavitelné kovy. Plasmový zdroj lze využít na navařování kovových nástřiků a prášků.

3.1.4 Svařování laserem [22],[23],[27], [28], [29]

Rychle a čím dál tím více se uplatňující způsob svařování, který je využíván v mnoha procesech a aplikacích. Velmi intenzivní zdroj svařovacího proudu, který ovšem ve výsledku velmi málo tepelně ovlivňuje základní materiál. Metoda je vhodná ke svařování různých typů materiálů. Možnost svařovat různé oceli, hliník nebo např. titan a měď. Princip spočívá ve fokusaci laserového paprsku pomocí optiky do ohniska. V tomto bodě dojde vlivem vysoké hustoty energie k rychlému ohřevu, vzniká efekt klíčové dírky, dutina, která vznikne při dopadu laserového paprsku. Existují dva režimy laseru. Kondukční, kdy paprsek taví kov na povrchu a penetrační, kdy dochází k průniku paprsku do hloubky. Metoda je zobrazena níže na obr. 12.

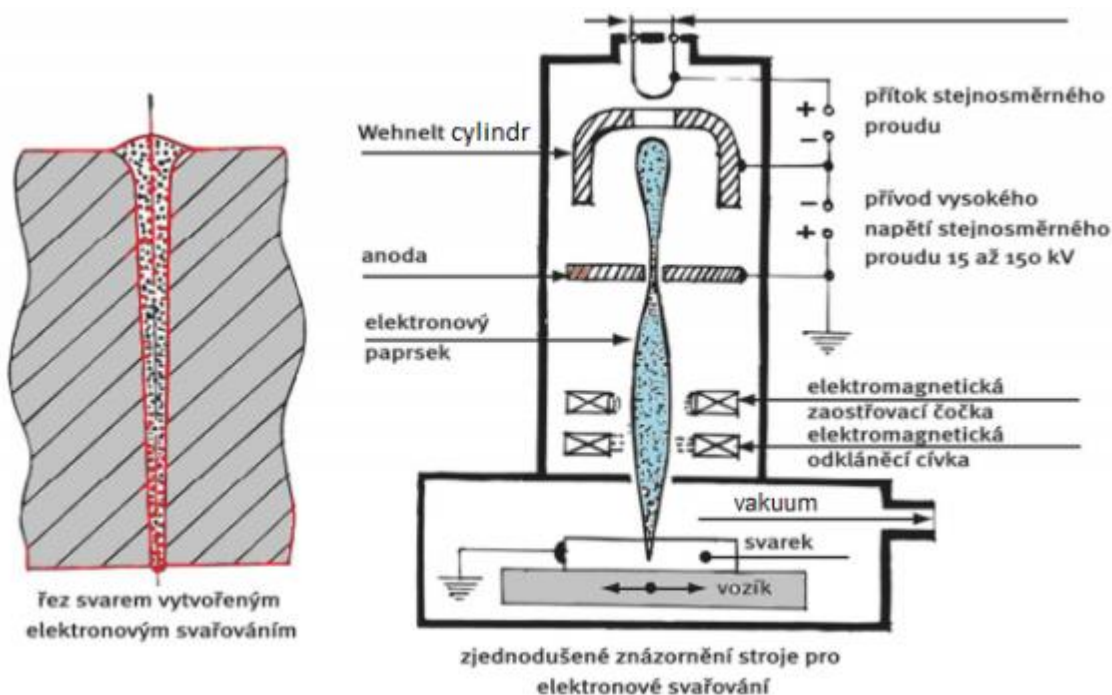


Obr. 12 Princip svařování laserem [22]

- Výhodou je velmi malá TOO, není nutné používat žádný přídavný materiál, svařováním se dosahuje velmi kvalitního a čistého svarového spoje, nedochází k deformacím svařovaných materiálů, lze svařovat i různé typy materiálů, metoda se dá velmi dobře automatizovat, vysoká stabilita a rychlost svařování, velmi dobrá kvalita a štíhlost svaru.
- Nevýhodou je vyšší pořizovací cena zařízení a zdroje laseru, složitější příprava a upnutí svařovaného materiálu.

3.1.5 Svařování elektronovým paprskem [22], [23], [30]

Princip svařování elektronovým paprskem je založen na vysoké rychlosti a energii paprsku elektronů, které naráží na základní materiál. Kinetická energie elektronů se přemění na teplo a dojde k natavení materiálu a vzniku tzv. keyhole. Keyhole je dutina, která vzniká dopadem proudu elektronů. Dutina se následně po projití paprsku uzavře a tím dojde ke svaření materiálů. Kinetická energie paprsku je fokusována do tenké oblasti a paprsek má dostatek energie, aby prošel do velké hloubky, a vytvoří tak tenkou keyhole, jsme tedy schopni vytvořit velmi tenké a přesné sváry ve štíhlostním poměru 1:50. Energie je koncentrována do velikosti až 10^9 W/cm^2 , celý proces svařování tak kvůli volnému pohybu elektronů, které se odrážejí od povrchu a vzniká tak rentgenové záření, musí být prováděn ve vakuu. Při procesu svařování je hustota energie větší, než např. při svařování laserem či ostatních obloukových metodách. Schéma na obr. 13, ukazuje základní princip svařování elektronovým paprskem.



Obr. 13 Princip metody svařování elektronovým paprskem [22]

- Výhodami metody jsou velké průvary materiálu, jsme schopni svařovat materiály velkých tloušťek, a v dobrém štíhlostním poměru. Svařování je bez přídavného materiálu, vysokou rychlostí a je velmi snadná regulace paprsku pomocí úpravy svařovacích parametrů. Velmi malá je TOO a svar výsledný svar má vysokou kvalitu. Lze svařit i velmi špatně svařitelné materiály.
- Nevýhodou je nutnost svařování ve vakuu, delší časy svařování kvůli manipulaci. Velikost svařence je omezena na velikost svařovací komory. Nutné je ochranné opatření obsluhy kvůli vznikajícímu rentgenovému záření. Problém při svařování vysoce uhlíkových materiálů, kvůli jejich sublimaci a následnému odčerpání z komory.

3.1.6 Svařování tavicí se elektrodou v aktivním a inertním plynu MIG/MAG [22], [23], [27], [38]

Metoda obloukového svařování (obr. 15), při které vzniká elektrický oblouk v ochranné atmosféře mezi elektrodou a svařovaným materiálem. Elektrický oblouk hoří pod ochranným plynem a elektroda, která se taví, vyplňuje svarovou mezeru. Rozdíl mezi metodami je ve využití ochranného plynu, metoda MIG (Metal Inert Gas) využívá inertní plyny (Ar, He, N) a metoda MAG (Metal Aktiv Gas) plyny aktivní (CO₂, O₂ a jejich směsi s Ar). Základními parametry ovlivňující výslednou charakteristiku svarového spoje jsou: proud, napětí, přídavný materiál, rychlost svařování a podávání materiálu a předehřev. Důležitým parametrem při přenosu kovu je způsob, kterým se kov přenáší. Existují tři základní způsoby přenosu:

➤ Zkratový přenos

Princip zkratového přenosu spočívá v oddělení materiálu z elektrody v podobě kapky v okamžiku, kdy dojde k přerušení krátkého oblouku zkratem. Během procesu dochází k velkému rozstříku kapek, proto svařování v tomto režimu nedosahuje výsledný svarový spoj vysoké kvality.

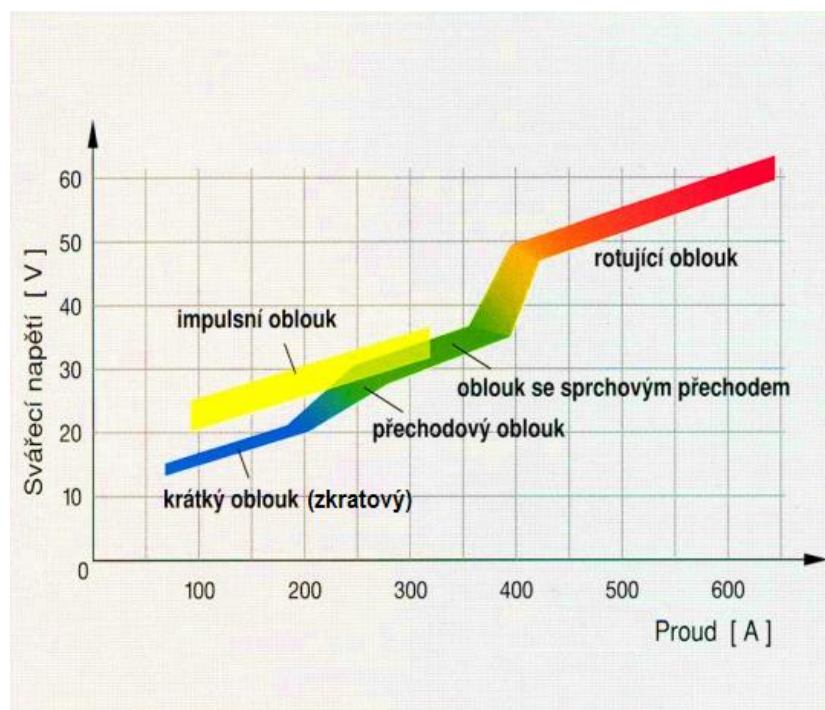
➤ Impulzní přenos

Účinná varianta přenosu kovu do svarové lázně. Průběh svařovacího napětí a proudu je udržován na určité hodnotě a v řízených intervalech dochází k jejich zvýšení v tzv. pulzech, v této fázi dochází k přenosu kapek kovu do svarové lázně. Tímto přenosem lze svařovat i tenké plechy a všechny kovy jako měď, nikl a různé typy ocelí. Výhodou je dobrý vzhled svarové housenky a nižší obsah vytvořených emisních spalin při svařovacím procesu. Při vysokém výkonu svářecího stroje dochází k dobrému natavení kovu, ale zároveň dosáhneme díky menšímu vnesenému teplu menší TOO. Můžeme také svařovat ve všech polohách, což nám umožní svařovat větší rozsah různých typů součástí. Tento proces je energeticky nákladnější a je nutné mít příslušnou svařovací techniku.

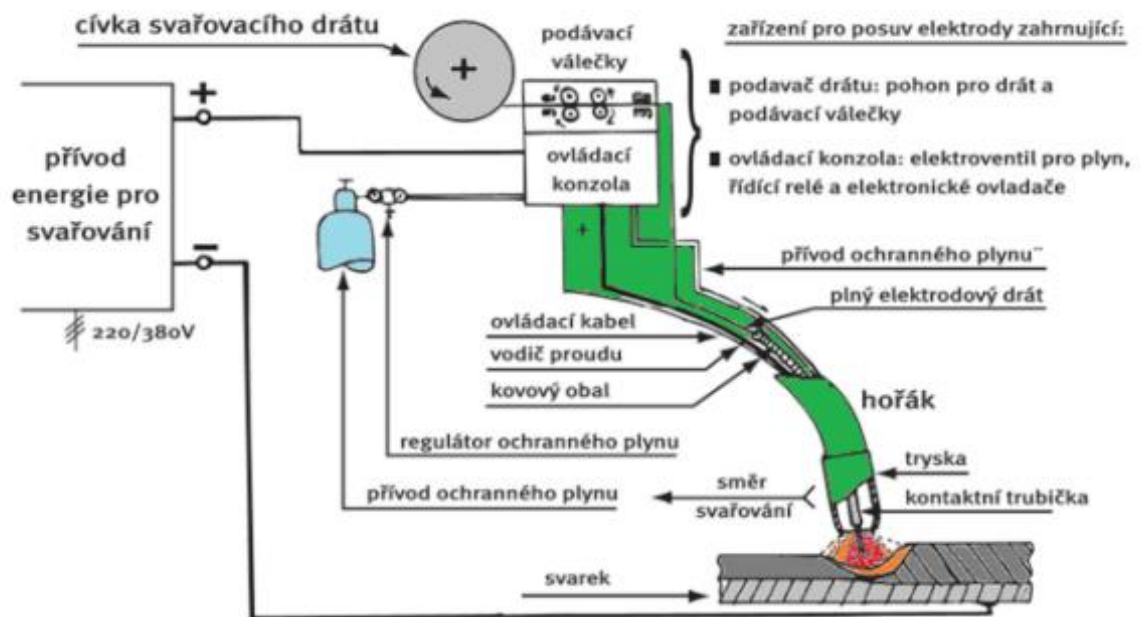
➤ Sprchový přenos

Při tomto přenosu dochází k přenosu kovu z elektrody tzv. sprchou. Malé kapičky kovu letí pod ochranným plynem do svarové lázně. Tímto přenosem se svařují tloušťky větší než 5 mm, jelikož jsou zapotřebí vysoké svařovací parametry (proud a napětí).

Existují i další typy přenosu kovu jako dlouhý oblouk s rotujícím přenosem nebo přechodový oblouk s kapkovým přenosem. Porovnání pracovních oblastí možných přenosů kovu v oblouku při svařování metodou MIG/MAG je uvedeno na obr. 14.



Obr. 14 Pracovní prostředí typů přenosu kovu při svařování MIG/MAG [31]



Obr. 15 Princip metody MIG/MAG [22]

- Výhodou metod MIG/MAG je vysoká produktivita a schopnost svařování ve vícero polohách. Malé deformace při svařování velkých konstrukcí. Je možné jak ruční tak mechanizované či robotizované pracoviště. Zavedení metody do provozu není finančně náročné a nevyžaduje větší investice.
- Nutné odsávací a ventilační zařízení kvůli vzniku škodlivin z ochranných plynů při svařovacím procesu. Velký přenos tepla do okolí. Vyšší nároky na celkovou údržbu zařízení.

3.2 Zkoušky svarových spojů [32],[33]

Zkoušky svařitelnosti jsou důležité pro ověření bezpečnosti svařovaných konstrukcí. Zkouškami ověřujeme mechanické vlastnosti svarových spojů a dále jejich stav (mikrostruktura, makrostruktura, trhliny, defekty, póry apod.). Požadavky na zkoušky jsou dány příslušnými normami a směrnici. Základní rozdělení zkoušek svarových spojů je do dvou skupin:

- nedestruktivní zkoušky,
- destruktivní zkoušky.

3.2.1 Nedestruktivní zkoušky svarových spojů [32], [33]

Nedestruktivní zkoušky jsou používány v případě hotových a finálních výrobků, kdy je zapotřebí ověřit nepřítomnost vad a poruch v materiálu. Mezi nedestruktivní zkoušky patří:

- kapilární zkoušky,
- ultrazvukové zkoušky,
- radiologické zkoušky.

3.2.2 Destruktivní zkoušky svarových spojů [32]

Destruktivní zkoušky svarových spojů jsou zkoušky, pro které je nutno porušit celistvost původního vzorku. Patří mezi důležité činitele, které nám umožňují zjistit bezpečnost a stav svarových spojů. Patří zde zkoušky pevnosti, plasticity, houževnatosti, tvrdosti a celistvosti svařovaných materiálů. Nejvýznamnějšími zkouškami v této kategorii jsou:

- zkouška tahem,
- zkouška rázem v ohybu,
- zkouška tvrdosti dle Rockwella, Brinella, Vickerse,
- zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse,
- zkouška rozlomením,
- metalografické vyhodnocení struktury.

4 EXPERIMENTÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ OCELI C60E (1.1221)

Během experimentálního svařování byl zkoumán vliv svařovacích parametrů a podmínek svařování na uhlíkovou ocel C60E (1.1221) bez aplikace předeževu. Proces svařování simuloval podmínky a parametry tak, aby co nejvíce odpovídaly reálné výrobě.

4.1 Návrh experimentální práce

Při návrhu experimentální práce se postupovalo s ohledem na výrobní procesy v daném podniku a časovou náročnost a byla zvolena varianta, která simuluje reálný proces svařování. Pro zjednodušení experimentu bylo zvoleno vyvařování drážek vybranými přídavnými materiály za rozdílných podmínek. Geometrie drážky odpovídá konstrukci reálně svařovaných součástí.

4.1.1 Základní materiál C60E

Testy svařovacích parametrů probíhaly na oceli C60E jejíž vlastnosti byly blíže rozebrány a popsány v kapitole 1.4.1. Tento materiál je v praxi používán pro výrobu středně namáhaných součástí, které jsou vystaveny i tepelnému zatížení. Chemické složení konkrétní tavby viz materiálový certifikát v příloze č. 1, ze které byly zhotoveny tyče pro výrobu vzorků, jsou uvedeny v tab. 7 a mechanické vlastnosti oceli v tab. 8

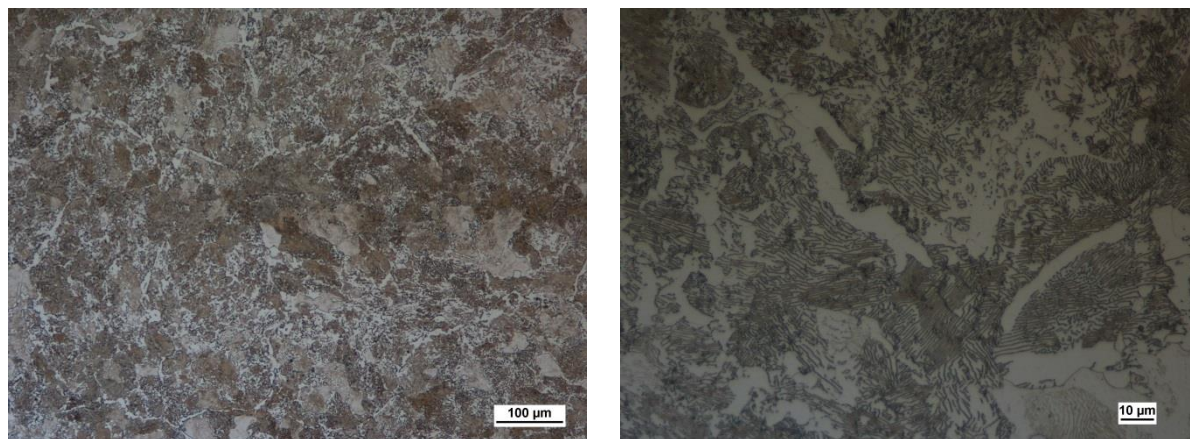
Tab. 7 Chemické složení oceli C60E v hm. %

C	Mn	S	Si	P	Ni	Mo	Cr
0,58	0,64	0,005	0,19	0,022	0,06	0	0,33

Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli C60E

Re [Mpa]	Rm [Mpa]	A [%]	Z [%]	Tvrdość dle Brinella
336	714	15	56	221/224/227

Mikrostruktura testované oceli 1.1221 (C60E) je perlitická s malým podílem proeutektoidního feritu. Objemový podíl feritu 5 až 10 obj. % byl stanoven obrazovou analýzou. Na obr. 16 je zobrazena mikrostruktura vybrané oceli 1.1221 (C60E).



Obr. 16 Mikrostruktura použité oceli C60E (SM 100x, 500x)

4.1.2 Výběr svařovacích parametrů

Mezi parametry, které ovlivňují svařovací proces MIG/MAG a výslednou kvalitu svarového spoje patří přídavný materiál, rychlost podávání drátu, rychlost svařování, průtok a složení ochranného plynu, svařovací napětí a proud, délka oblouku mezi materiálem a svařovací hlavou, teplota přehřevu, poloha svařování, konstrukce svarového spoje atd. V experimentu použité svařovací zařízení neumožňuje samostatné nastavení jednotlivých parametrů (proud, napětí, rychlost podávání drátu atd.). Řízenou hodnotou je svařovací proud, podle kterého se ostatní parametry mění automaticky. Z tohoto důvodu byly vybrány a testovány kombinace dvou hlavních parametrů, které ovlivňují výsledný spoj nejvíce:

- vliv přídavných materiálů od firmy Böhler (DMO-IG, DCMS-IG, X70-IG),
- svařovací proud 130 A, 160 A, 190 A.

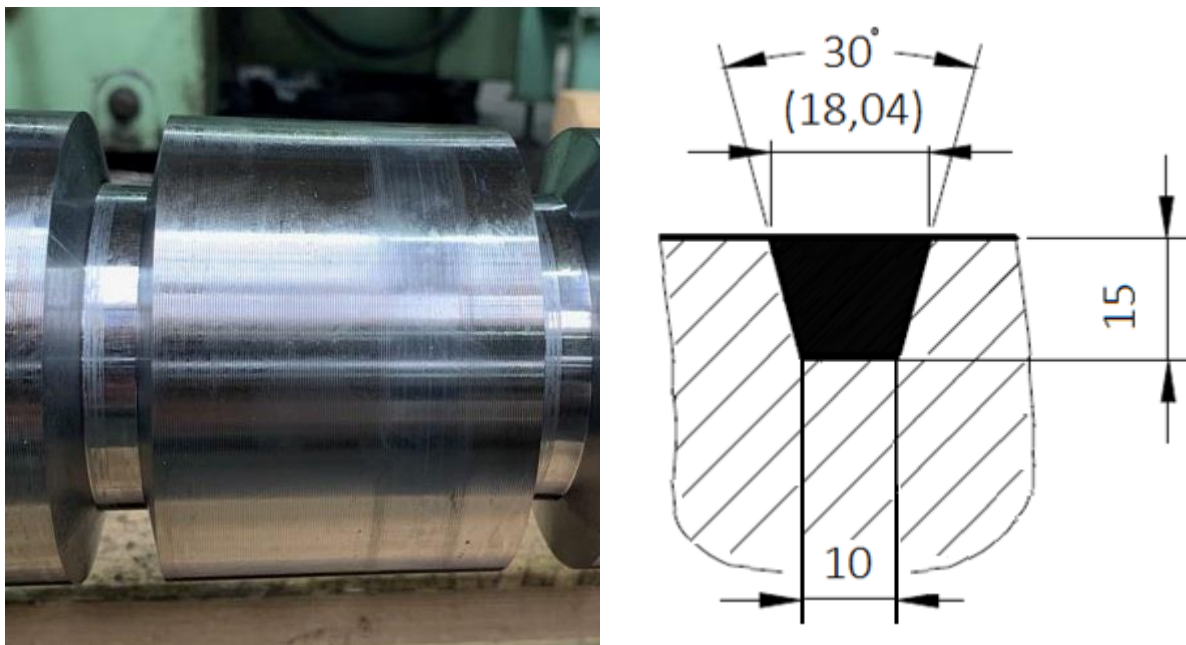
Přídavné materiály byly zvoleny na základě nejčastěji používaných drátů, které se používají pro svařování nízkolegovaných žárupevných ocelí v daném podniku. Průměr všech drátů byl 1,2 mm. Základním kovem drátů je železo a podrobnější chemické složení použitých drátů je uvedeno v tab. 9.

Tab. 9 Chemické složení vybraných svařovacích drátů[34]

Drát	C [hm. %]	Si [hm. %]	Mn [hm. %]	Mo [hm. %]	Cr [hm. %]	V [hm. %]	Ni [hm. %]
DMO-IG	0,1	0,6	1,1	0,5	-	-	-
DCMS-IG	0,11	0,6	1	0,5	1,2	-	-
X70-IG	0,1	0,6	1,6	0,25	0,25	0,1	1,3

4.1.3 Vzorky

Vzorky byly zvoleny z tyče ze základního materiálu C60E. Na tyči o průměru 100 mm (obr. 17) byly připraveny drážky pro simulaci svařování kořene svaru, který je náchylný k výskytu trhlin a jiných defektů. Připravené drážky (obr. 17) na tyči odpovídají reálným součástem a technologii, která je zavedena v daném výrobním podniku. Na těchto připravených vzorcích byly testovány kombinace svařovacích podmínek. Bylo vyzkoušeno devět kombinací svařovacích parametrů, tudíž z tyče bylo odebráno devět samostatných vzorků, které byly vyhodnoceny pomocí světelné mikroskopie (SM) a měření tvrdosti dle Vickerse.



Obr. 17 Vzhled a rozměry vyvařované drážky

4.1.4 Výběr svařovacího stroje a ochranného plynu

Jako svařovací stroj byla zvolena svařovací sestava pro svařování MIG/MAG od firmy Fronius typ TPS 500i Pulse (obr. 18). Pro konstantní udržení podmínek svařování bylo použito nastavovací polohovadlo pro uchycení svařovací hlavy (obr. 18).



Obr. 18 Svařovací zařízení Fronius

Svařovací zařízení pro metody MIG/MAG má snadno ovladatelný multifunkční display (obr. 19), na kterém byly nastaveny, ovládány a sledovány svařovací parametry před i během svařovacího procesu. Technické parametry svařovacího stroje jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10 Technické parametry svařovacího stroje[35]

Technické parametry	
Svařovací proud max.	500 A
Svařovací proud. min	3,0 A
Svař. Proud/dovolené zatížení	500 A / 40 %
Svař. Proud/dovolené zatížení	430 A / 60 %
Svař. Proud/dovolené zatížení	360 A / 100 %
Rozsah pracovního napětí	14, 2 - 39, 0 V
Napětí naprázdno	71, 0 V
Síťová frekvence	50 - 60 Hz
Síťové napětí	3 x 400 V
Síťové jistění	35 A
Rozměry	300 x 706 mm
Váha	38 kg
Krytí	IP23



Obr. 19 Ovládací panel stroje

Jako ochranný plyn byla zvolena argon-heliová směs T.I.M.E. od firmy Linde. Tato ochranná směs je používána při MAG svařování v daném výrobním podniku. Tento plyn je velmi stabilní při pulsním svařování a vytváří ochrannou atmosféru, ve které elektrický oblouk vykazuje stálé vlastnosti. Přítomnost He ve směsi je z důvodu udržení většího tepla v oblouku. Toto teplo způsobuje větší prohřátí jádra i povrchu materiálu a nedochází k velmi rychlému ochlazení, teplota ve svarové lázni mezi jádrem a povrchem je rovnoměrnější. Chemické složení vybrané směsi je uvedeno v tab. 11.

Tab. 11 Chemické složení ochranného plynu v % [36]

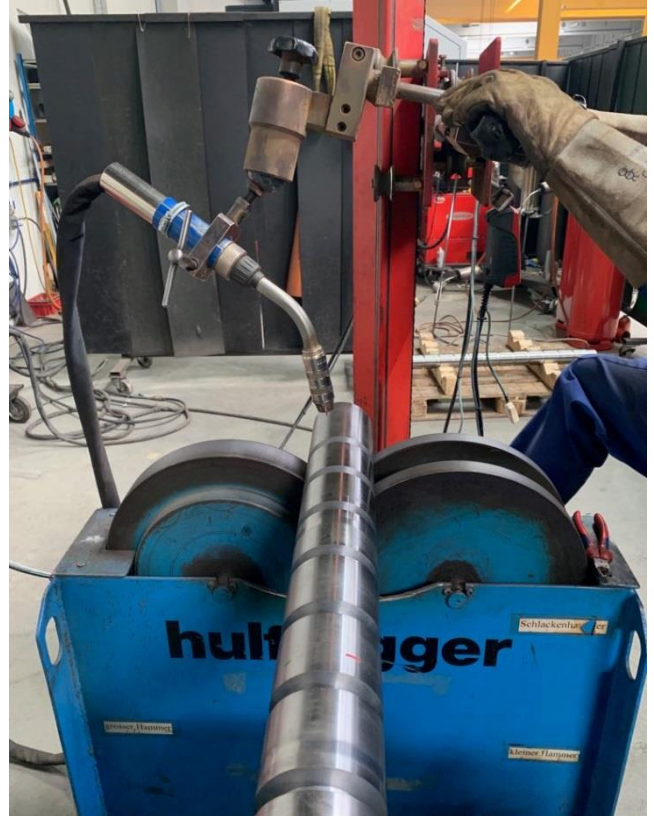
Ar	He	CO ₂	O ₂
65	26,5	8	0,5

4.2 Realizace experimentální práce

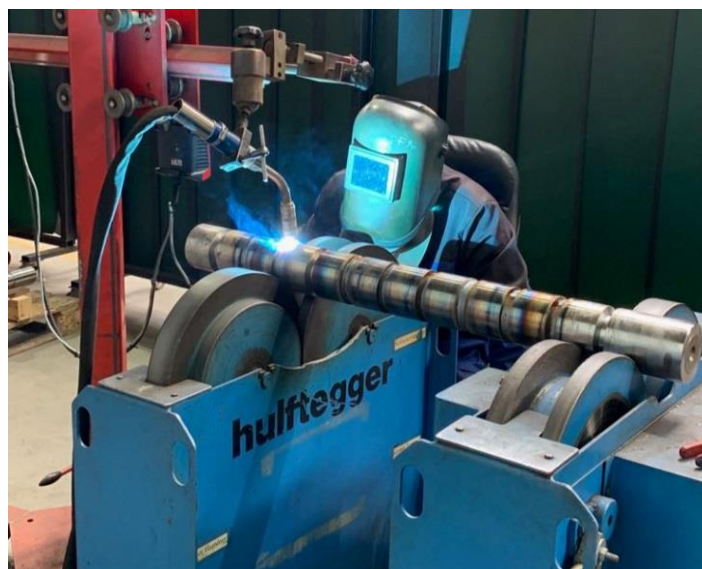
Na tyči ze základního materiálu oceli C60E bylo obrobena 9 drážek, které odpovídají konstrukci základním svařovaným dílcům ve výrobě. Navařování do drážek simulovalo svařování kořenové části svaru. Vyvařování všech drážek probíhalo ve stejné poloze a to poloze PA (obr. 20). Tyč byla položena na svařovacích rolnách, které měly konstantní rychlost otáčení pro všechny testované návary. Rychlost otáčení tyče (rychlost svařování) byla 2,95 mm/s. Objem ochranné směsi byl nastaven na 20 l/min. Připravená zkušební tyč nebyla před začátkem svařování předehřívána. Teplota zkušební tyče se pohybovala mezi 20 až 25 °C. Mezi jednotlivými návary se čekalo až tyč vychladne na teplotu 50 °C .

Pro návary byly vybrány tři dráty o stejném průměru 1,2 mm a tři výchozí svařovací proudy 130 / 160 / 190 A. Ostatní svařovací parametry jako svařovací napětí a rychlost podávání drátu se automaticky měnily v závislosti na velikosti proudu, který právě probíhal v elektrickém oblouku

Jako svařovací režim byl zvolen přednastavený model pulsního režimu speciální čtyřtakt a postup svařování PMC universal. Tyto režimy byly zvoleny na základě obvykle používaných režimů svařování v daném výrobním podniku. Před samotným navařováním (obr. 21) došlo k očištění a odmaštění svarových ploch.



Obr. 20 Poloha svařování PA



Obr. 21 Průběh svařovacího procesu

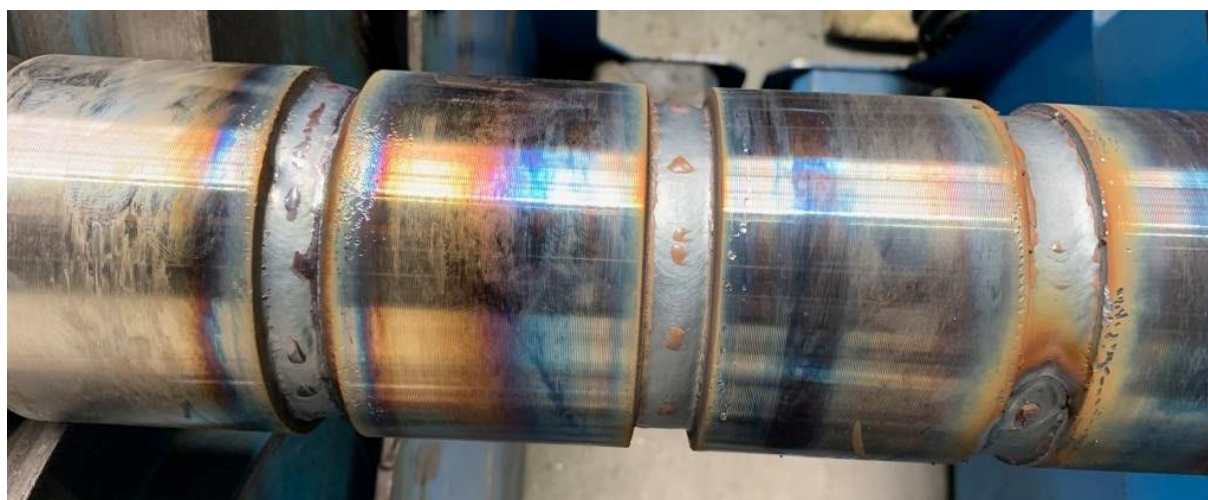
4.2.1 Svařování drátem DMO-IG

Vzorek č. 1, č. 2 a č. 3 byly vyvařené drátem DMO-IG, který svým chemickým složením nabízí dobrou pevnost. Dle parametrů byl dopočítán tepelný příkon podle vzorce 1.12. Kombinace všech parametrů byly zaznamenány do tab. 12.

Tab. 12 Svařovací parametry pro drát DMO-IG

DMO-IG	Pořadí housenky	Proud [A]	Napětí [V]	Tepelný příkon [kJ/mm]
Vzorek 1	1.	131-133	25,5-25,8	0,92
	2.	131-133	24,3-24,8	0,88
	3.	132-135	24,2-24,9	0,89
	4.	132-135	24,2-24,9	0,9
Vzorek 2	1.	158-159	25,4-25,7	1,1
	2.	161-162	24,8-25,1	1,09
	3.	165-166	23,9-24,5	1,08
Vzorek 3	1.	177-185	30,6-31,9	1,53
	2.	187-192	30,7-32,1	1,6
	3.	189-191	26,2-26,4	1,35

Výsledný vzhled svarových spojů je uveden na obr. 22. Při sledování svařovacího procesu se jevila nejlépe varianta při 160 A, jelikož drát dobře vyplňoval připravenou drážku, z oblouku nelétaly jiskry a vykazoval stabilitu. Při 190 A se oblouk nechoval stabilně a na povrchu svaru vznikalo velké množství strusky. Naopak při navařování nejmenším proudem bylo nutno přidat jednu housenku navíc tak aby byla svarová mezera zaplněna.



Obr. 22 Výsledné svarové spoje po svařování drátem DMO-IG (zleva 130 A, 160 A, 190 A)

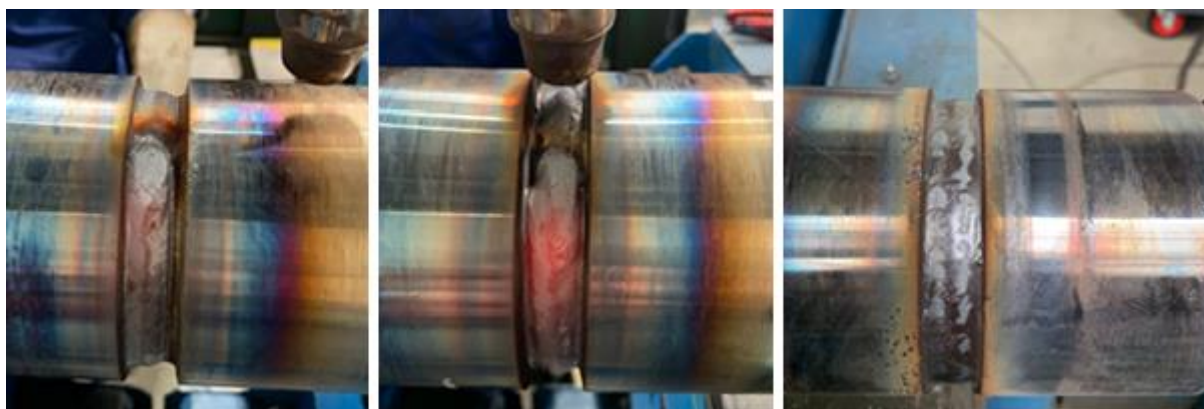
4.2.2 Svařování drátem DCMS-IG

Vzorky č. 4., č. 5 a č. 6 byly svařované přídavným materiálem DCMS-IG, který je určen vykazuje dobrou odolnost vůči trhlinám a dobrou pevnost. Pro svařování tímto drátem byly opět nastaveny stejné výchozí svařovací proudy. Dle parametrů byl dopočítán tepelný příkon podle vzorce 1.12. Kombinace všech parametrů byly zaznamenány do tab. 13

Tab. 13 Svařovací parametry pro drát DCMS- IG

DCMS-IG	Pořadí housenky	Proud [A]	Napětí [V]	Tepelný příkon [kJ/mm]
Vzorek 3	1.	132-135	26,8-27,1	0,92
	2.	134-135	25,4-25,5	0,92
	3.	138-139	25,2-26	0,93
	4.	138-140	25,2-25,4	0,94
Vzorek 4	1.	158-160	26,4-26,5	1,1
	2.	163-165	25,4-25,7	1,12
	3.	162-163	25,3-25,4	1,14
Vzorek 5	1.	177-183	31,2-32	1,4
	2.	184-185	26,4-26,7	1,37
	3.	191-192	25,5-25,8	1,34

Přídavný materiál se ve svarové lázni velice dobře rozléval a dobře vyplňoval připravené drážky. Při využití nejnižšího proudu bylo opět nutné vyplnit první drážku čtyřmi housenkami. Výsledné svarové spoje byly velmi hladké, kromě spoje při 190 A, kdy na povrchu i v okolí svaru vznikalo velké množství strusky. Výsledné svary jsou uvedeny na obr. 23.



Obr. 23 Výsledné svarové spoje po svařování drátem DCMS-IG (zleva 130 A, 160 A, 190 A)

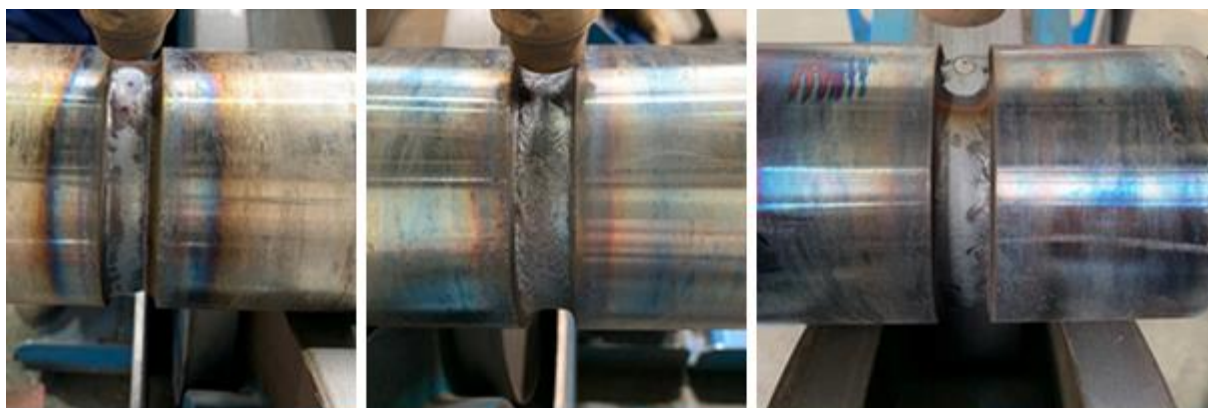
4.2.3 Svařování drátem X70-IG

Vzorky č. 7, č. 8 a č. 9 byly svařovány drátem X70-IG, který obsahuje nejvíce legujících prvků, které zajišťují při vysoké tvrdosti a pevnosti i dobrou tažnost a výbornou odolnost proti vzniku trhlin. Svařování probíhalo za stejných podmínek jako při předchozích testech. Dle parametrů byl dopočítán tepelný příkon podle vzorce 1.12. Kombinace všech parametrů byly zaznamenány do tab. 14

Tab. 14 Svařovací parametry pro drát X70-IG

X70-IG	Pořadí housenky	Proud [A]	Napětí [V]	Tepelný příkon [kJ/mm]
Vzorek 7	1.	129-130	25,8-26,5	0,92
	2.	131-132	25,7-25,9	0,92
	3.	133-136	25,3-25,8	0,93
	4.	135-137	25,3-25,5	0,94
Vzorek 8	1.	156-157	25,7-25,9	1,1
	2.	159-161	25,7-26	1,12
	3.	163-165	25,5-25,9	1,14
Vzorek 9	1.	188-192	26,9-27,1	1,4
	2.	188-192	26,3-26,5	1,37
	3.	190-191	25,5-26,1	1,34

Svařovací proces byl při svařování tímto drátem při všech použitých proudech stabilní, což ukazuje i tabulka svařovacích parametrů, aktuální hodnoty parametřů neměly velkou odchylku během celého procesu. Svarové spoje jsou po vizuální kontrole bez viditelných vad. Výsledné svarové spoje jsou uvedeny na obr. 24.



Obr. 24 Výsledné svarové spoje po svařování drátem X70-IG (zleva 130 A, 160 A, 190 A)

4.3 Výsledky zkoušek svarových spojů

Po experimentálním svařování následovala příprava vzorků na vyhodnocení makrostruktury, mikrostruktury a tvrdosti. Vzhledem k velikosti zkušební tyče, bylo nutné rozřezat vzorky v několika krocích. V prvním kroku se tyč rozřezala na pásové pile Daito GA260W (obr. 25) podle jednotlivých svarů, na kotouče o délce 50 mm.



Obr. 25 Rozřezání vzorků na pásové pile Daito

Z rozřezaných kotoučů se následně vyřezaly vzorky pomocí elektroerozivního obrábění drátem na stroji Sodick AG 600LH (obr. 26).



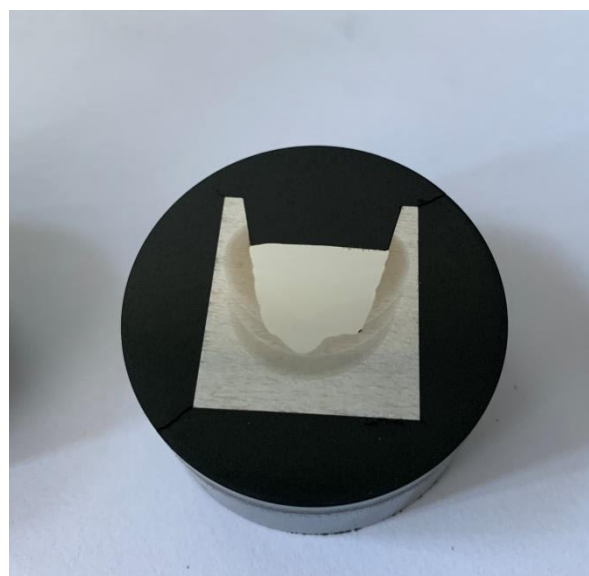
Obr. 26 Vzorky po rozřezání na stroji Sodick

Posledním zařezáním na metalografické pile Struers Discotom- 6 (obr. 27) bylo dosaženo finálních rozměrů vzorků, které byly zality do kotoučů z pryskyřice o průměru 40 mm a následně vybroušeny na leštícím a brousícím stroji Struers Tegramin- 30 (obr. 28).



Obr. 27 Metalografická pila Struers Discotom- 6

Zalité vzorky byly následně naleptány 3% roztokem Nitalu. Naleptaný povrch materiálu nám ukázal makrostrukturu vyvařené drážky a TOO základního materiálu.



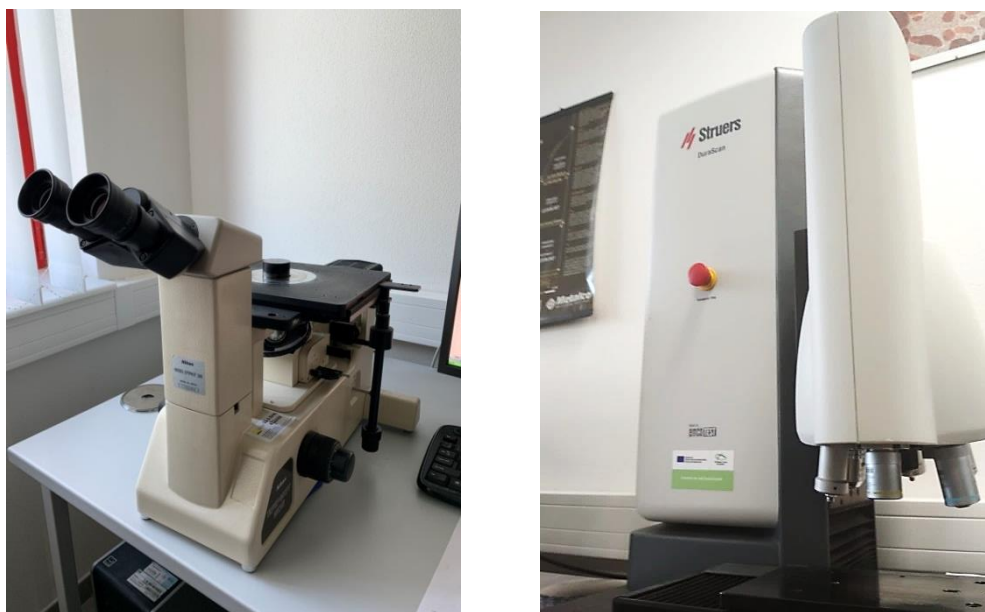
Obr. 28 Brousící stroj Struers Tegramin- 30 a zalitý vzorek

Naleptané vzorky byly naskenovány a byla zkoumána jejich makrostruktura. Mikrostruktura byla zkoumána na světelném mikroskopu Nikon Epiphot 200 (obr. 29).

Vyhodnoceny byly následující charakteristické oblasti svarového spoje:

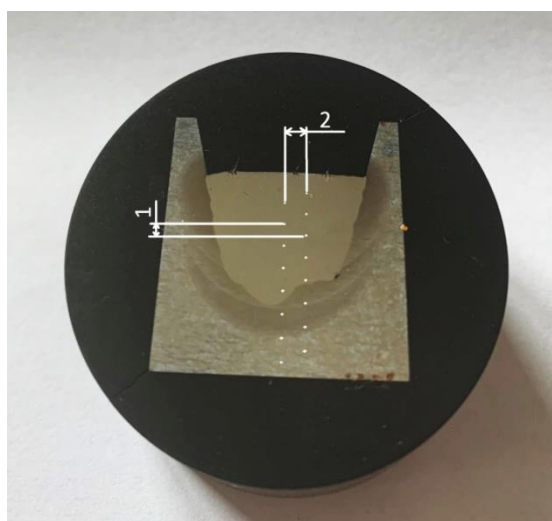
- struktura a velikost TOO,
- struktura svarového kovu,
- kvalita provaření kořene svaru,
- přítomnost vad ve svarovém spoji.

Na každém vzorku bylo provedeno měření tvrdosti dle Vickerse o zatížení HV3 (zatěžovací síla $F = 29,42 \text{ N}$) na mikrotvrdoměru značky Struers typ Durascan (obr. 29). Jednotlivé tvrdosti byly zaznamenány do tabulky a vyhodnoceny.



Obr. 29 Mikroskop Nikon a tvrdoměr Durascan

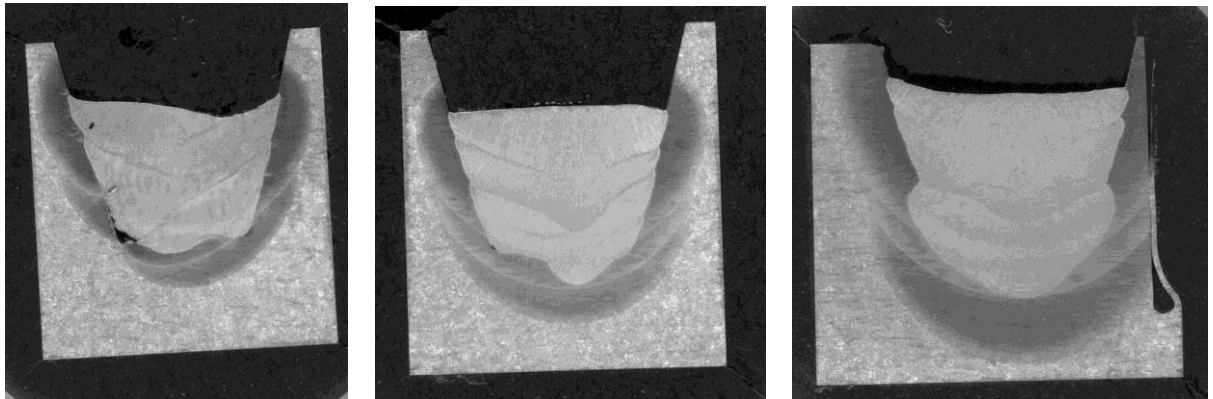
Tvrdosti byly měřeny automaticky na tvrdoměru Durascan s přednastaveným krokem. Horizontální vzdálenost vpichů od sebe je 2 mm a vertikální vzdálenost je 1 mm (obr. 30).



Obr. 30 Vzdálenosti vpichů při měření tvrdosti HV3

4.3.1 Zkoušky svarových spojů svařovaných drátem DMO-IG

Výsledné makrostruktury vzorků č. 1, č. 2 a č. 3, které byly svařovány drátem DMO-IG jsou uvedeny na obr. 31.



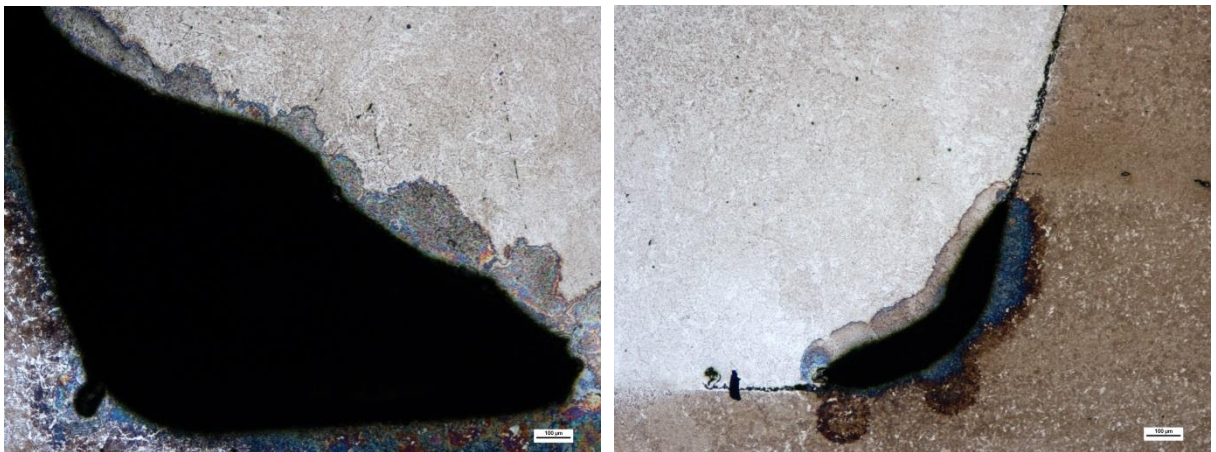
1) 130 A

2) 160 A

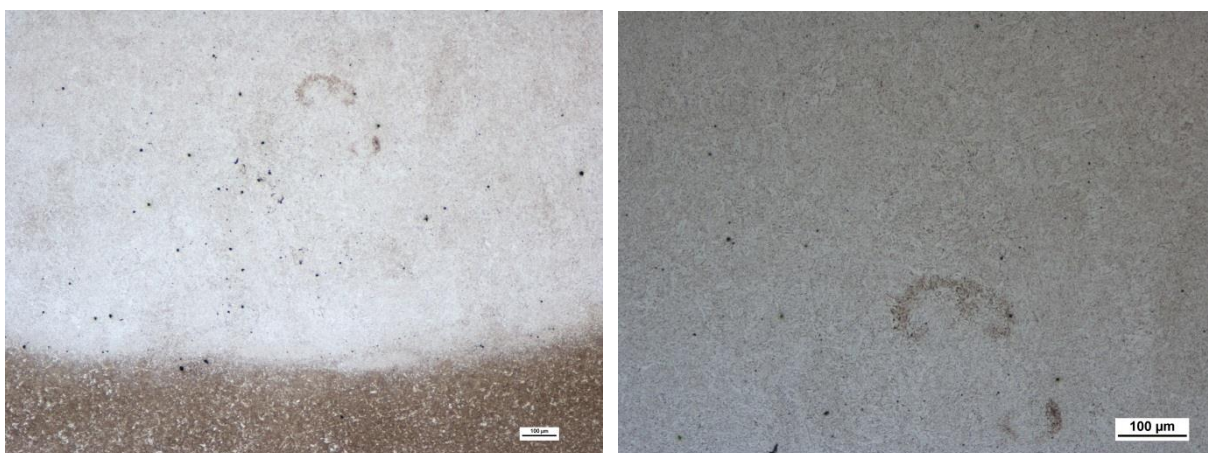
3) 190 A

Obr. 31 Makrostruktura vzorků svařovaných drátem DMO-IG

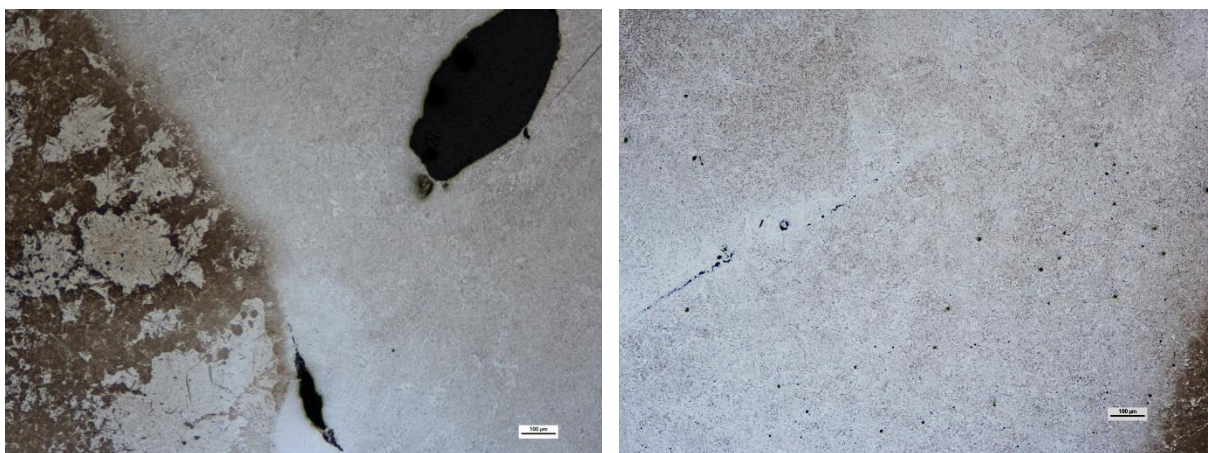
Vzorek č. 1: Nalezené vady v mikrostruktúře vzorku č. 1 jsou uvedeny na obr. 32, jedná se o špatně provařené rohy drážky, kdy došlo k malému rozliti přídavného materiálu, který vlivem rychlého ochlazení nestačil vyplnit celou svařovanou oblast. V pravém dolním rohu není materiál svarového kovu pevně spojen se základním kovem a vznikl zde studený spoj v důsledku nízkého vneseného tepla. Samotný kořen svaru je bez vad (obr. 33). Dalšími nalezenými vadami jsou kavity a póry ve svarovém kovu (obr. 34).



Obr. 32 Vady v dolních rozích vzorku č. 1 (levý a pravý roh) (SM 50x)

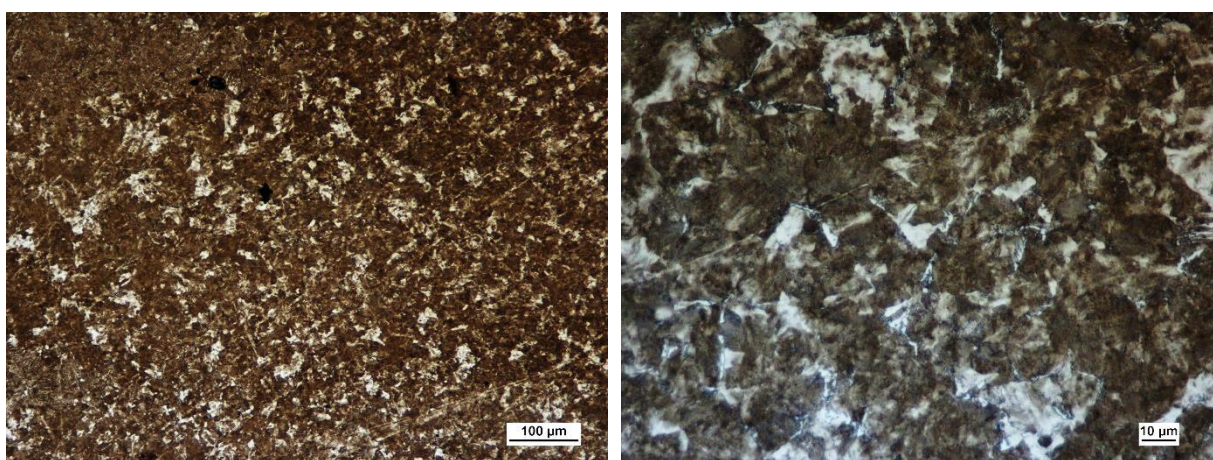


Obr. 33 provaření kořene vzorku č. 1 (SM 50x, 100x)

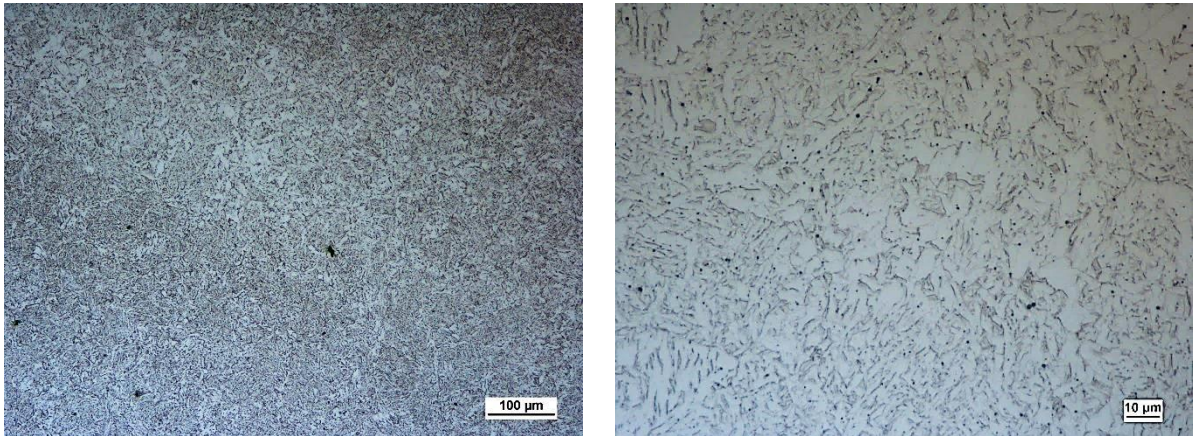


Obr. 34 Vady v mikrostruktuře vzorku č. 1 (SM 50x)

Tepelně ovlivněná oblast (obr. 35) má velikost od 1 do 2,5 mm a skládá se převážně z perlitu. V TOO vzorku jsou vidět i základné struktury (obr. 34). Struktura svarového kovu je tvořena Widmanstättenovým feritem (obr. 36).



Obr. 35 Mikrostruktura TOO vzorku č. 1 (SM 100x, 500x)



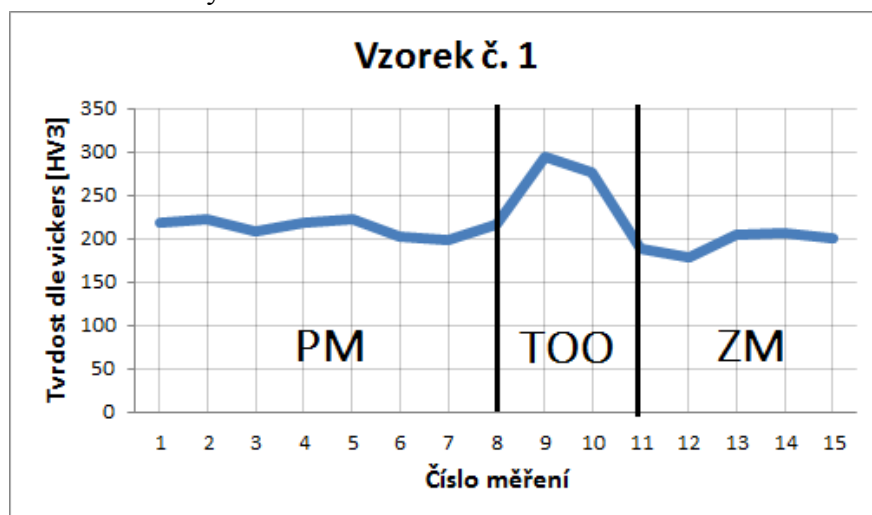
Obr. 36 Mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 1 (SM 100x, 500x)

Jednotlivé měření tvrdostí dle Vickerse po svařování vzorku č. 1 přídatným materiálem DMO-IG jsou uvedeny v tab. 15.

Tab. 15 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 1

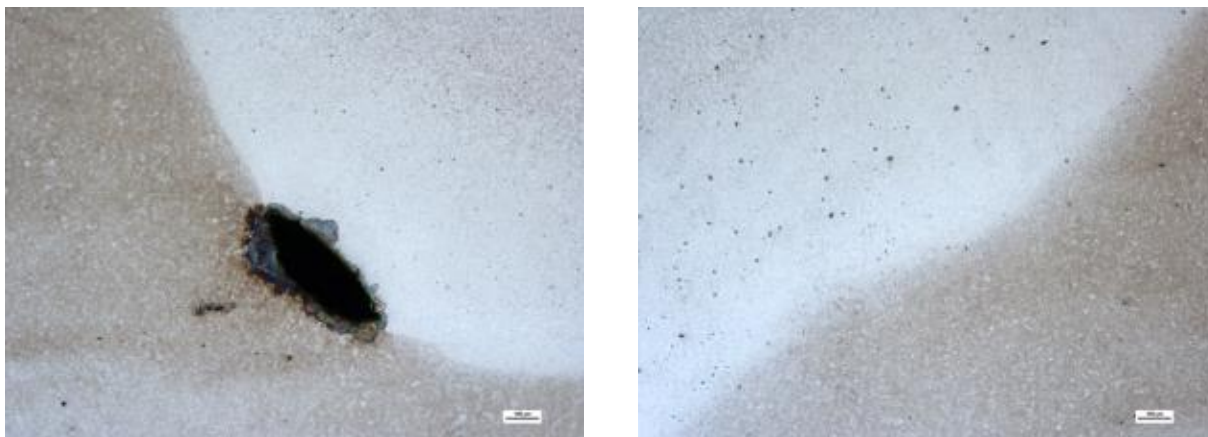
Oblast	PM							TOO			ZM				
Měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tvrdość [HV3]	219	223	208	219	223	203	198	317	294	277	188	179	204	206	201

Tab. 15 byla zpracována do grafu (obr. 37), kde byla znázorněna oblast přídatného materiálu, tepelně ovlivněná oblast a oblast základního materiálu. Do těchto oblastí byly zaneseny naměřené hodnoty tvrdostí.



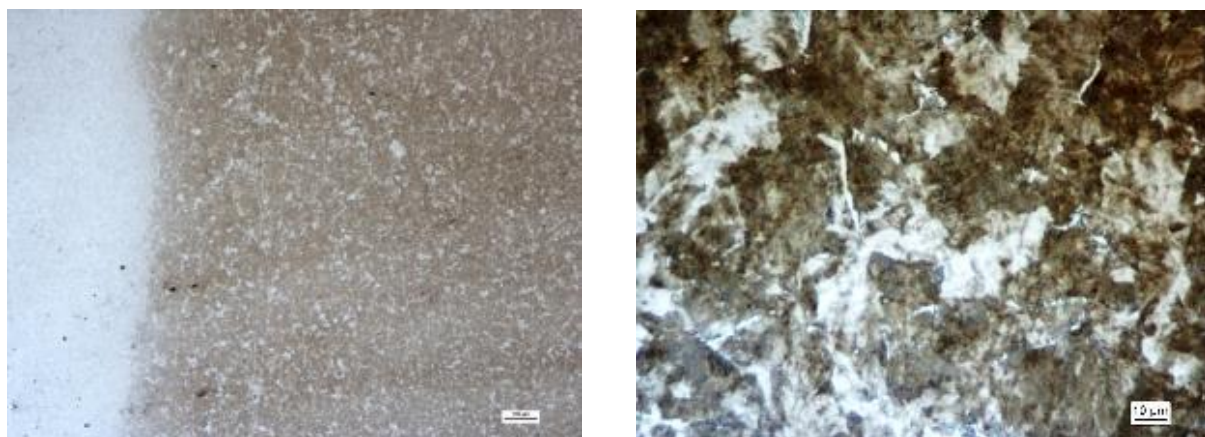
Obr. 37 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 1

Vzorek č. 2: Na vzorku, byla nalezena vada v levém dolním rohu, pravý roh a zbytek kořene je zcela vyplněn svarovým kovem a je spojen se základním materiálem bez přítomnosti vad (obr. 38).



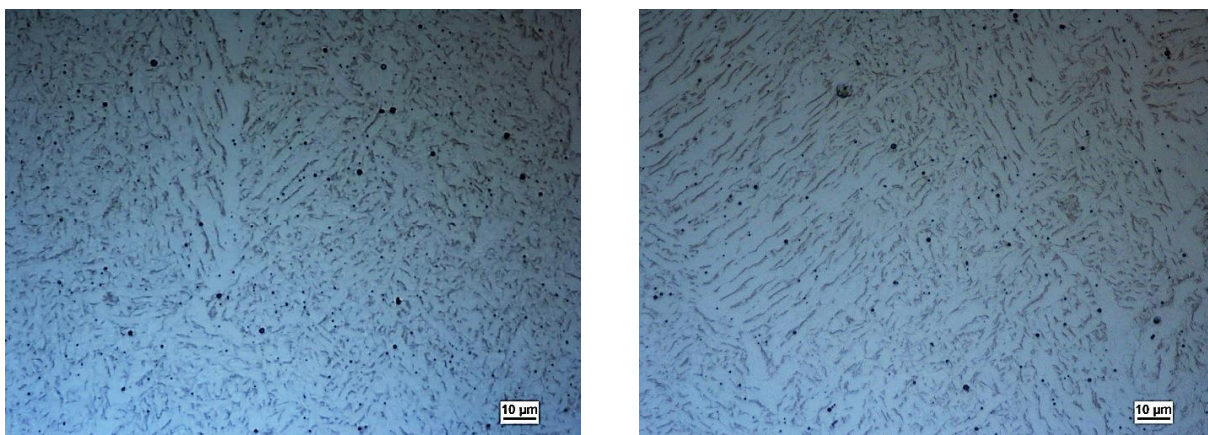
Obr. 38 Mikrostruktura s vadami kořene na vzorku č. 2 (levý a pravý roh), (SM 50x)

Velikost TOO je přibližně 2 až 2,5 mm okolo celého svaru, mikrostruktura je jemná perlitickou-feritická bez přítomnosti martenzitu (obr. 39).



Obr. 39 Mikrostruktura TOO vzorku č. 2 (SM 50x, 500x)

Svarový kov má jehlicovitou strukturu a zrna jsou orientována ve směru chladnutí přídavného materiálu, jak můžeme vidět na obr. 40.



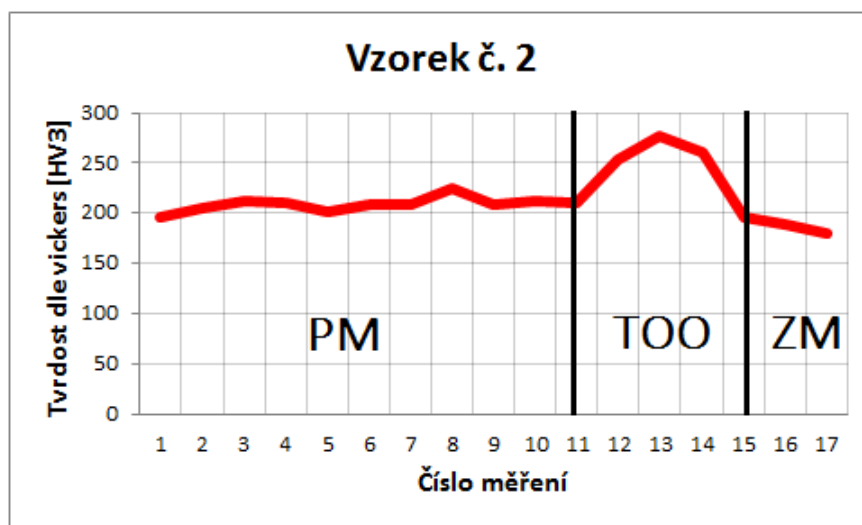
Obr. 40 Mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 2 (SM 500x)

Jednotlivé měření tvrdostí dle Vickerse po svařování vzorku č. 2 přídatným materiálem DMO-IG jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 2

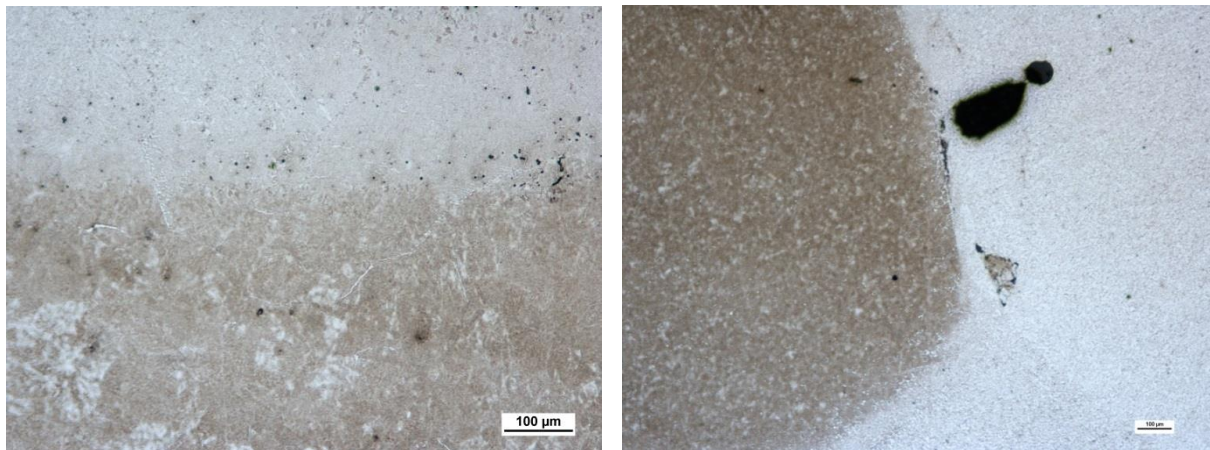
Oblast	PM											TOO			ZM		
Měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Tvrdość [HV3]	196	205	213	211	202	209	208	224	208	212	210	254	276	261	196	189	180

Tab. 16 byla zpracována do grafu (obr. 41), kde byla znázorněna oblast přídatného materiálu, tepelně ovlivněná oblast a oblast základního materiálu. Do těchto oblastí byly zaneseny naměřené hodnoty tvrdostí.



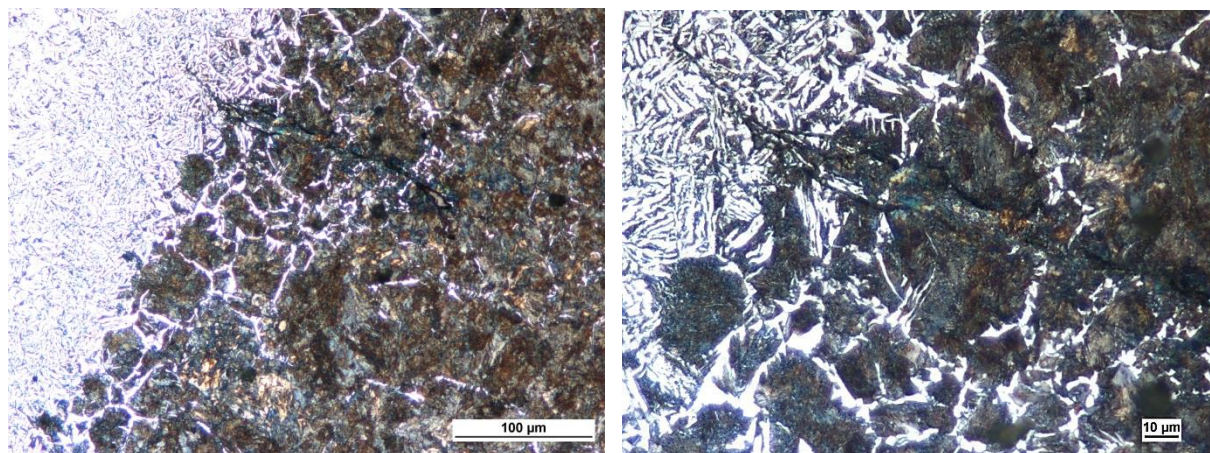
Obr. 41 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 2

Vzorek č. 3: Na třetím vzorku je vidět velké provaření kořene (obr. 42) a mnohem větší natavení základního materiálu než u předchozích vzorků, v pravém dolním rohu je přítomna vada v podobě malé kavity (obr. 42).

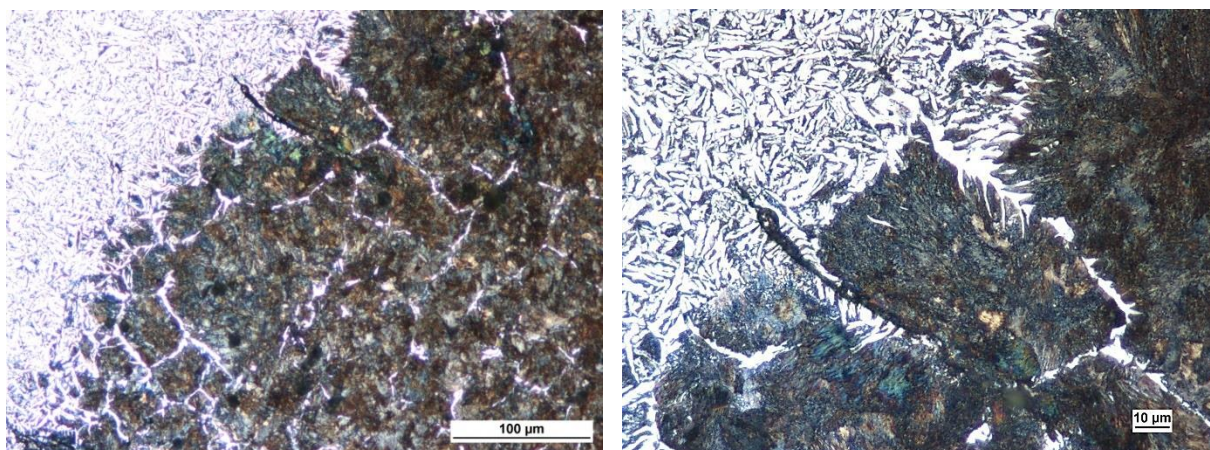


Obr. 42 Provaření kořene a vada v oblasti styku housenek vzorku č. 3 (SM 100x, 50x)

Mikrostruktura třetího vzorku obsahuje mikrotrhliny, které jsou přítomny na rozhraní svarového kovu a základního materiálu a jsou kolmé na svarový spoj. Trhliny mají velikost od 200 µm do 350 µm. Menší trhlina A je zobrazena na obr. 43 a trhlina B, která se postupně rozšiřuje a rozvětřuje dál do TOO na obr. 44.

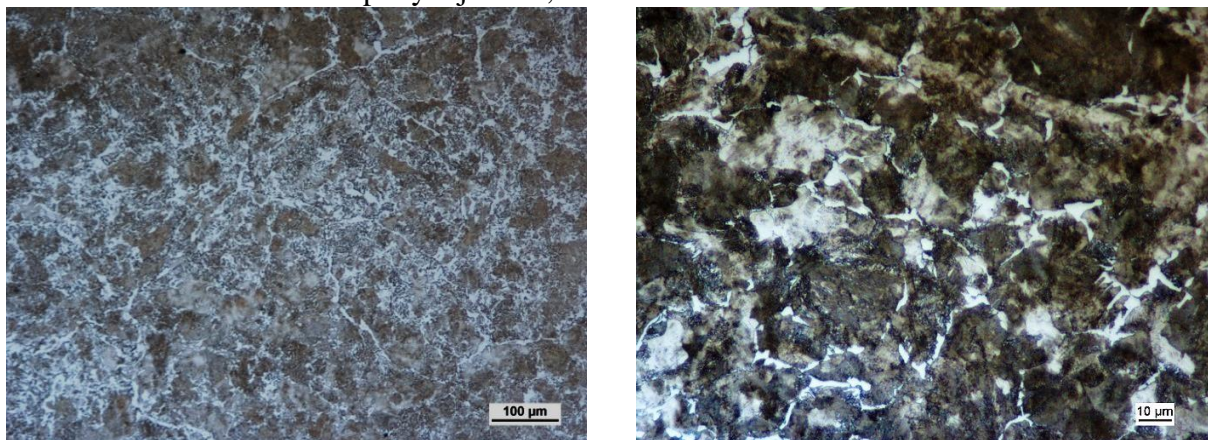


Obr. 43 Trhlina A v TOO vzorku č. 3 (SM 200x, 500x)



Obr. 44 Trhlina B v TOO vzorku č. 3 (SM 200x, 500x)

Struktura TOO (obr. 45) neukazuje přítomnost martenzitu nýbrž opět perliticko-feritickou strukturu. Velikost TOO se pohybuje od 2,5 do 4 mm.



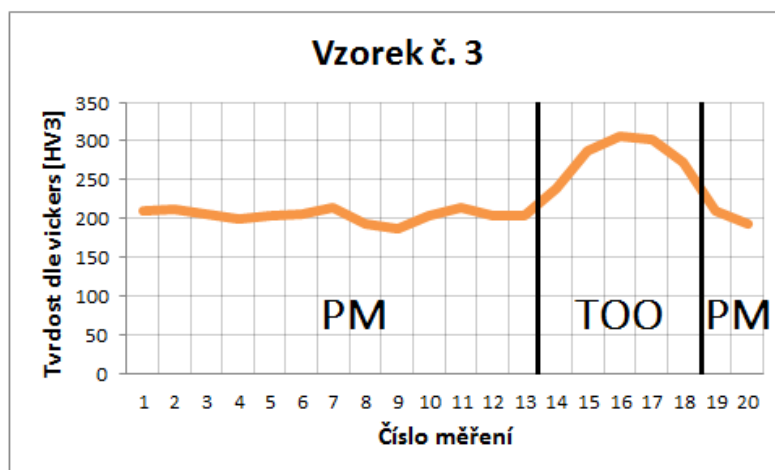
Obr. 45 Mikrostruktura TOO vzorku č. 3 (SM 50x, 500x)

Jednotlivé měření tvrdostí dle Vickerse po svařování vzorku č. 3 přídatným materiálem DMO-IG jsou uvedeny v tab. 17.

Tab. 17 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 3

Oblast	PM													TOO					ZM		
	Měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tvrđost [HV3]		209	212	205	200	204	205	214	193	186	204	214	204	203	239	287	306	301	273	209	192

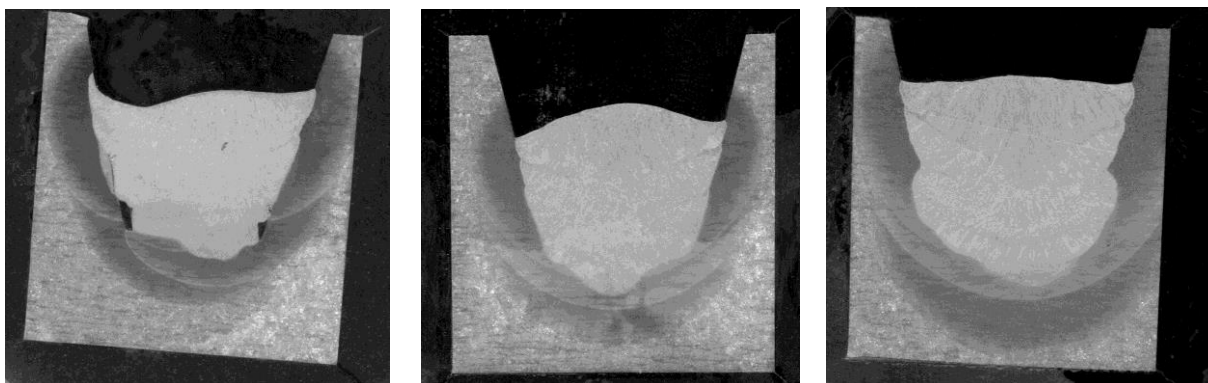
Tab. 17 byla zpracována do grafu (obr. 46), kde byla znázorněna oblast přídatného materiálu, tepelně ovlivněná oblast a oblast základního materiálu. Do těchto oblastí byly zaneseny naměřené hodnoty tvrdostí.



Obr. 46 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 3

4.3.2 Zkoušky svarových spojů svařovaných drátem DCMS-IG

Výsledné makrostruktury vzorků č. 4, č. 5 a č. 6, které byly svařovány drátem DCMS-IG jsou uvedeny na obr. 47.



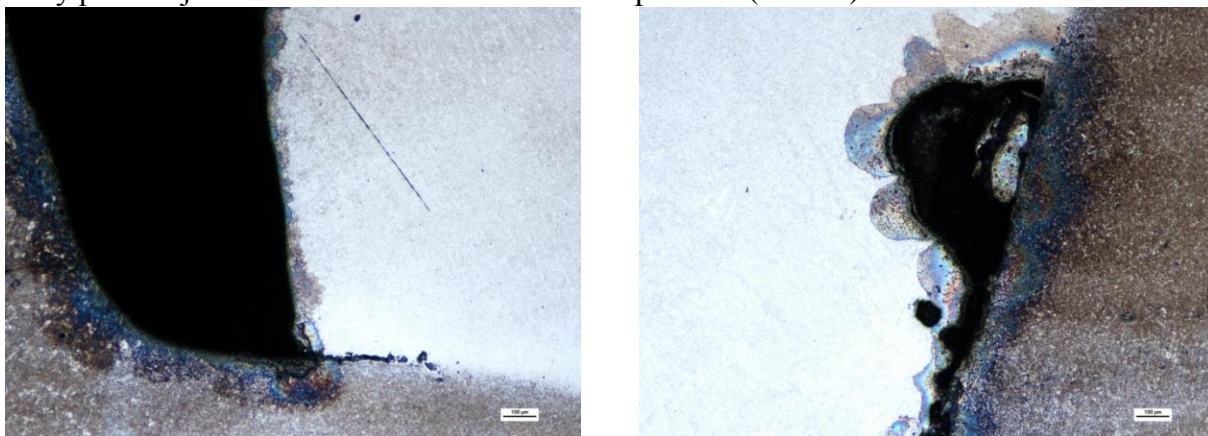
1) 130 A

2) 160 A

3) 190 A

Obr. 47 Makrostruktura vzorků svařovaných drátem DCMS-IG

Vzorek č. 4: Je viditelné špatné provaření vzorku již ze snímku jeho makrostruktury, vady jsou přítomny v dolních rozích vyvařované drážky (obr. 48), další vadou je studený spoj, který pokračuje z levého dolního rohu směrem k povrchu (obr. 49).

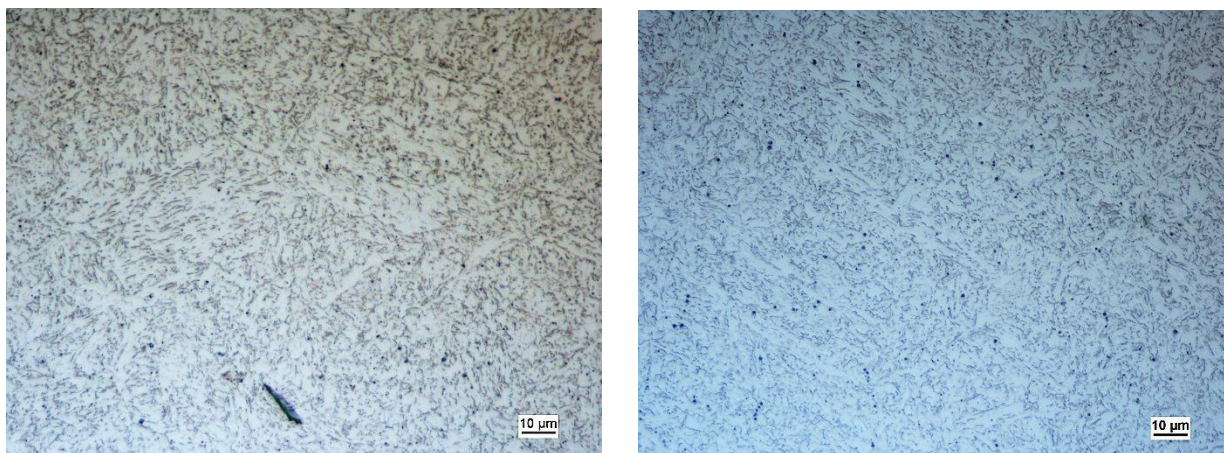


Obr. 48 Vady v dolních rozích vzorku č. 4 (SM 50x)

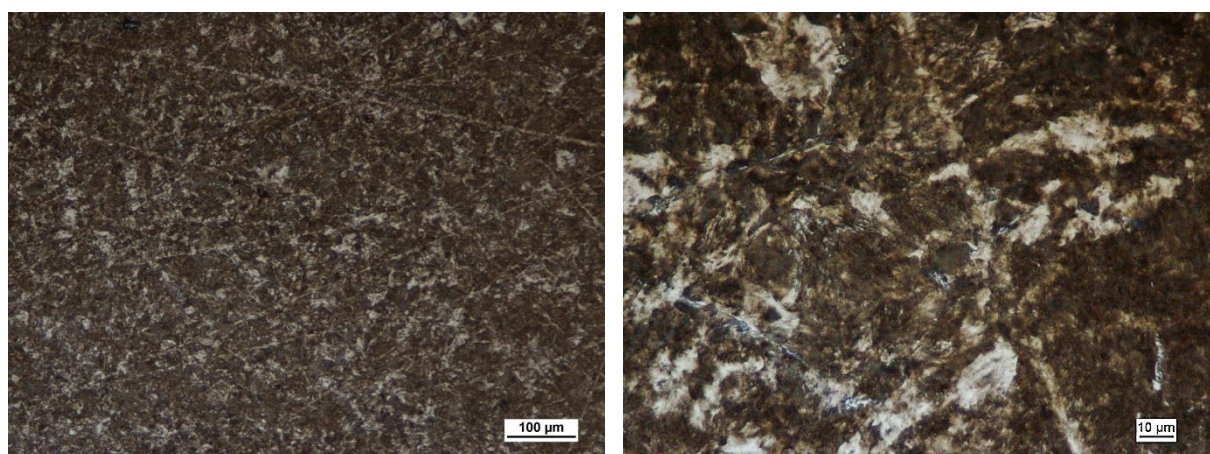


Obr. 49 Studený spoj od levého rohu vzorku č. 4 (SM 50x)

Přídavný materiál DCMS-IG a jeho mikrostruktura se příliš neliší od přídavného materiálu DMO-IG (obr. 50). TOO o velikosti 2 až 2,5 mm (obr. 51) má převážně perlitickou strukturu a neobsahuje žádné trhliny ani zákalné struktury.



Obr. 50 Mikrostruktura přídavného materiálu vzorku č. 4 (SM 500x)



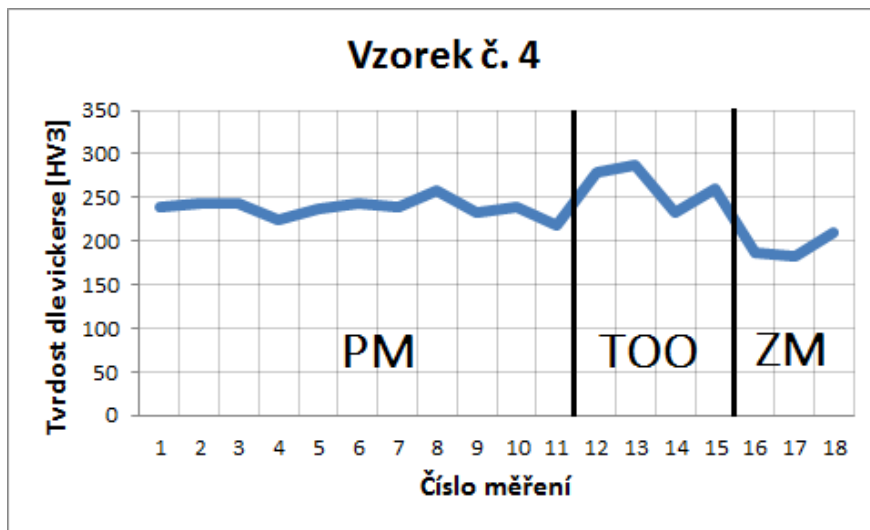
Obr. 51 Mikrostruktura TOO vzorku č. 4 (SM 100x, 500x)

Jednotlivé měření tvrdostí dle Vickerse po svařování vzorku č. 4 přídavným materiálem DCMS-IG jsou uvedeny v tab. 18.

Tab. 18 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 4

Oblast	PM											TOO				ZM		
Měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Tvrdost [HV3]	240	243	245	225	238	244	240	259	232	239	219	278	287	233	261	187	183	210

Tab. 18 byla zpracována do grafu (obr. 52), kde byla znázorněna oblast přídavného materiálu, tepelně ovlivněná oblast a oblast základního materiálu. Do těchto oblastí byly zaneseny naměřené hodnoty tvrdosti.

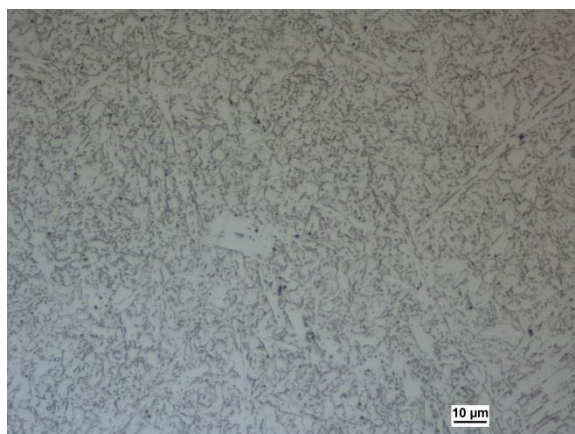


Obr. 52 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 4

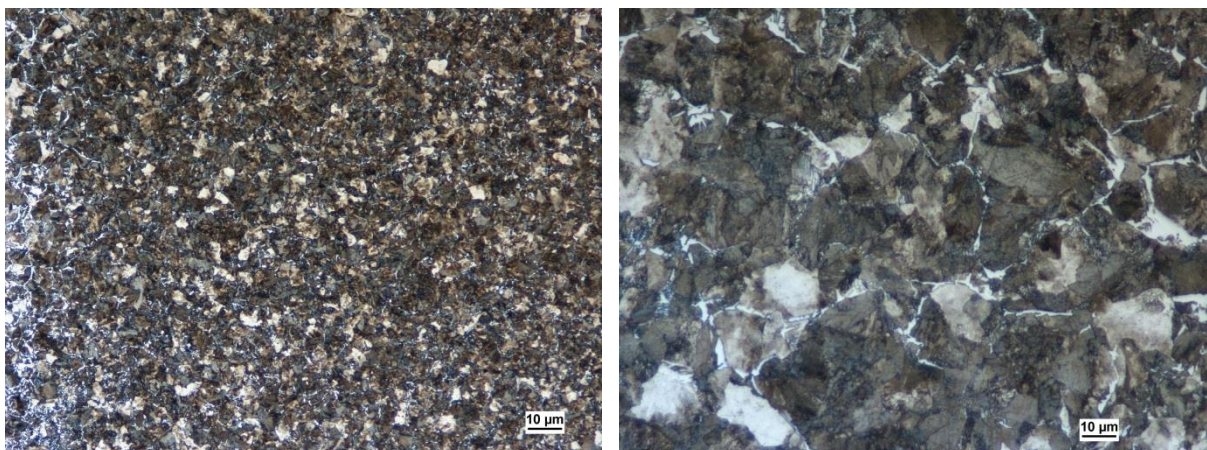
Vzorek č. 5: Vzorek má dobré provaření rohů (obr. 53) i kořene (obr. 54), bez přítomnosti vad TOO má konstantní velikost kolem celého svaru 2 až 3 mm, její perlitická mikrostruktura bez přítomnosti martenzitu je uvedena na obr. 55.



Obr. 53 Provaření rohů bez vad vzorku č. 5 (SM 50x)



Obr. 54 Provaření kořene a mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 5 (SM 50x, 500x)



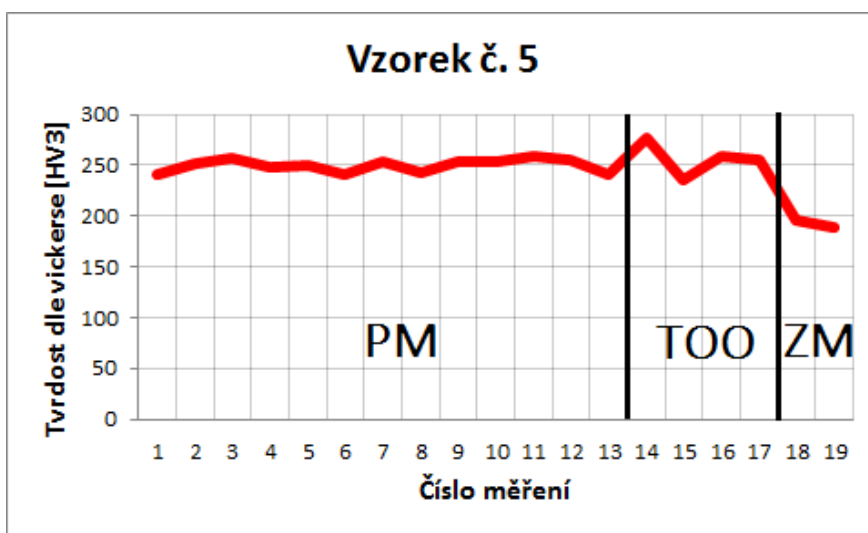
Obr. 55 Mikrostruktura TOO vzorku č. 5 (SM 100x, 500x)

Jednotlivé měření tvrdostí dle Vickerse po svařování vzorku č. 5 přídatným materiálem DCMS-IG jsou uvedeny v tab. 19.

Tab. 19 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 5

Oblast	PM													TOO				ZM	
Měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Tvrdost [HV3]	241	251	257	248	250	241	254	243	254	253	258	255	240	276	335	259	255	196	196

Tab. 19 byla zpracována do grafu (obr. 56), kde byla znázorněna oblast přídatného materiálu, tepelně ovlivněná oblast a oblast základního materiálu. Do těchto oblastí byly zaneseny naměřené hodnoty tvrdostí.

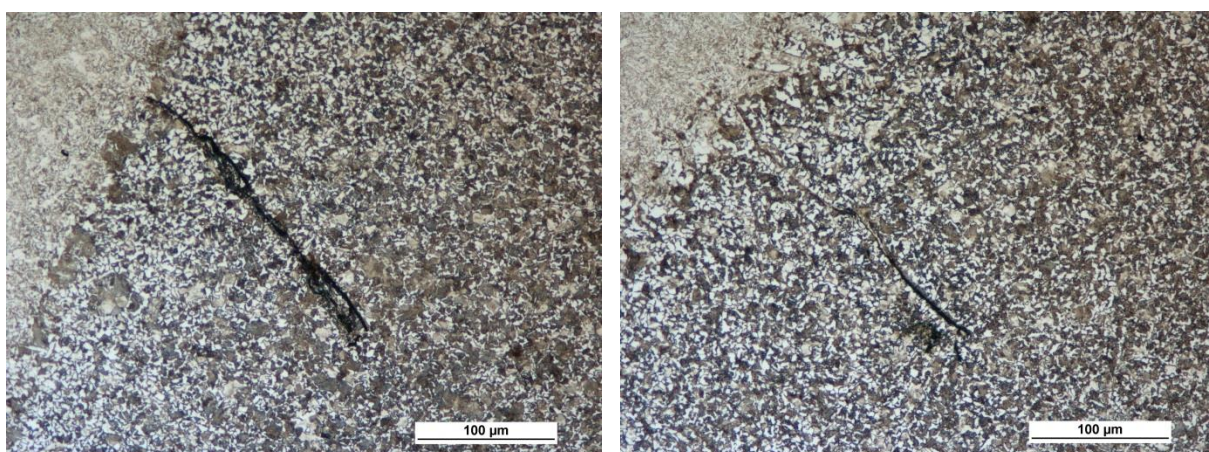


Obr. 56 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 5

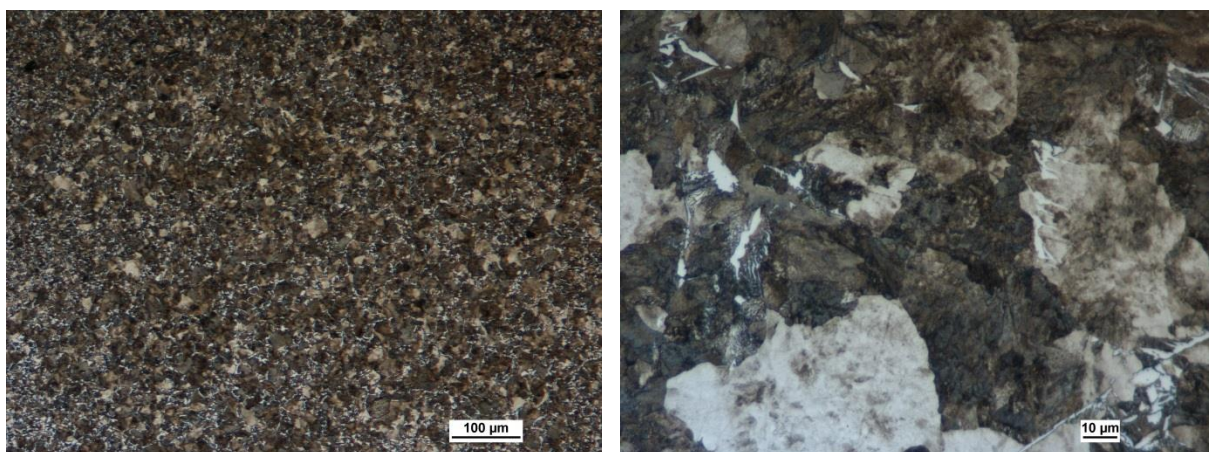
Vzorek č. 6 : Jeho provaření rohu a kořene je uvedeno na obr. 57. Na rozhraní svarového kovu a základního materiálu byly nalezeny trhliny, první trhlina A dlouhá 280 μm vznikla u kořene svaru, druhá trhlina B o velikosti 150 μm je výše v TOO, obě trhliny mají stejný směr (obr. 58). Výsledná mikrostruktura TOO vzorku č. 6 je uvedena na obr. 59. Vlivem velkého vneseného tepla je ze všech tří vzorků největší od 3 až 4 mm.



Obr. 57 Provaření kořene a rohu vzorku č. 6 (SM 50x)



Obr. 58 Trhlina A (vpravo) trhlina B (vlevo) v TOO vzorku č. 6 (SM 200x)



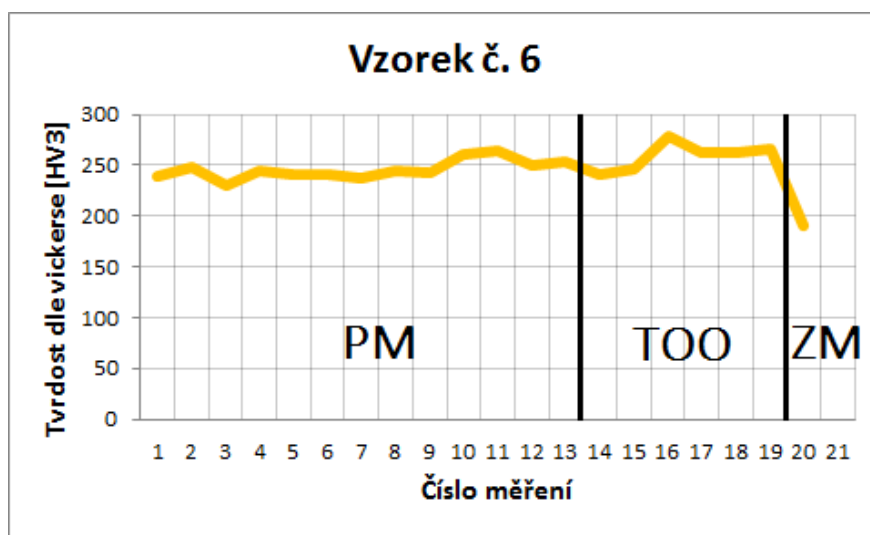
Obr. 59 Mikrostruktura TOO vzorku č. 6 (SM 100x, 500x)

Jednotlivé měření tvrdostí dle Vickerse po svařování vzorku č. 6 přídatným materiálem DCMS-IG jsou uvedeny v tab. 20.

Tab. 20 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 6

Oblast	PM															TOO				ZM
Měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Tvrdość [HV3]	239	248	250	244	240	240	237	245	243	260	265	249	253	241	247	279	262	263	266	190

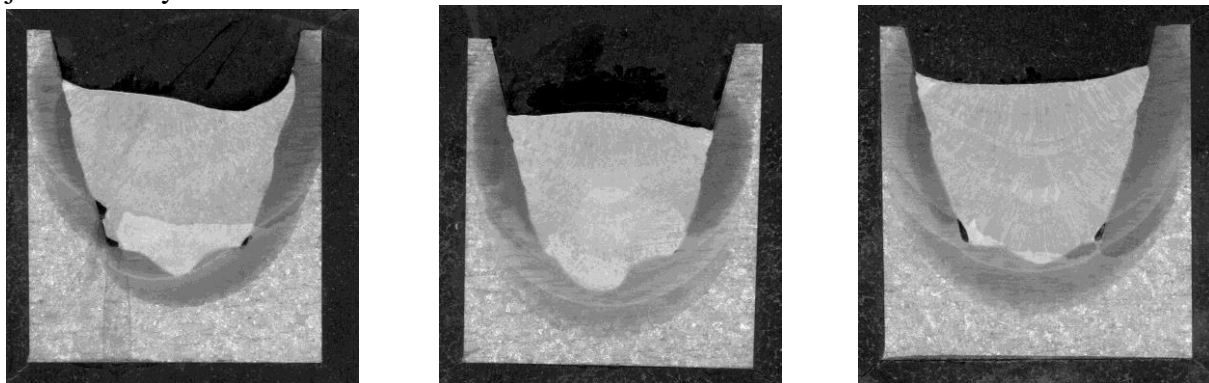
Tab. 20 byla zpracována do grafu (obr. 60), kde byla znázorněna oblast přídatného materiálu, tepelně ovlivněná oblast a oblast základního materiálu. Do těchto oblastí byly zaneseny naměřené hodnoty tvrdostí.



Obr. 60 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 6

4.3.3 Zkoušky svarových spojů svařovaných drátem X70-IG

Výsledné makrostruktury vzorků č. 7, č. 8 a č. 9, které byly svařovány drátem X70-IG jsou uvedeny na obr. 61



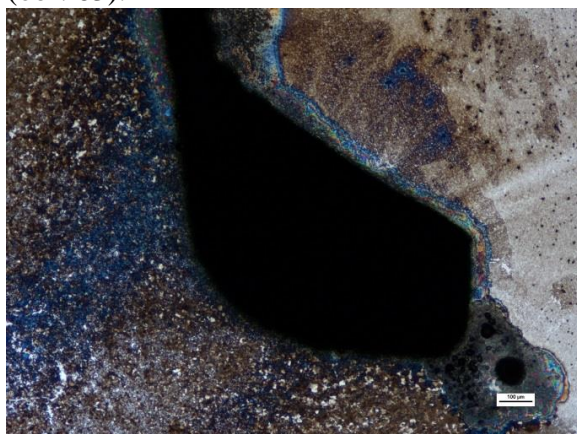
1) 130 A

2) 160 A

3) 190 A

Obr. 61 Makrostruktura vzorků svařovaných drátem X70-IG

Vzorek č. 7: Svařovaný drátem X70-IG vykazuje stejné problémy jako u předchozích testů. Vzorek má nedovařené spodní hrany drážky (obr. 62), mezi druhou a třetí housenkou je viditelný studený spoj, kdy nedošlo ke spojení (obr. 64). Samotné provaření kořene je bez vad (obr. 63).



Obr. 63 Vady v dolních rozích vzorku č. 7 (SM 50x)

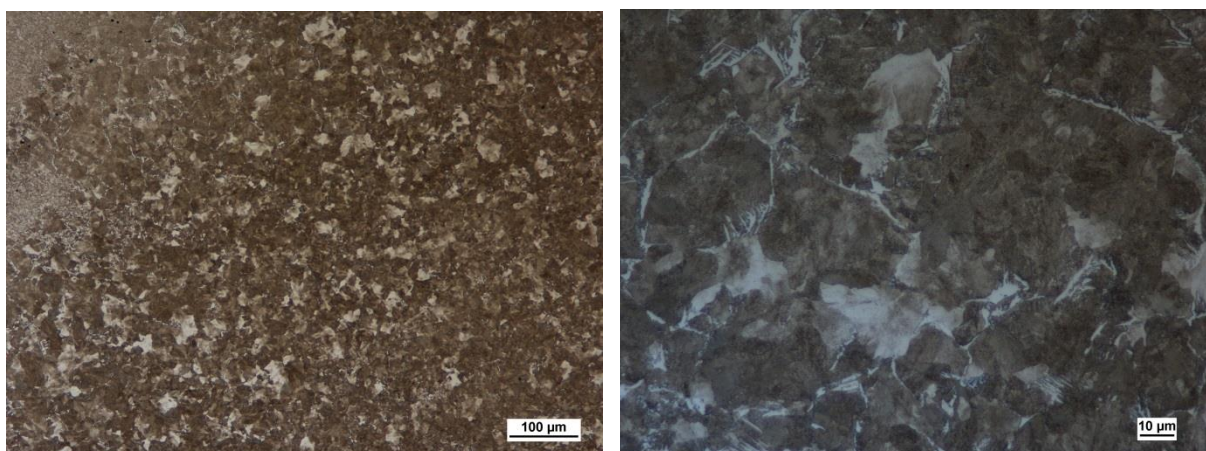


Obr. 63 Provaření kořene svaru vzorku č. 7 (SM 50x)

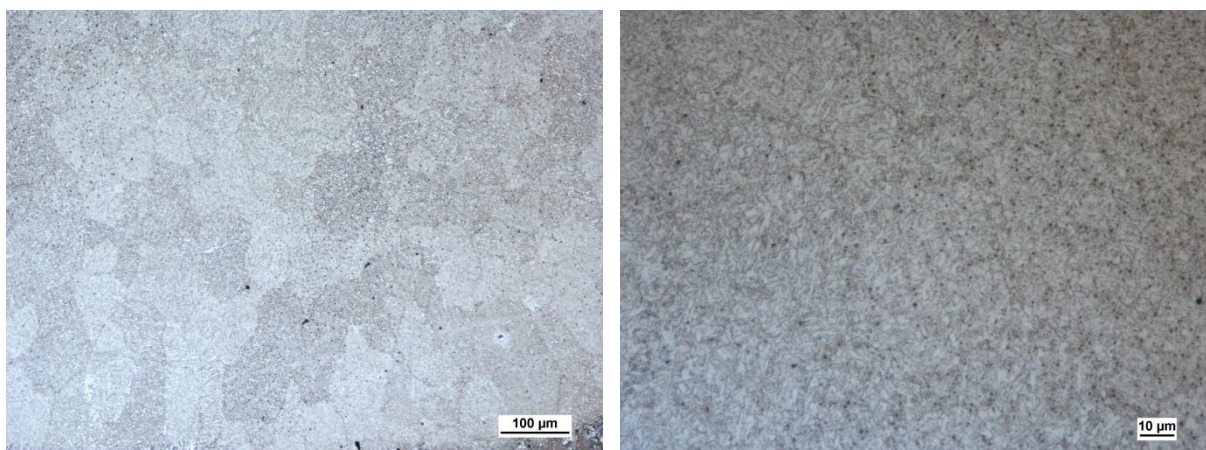


Obr. 64 Studený spoj ve svarovém kovu vzorku č. 7 (SM 50x)

Na obr. 65 je zobrazena mikrostruktura TOO, která má velikost 1 až 2 mm. Na obr. 66 je zobrazena mikrostruktura svarového kovu.



Obr. 65 Mikrostruktura TOO vzorku č. 7 (SM 100x, 500x)



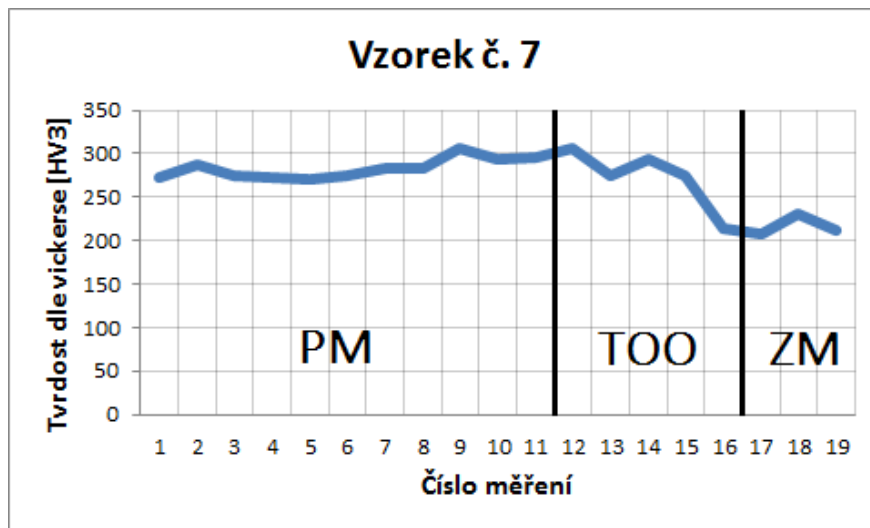
Obr. 66 Mikrostruktura Svarového kovu vzorku č. 7 (SM 100x, 500x)

Jednotlivé měření tvrdostí dle Vickerse po svařování vzorku č. 7 přídatným materiálem X70-IG jsou uvedeny v tab. 21.

Tab. 21 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 7

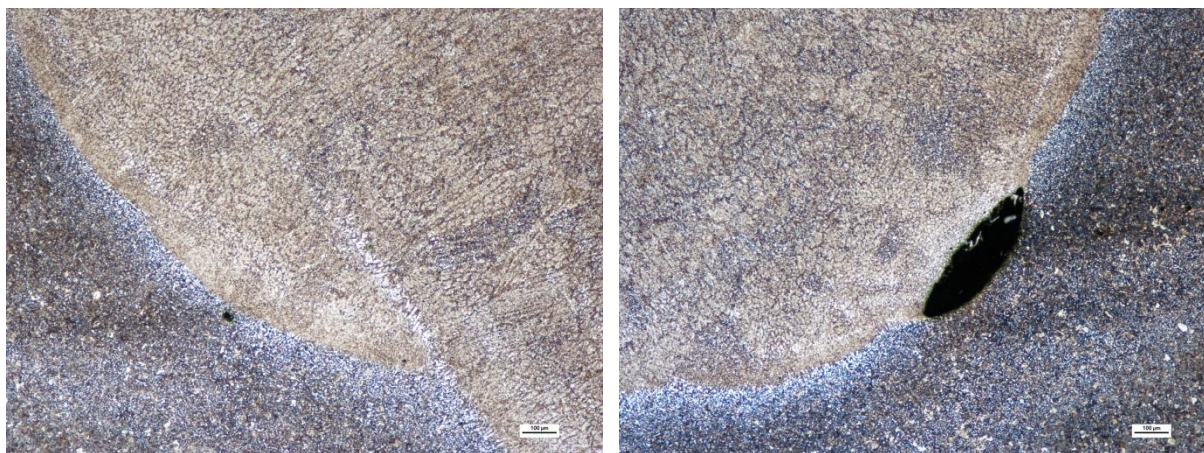
Oblast	PM											TOO				ZM			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Tvrdost [HV3]	273	288	275	273	271	275	283	307	294	295	306	275	294	275	275	215	207	230	212

Tab. 21 byla zpracována do grafu (obr. 67), kde byla znázorněna oblast přídavného materiálu, tepelně ovlivněná oblast a oblast základního materiálu. Do těchto oblastí byly zaneseny naměřené hodnoty tvrdosti.

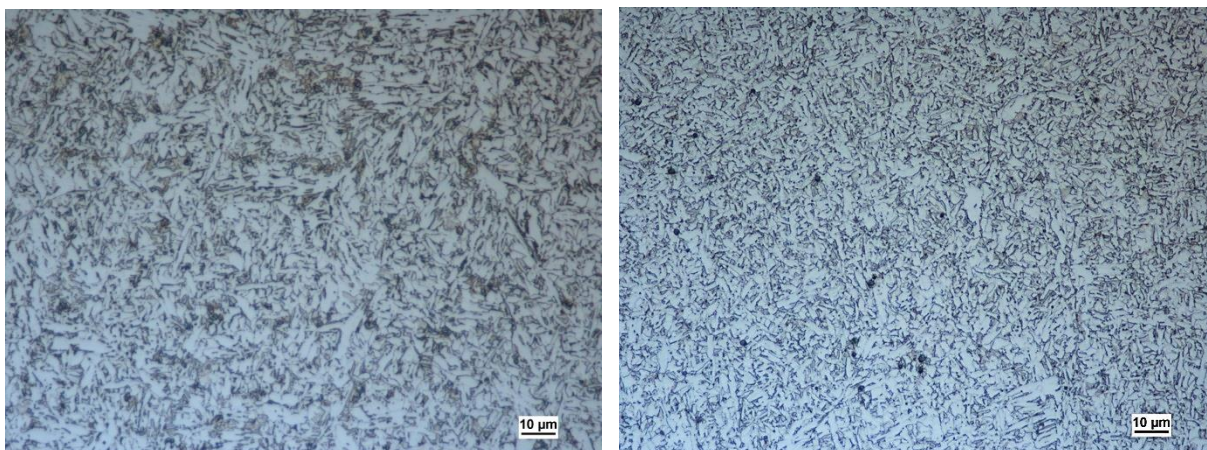


Obr. 67 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 7

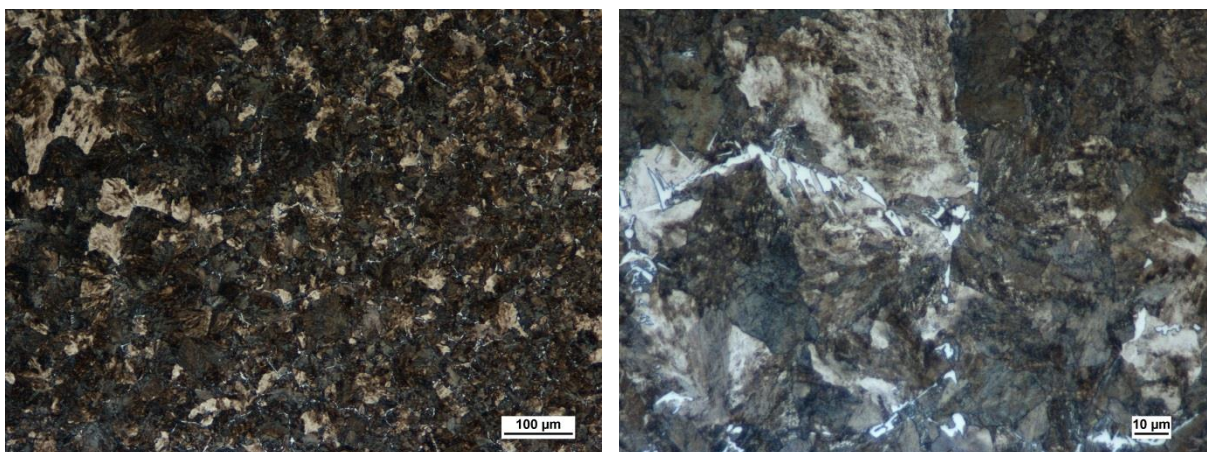
Vzorek č. 8: Má vadu v pravém dolním rohu (obr. 68), levý roh a celý kořen je provařen bez větších vad. Na vzorku nebyly objeveny jiné vady či defekty. Mikrostruktura svarového kovu je uvedena na obr. 69. Velikost TOO je 3 mm, její mikrostruktura je uvedena na obr. 70.



Obr. 68 Provaření kořene a vady vzorku č. 8 (SM 50x)



Obr. 69 Mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 8 (SM 500x)



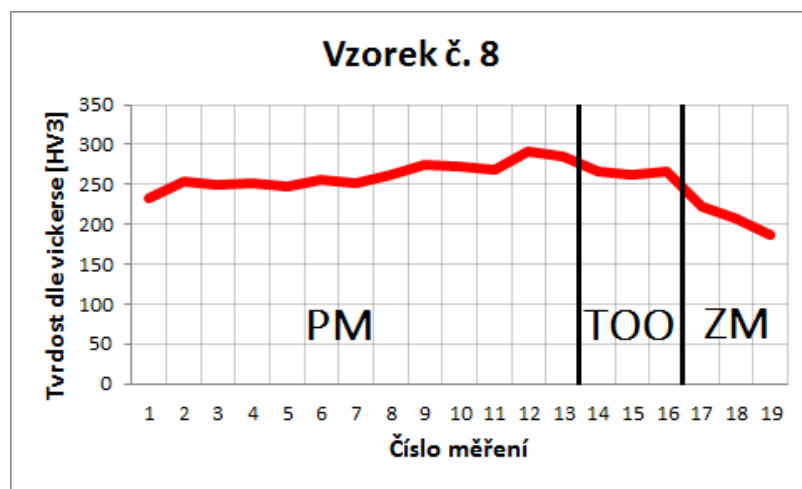
Obr. 70 Mikrostruktura TOO vzorku č. 8 (SM 100x,500x)

Jednotlivé měření tvrdostí dle Vickerse po svařování vzorku č. 8 přídatným materiálem X70-IG jsou uvedeny v tab. 22.

Tab. 22 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 8

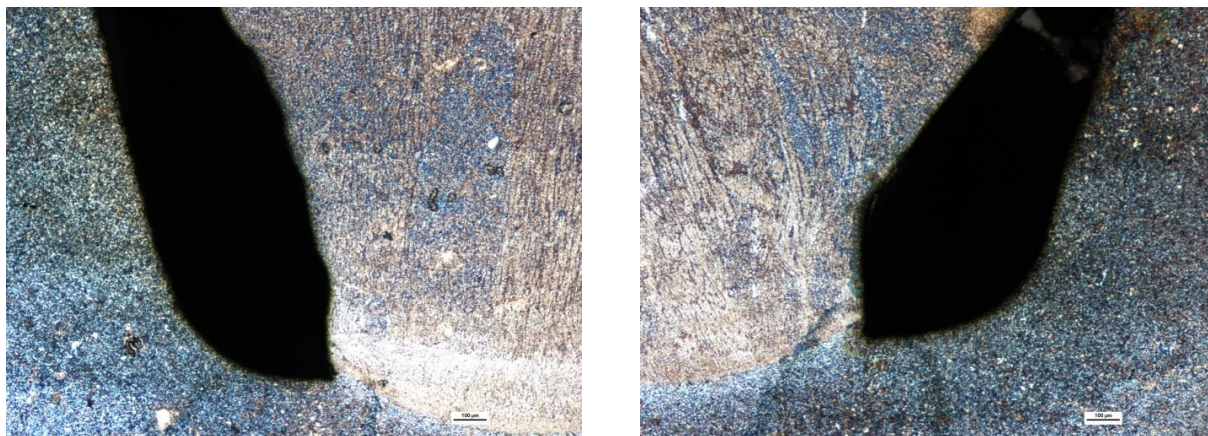
Oblast	PM											TOO				ZM			
Měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Tvrdość [HV3]	232	253	249	252	247	255	251	263	275	272	269	291	286	266	262	266	223	208	186

Tab. 22 byla zpracována do grafu (obr. 71), kde byla znázorněna oblast přídavného materiálu, tepelně ovlivněná oblast a oblast základního materiálu. Do těchto oblastí byly zaneseny naměřené hodnoty tvrdostí.



Obr. 71 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 8

Vzorek č. 9: Má v obou rozích drážky velké vady (obr. 72). Kořen je provařen bez vad (obr. 73). V levém dolním rohu je přítomna trhлина A o velikosti 200 μ m (obr. 74), další trhлина B dlouhá 60 μ m je výše na pravé straně v TOO (obr.75). Mikrostruktura svarového kovu je uvedena na obr. 76. Velikost TOO je od 2 do 3,5 mm, mikrostruktura je uvedena na obr. 78.



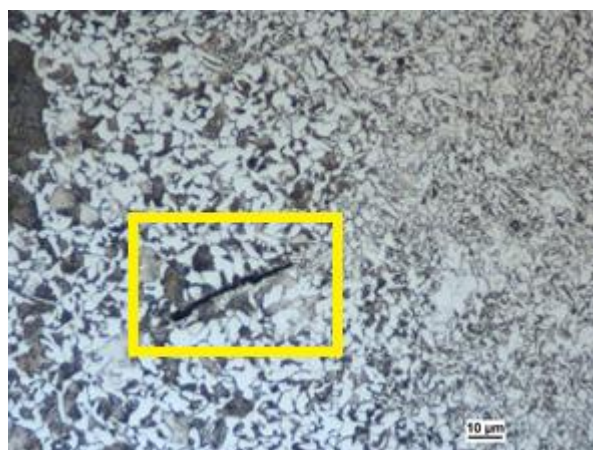
Obr. 72 Nedovařené rohy v drážce vzorku č. 9 (SM 50x)



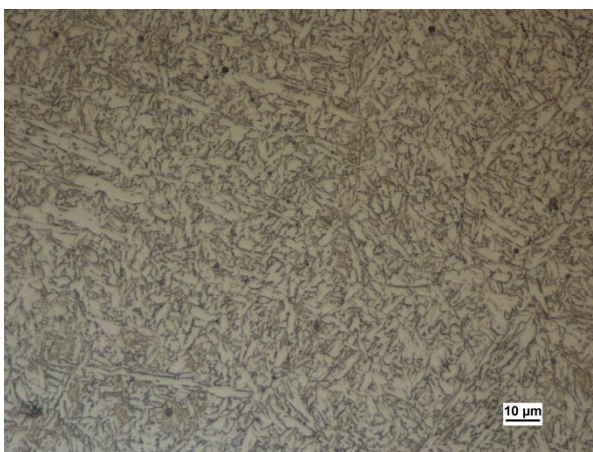
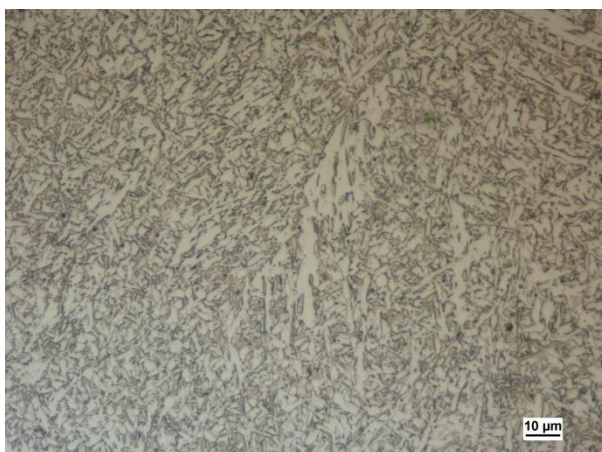
Obr. 73 Provaření kořene svaru (SM 50x)



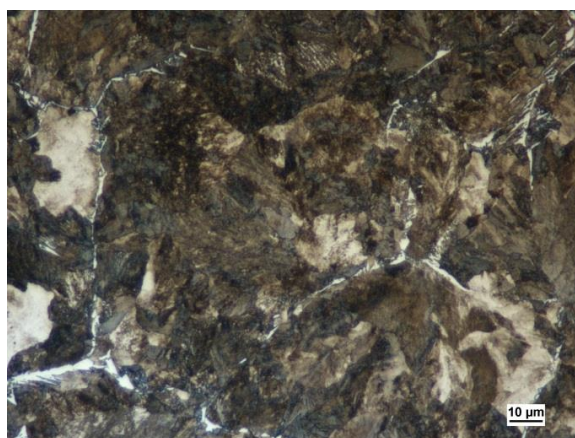
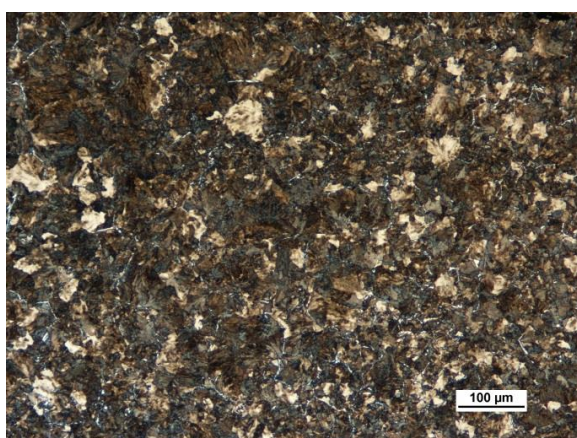
Obr. 74 Trhlina A na rozhraní svarového kovu a základního materiálu vzorku č. 9 (SM 200x)



Obr. 75 Trhlina B na pravé straně v TOO vzorku č. 9 (SM 500x)



Obr. 76 Mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 9 (SM 500x)



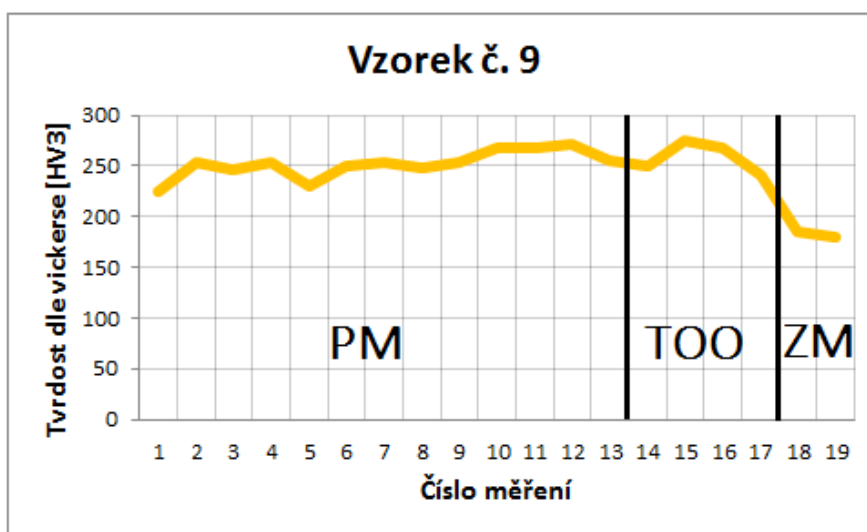
Obr. 77 Mikrostruktura TOO vzorku č. 9 (SM 100x, 500x)

Jednotlivé měření tvrdostí dle Vickerse po svařování vzorku č. 9 přídatným materiálem X70-IG jsou uvedeny v tab. 23.

Tab. 23 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č. 9

Oblast	PM													TOO			ZM		
Měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Tvrdość [HV3]	224	253	247	254	231	249	254	248	254	267	267	271	255	249	275	268	240	185	180

Tab. 23 byla zpracována do grafu (obr. 78), kde byla znázorněna oblast přídavného materiálu, tepelně ovlivněná oblast a oblast základního materiálu. Do těchto oblastí byly zaneseny naměřené hodnoty tvrdostí.



Obr. 78 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 9

4.4 Vyhodnocení experimentu

Výsledky z hodnocení makrostruktury, mikrostruktury a měření tvrdosti vzorků č. 1 až č. 9 byly sepsány do několika souhrnných výsledků:

- makroskopické zkoumání vzorků ukázalo, že vzorky č. 1, č. 4 a č. 7 svařované na nejnižší proud, který měl velikost 130 A, měly vady v dolních rozích drážky,
- vzorky č. 2, č. 5 a č. 8 svařované střední hodnotou svařovacího proudu 160 A, mají dobré provaření kořene bez větších vad, v TOO nebyly přítomny žádné trhliny,
- hodnota svařovacího proudu 190 A zapříčinila u vzorku č. 3, č. 6 a č. 9, přítomnost trhlín v TOO.
- tab. 24 ukazuje, velikosti jednotlivých TOO vzorků č. 1 až č. 9 v závislosti na svařovacím proudu, svarovém kovu a tepelném příkonu,

Tab. 24 Porovnání velikostí TOO

Vzorek č.	Velikost TOO [mm]	Svarový kov	Svařovací proud [A]	Tepelný příkon [kJ/mm]
1	1 až 2,5	DMO-IG	130	0,9
2	2 až 2,5		160	1,09
3	2,5 až 4		190	1,5
4	2 až 2,5	DCMS-IG	130	0,95
5	2 až 3		160	1,13
6	3 až 4		190	1,4
7	1 až 2	X70-IG	130	0,92
8	3		160	1,12
9	2 až 3,5		190	1,37

- zkoumání mikrostruktury vzorků ukázalo převážně perlitickou strukturu s malým objemem feritu, bez přítomnosti martenzitu v TOO u všech vzorků, kromě vzorku č. 1, kde vznikly zákalné struktury v TOO,
- mikrostruktura svarového kovu byla tvořena jehlicovitým feritem u všech tří přídavných materiálů.
- hodnoty tvrdostí vzorků č. 1 až č. 9 byly rozděleny podle měřených oblastí (PM, TOO a ZM) a byly zpracovány do tab. 25,

Tab. 25 Minimální a maximální hodnoty tvrdostí jednotlivých oblastí vzorků

Vzorek č.	Svarový kov	PM [HV3]		TOO [HV3]		ZM [HV3]	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	DMO-IG	198	223	277	317	179	206
2		196	224	254	276	180	196
3		186	214	239	306	192	209
4	DCMS-IG	219	259	233	287	183	210
5		240	258	235	276	196	196
6		237	265	262	279	190	190
7	X70-IG	271	307	275	294	207	230
8		232	275	262	291	186	266
9		224	271	240	275	180	185

4.5 Diskuze výsledků

Ze všech sledovaných parametrů nejvíce ovlivňuje svařovací proces hodnota svařovacího proudu, která řídí hodnotu tepelného příkonu. U všech vzorků svařovaných proudem 130 A došlo k neprovaření rohů drážek a ke studeným spojům. Naopak vzorky svařované proudem 190 A obsahovaly ve struktuře svarového spoje trhliny v TOO. Ve vzorcích svařovaných proudem 160 A při vneseném teple okolo 1,1 kJ/mm, nebyly nalezeny žádné kritické vady.

Bylo zjištěno, že hodnota svařovacího proudu ovlivňuje velikost TOO. Se vzrůstající hodnotou svařovacího proudu tj. i se zvětšující se hodnotou tepelného příkonu, vzrůstá šířka TOO. Nicméně strukturní charakteristika TOO zůstává zachována. Skládá se s perlitu a feritu bez ohledu na aplikovaný svařovací proud. Tento fakt lze dokázat naměřenými tvrdostmi TOO, které se pohybovaly u všech vzorků v rozmezí 235 až 310 HV3. Výjimkou byl vzorek č. 1, u kterého byla zjištěna lokální přítomnost martenzitu v TOO. Byla naměřena tvrdost až 320 HV.

Použité přídavné materiály ovlivňovaly tvrdosti svarového kovu. Nejmenší tvrdost byla měřena u drátu DMO-IG (185-225 HV3). U drátu DCMS byla měřena tvrdost v rozmezí od 220 do 265 HV3. Největších tvrdostí dosahují vzorky svařené drátem X70-IG (224 až 307 HV3). Nebyl prokázán vliv použitých přídavných materiálů na ostatní charakteristiky svarových spojů. Mikrostruktura svarového spoje je vždy Widmanstättenova typu. Šířka a mikrostruktura TOO zůstává neovlivněna. Zjištěné defekty ve svarových spojích nemají spojitost s použitým svařovacím drátem.

Při použití střední hodnoty testovaného svařovacího proudu (160 A) byly dosaženy svarové spoje bez trhlín s neprůvody o velikosti max. 0,3 mm, ačkoliv nebyl aplikován předehřev. U vzorku č. 5 svařené drátem DCMS-IG nebyly detekovány žádné vady.

5 ZÁVĚRY

Pro splnění stanovených cílů byla provedena rešerše současného stavu poznání svařování uhlíkových ocelí. Byly shrnuty poznatky o svařování uhlíkových ocelí. Byl definován vliv chemického složení na předehřev uhlíkových ocelí. Závěrečná část teoretické práce popisuje metody svařování. U technologie svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu jsou definovány základní svařovací parametry působící na výslednou kvalitu svarového spoje.

Experimentální část prokázala vliv vybraných parametrů svařování metody MAG na výslednou charakteristiku svarových spojů. Klíčovým faktorem je volba svařovacího proudu ovlivňující množství vneseného tepla (Q) do svaru. Nízké hodnoty vneseného tepla se projevují studenými spoji a neprůvody ve svarových spojích. Naopak vysoké hodnoty způsobují vznik trhlin v TOO. Byl potvrzen vztah mezi vneseným teplem a dosaženou šířkou TOO.

Použití různých svařovacích drátů neprokázalo vliv na strukturu a šířku TOO. Přestože nebyla zjištěna změna v mikrostrukturu různých svarových kovů, výsledná naměřená tvrdost svarového kovu odpovídá chemickému složení aplikovaného přídavného drátu.

Přestože nebyl aplikován předehřev, byla nalezena kombinace svařovacích parametrů, které umožnily dosažení svarového spoje prostého defektů v daných podmínkách.

Přestože stanovené cíle práce byly splněny, bylo by vhodné ověření dosažených výsledků na větší sérii vzorků s možností detailnějšího prozkoumání vlivu jednotlivých parametrů s využitím širšího spektra vyhodnocovacích analýz.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] FOLDYNA, Václav, Karel HENNHOFFER, Věra OLŠANOVÁ, Ivo HLAVATÝ, Jaroslav KOUKAL, František KRISTOFORY, Vladislav OCHODEK, Václav PILOUS, Jaroslav PURMENSKÝ, Drahomír, SCHWARZ a Július VESELKO. Materiály a jejich svařitelnost. 2 vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3. Kolektiv autorů, materiály a jejich svařitelnost
- [2] ORSZÁGH, Peter a Viktor ORSZÁGH. Zváranie MIG/MAG ocelí a neželezných kovov. Bratislava: Polygrafia SAV, 2000. ISBN 80-887-8036-5.
- [3] Introduction to Carbon Steel Flanges - kinnari1250's diary. kinnari1250's diary [online]. Dostupné z: <http://kinnaristeel.hatenablog.com/entry/2016/04/30/200340>
- [4] TRUBKA IVAR.C - STEEL | IVAR CS : komponenty pro vodu, vytápění a plyn. IVAR CS : komponenty pro vodu, vytápění a plyn[online]. Copyright © IVAR CS spol. s r. o., 2019, [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.ivarcs.cz/katalog/vytapeni-ivartrio/trubka-ivar-c-steel-p140309/>
- [5] ČSN EN 1011-2 (052210) A Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů. Část 2, Obloukové svařování feritických ocelí = Welding - Recommendations for welding of metallic materials. Part 2, Arc welding of ferritic steels. Praha: Český normalizační institut, 2002. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [6] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [7] AVELLON, Guy. STEELS. American Fastener Journal. American Fastener Journal, 2012, 28(6), 5254. ISSN 10643834. Dostupné také z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=84383591&lang=cs&site=ehost-live>
- [8] Nadměrné ocelářské kapacity ve světě - Ocelářská Unie. Úvod - Ocelářská Unie [online]. Copyright © 2019 Ocelářská Unie [cit.21.05.2019].Dostupné z: <https://www.ocelarskaunie.cz/nadmerne-ocelarske-kapacity-ve-svete/>
- [9] DIAO, Jiang, Wang ZHOU, Zhaoqun KE, Yong QIAO, Tao ZHANG, Xuan LIU a Bing XIE. System assessment of recycling of steel slag in converter steelmaking. Journal of Cleaner Production. 2016, 125(1), 159-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.040>. ISSN 0959-6526. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261630107X>
- [10] Bolzano [Úvod [online].Copyright © [cit.21.05.2019]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnos_i_C60.pdf

- [11] Difference Between Low, Medium & High Carbon Steel - World Steel Grades. World Steel Grades Equivalent - US ASTM AISI SAE, European EN, Japan JIS Standard [online]. Copyright © 2019 [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.worldsteelgrades.com/low-medium-high-carbon-steel/>
- [12] Classification of Carbon and Low-Alloy Steels. Total Materia - The world's most comprehensive materials database [online]. Copyright © 2015 Key to Metals AG. All Rights Reserved. [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/articles/Art62.htm?fbclid=>
- [13] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [14] Reliance Foundry Co. Ltd.: | Outdoor Products & Metal Casting [online]. 2017 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.reliance-foundry.com/blog/carbon-steel-mild-steel#gref>
- [15] Fundamentals of Carbon Steel Part 1 - Phases & Microstructures | LFF Group. Major supplier of pipes, fittings, flanges and valves | LFF Group [online]. Copyright © British Steel [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.lff-group.com/posts/carbon-steel-fundamentals-part-1>
- [16] Fundamentals of Carbon Steel Part 2 - Heat Treatment | LFF Group. Major supplier of pipes, fittings, flanges and valves | LFF Group [online]. Copyright © 2018 LFF Group. All Rights Reserved [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.lff-group.com/posts/fundamentals-of-carbon-steel-part-2>
- [17] Fundamentals of Carbon Steel Part 3 - Microstructures | LFF Group. Major supplier of pipes, fittings, flanges and valves | LFF Group [online]. Copyright © 2018 LFF Group. All Rights Reserved [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.lff-group.com/posts/fundamentals-of-carbon-steel-part-3>
- [18] SKÁLOVÁ, Jana, Vladislav MOTYČKA a Jaroslav KOUTSKÝ. Nauka o materiálech. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2677-0.
- [19] Jak se vyrábí a zpracovává ocel - Ocelářská Unie. Úvod - Ocelářská Unie [online]. Copyright © 2019 Ocelářská Unie [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.ocelarskaunie.cz/jak-se-vyrabi-a-zpracovava-ocel/>
- [20] EN 1.1221 (C60E) Non-Alloy Steel :: MakeItFrom.com. MakeItFrom.com: Material Properties Database [online]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.1221-C60E-Non-Alloy-Steel>

[21] Carbon Steel - an overview | ScienceDirect Topics. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © 2019 Elsevier B.V. or its licensors or contributors. ScienceDirect [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/carbon-steel>

[22] ISSF: International Stainless Steel Forum [online]. Copyright © [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf

[23] OLSON D.L. a kolektiv autorů. ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6,: vyd. Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.

[24] KOUKAL J., ZMYDLENÝ T., Svařování I. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6.

[25] TIG - svařování, sváření, svářecí metody | Svářecí technika Schinkmann.cz. Svářecí technika Schinkmann.cz [online]. Copyright © 1991 [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/tig>

[26] Svařování plazmou | Svářecí technika Schinkmann.cz. Svářecí technika Schinkmann.cz [online]. Copyright © 1991 [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/svarovani-plazmou>

[27] ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE [online]. Copyright ©X [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf

[28] Laserové svařování - svařování laserem - LaserTherm. Lasery pro průmyslové technologie, laserové systémy - LaserTherm [online]. Copyright © 2019 [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-svarovani/>

[29] ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE [online]. Copyright © [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf

[30] ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE [online]. Copyright © [cit. 21.05.2019]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_svazkem_elektronu_2013_mrna.pdf

[31] Výukový materiál, Svařování metodou MIG (131) a MAG (132)[online]. Copyright © [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/07-08-131-135.pdf>

[32] TREJTNAR, Josef. Destruktivní zkoušky svarových spojů [online]. 2017 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/destruktivni-zkousky-svarovych-spoju>

- [33] SŠ-COPT Kroměříž [online]. Copyright ©N [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=14603&revision=-1&instance=2>
- [34] Voestapline Böhler welding katalog [online]. Copyright © [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.bohler-uddeholm.cz/media/katalog%202018.pdf>
- [35] TPS 500i. [online]. Copyright © 2019 Fronius International GmbH [cit.22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cscz/czech-republic/perfect-welding/perfect-welding/vyroby/ruční-svařování/migmag/tpsi/tpsi/tps-500ii>
- [36] Ochranné plyny | Linde Gas a.s.. 301 Moved Permanently [online]. Copyright © Linde 2019 [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: https://www.lindgas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/shielding_gases/index.html
- [37] DVOŘÁK, M., A KOLEKTIV, Technologie II, nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2001, 238s, ISBN 80-214-2032-4
- [38] MIG-MAG Welding Process | Oerlikon. Oerlikon | The expert for industrial Welding and Cutting [online]. Copyright © Oerlikon 2019 [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.oerlikon-welding.com/processes/mig-mag-welding-process>
- [39] Citace PRO VUT v Brně. Citace PRO VUT v Brně [online]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
Ac1	Teplota překrystalizace	[°C]
Ac3	Teplota překrystalizace	[°C]
ARA	Diagram anizotermického rozpadu austenitu	[-]
C _c	Ekvivalent chemického složení dle Seferiána	[%]
C _e	Uhlíkový ekvivalent	[%]
C _p	Ekvivalent pro výpočet teploty přehřevu dle Seferiána	[-]
C _s	Ekvivalent podle tloušťky materiálu dle Seferiána	[mm]
CE	Uhlíkový ekvivalent CE	[%]
CET	Uhlíkový ekvivalent CET	[%]
d	Tloušťka plechu	[mm]
HD	Obsah difuzního vodíku	[ml/100g]
I	Svařovací proud	[A]
MAG	Metal Aktiv Gas	[-]
MIG	Metal Inert Gas	[-]
PM	Přídavný materiál	[-]
Q	Tepelný příkon	[kJ/mm]
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti	[Mpa]
s	Tloušťka plechu	[mm]
SM	Světelná mikroskopie	[-]
TIG	Tungsten Inert Gas	[-]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[°C]
Tp	Teplota přehřevu	[°C]
TpD	Teplota přehřevu v závislosti na tloušťce plechu	[°C]
TpHD	Teplota přehřevu v závislosti na obsahu vodíku ve svarovém kovu	[°C]
TpQ	Teplota přehřevu v závislosti na tepelném příkonu	[°C]
TpCET	Teplota přehřevu v závislosti na uhlíkovém ekvivalentu CET	[°C]
TZ	Tepelné zpracování	[-]
U	Svařovací napětí	[V]
v	Svařovací rychlost	[mm/s]
Z	Kontrakce	[%]
ZM	Základní materiál	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Použití uhlíkových ocelí	9
Obr. 2 Polotovary s uhlíkové oceli	11
Obr. 3 Rozdělení ocelí ke tváření	11
Obr. 4 Vysoká pec	13
Obr. 5 Schéma výroby oceli	13
Obr. 6 Válcování svitku plechu za tepla	14
Obr. 7 Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku způsobenou přítomností martenzitu.....	17
Obr. 8 Přehled základních metod svařování a jejich značení	19
Obr. 9 Princip metody ručního obloukového svařování	20
Obr. 10 Princip metody TIG	21
Obr. 11 Princip metody svařování plasmou.....	22
Obr. 12 Princip svařování laserem.....	23
Obr. 13 Princip metody svařování elektronovým paprskem	24
Obr. 14 Pracovní prostředí typů přenosu kovu při svařování MIG/MAG.....	25
Obr. 15 Princip metody MIG/MAG	26
Obr. 16 Mikrostruktura použité oceli C60E (SM 100x, 500x).....	28
Obr. 17 Vzhled a rozměry vyvařované drážky	30
Obr. 18 Svařovací zařízení Fronius	30
Obr. 19 Ovládací panel stroje	31
Obr. 20 Poloha svařování PA	32
Obr. 21 Průběh svařovacího procesu	32
Obr. 22 Výsledné svarové spoje svařované drátem DMI-IG (zleva 130 A, 160 A, 190 A).....	33
Obr. 23 Výsledné svarové spoje svařované drátem DCMS-IG (zleva 130 A, 160 A, 190 A)34	
Obr. 24 Výsledné svarové spoje svařované drátem X70-IG(zleva 130 A, 160 A, 190 A) 35	
Obr. 25 Rozřezání vzorků na pásové pile Daito	36
Obr. 26 Vzorky po rozřezání na stroji Sodick	36
Obr. 27 Metalografická pila Struers Discotom-6.....	37
Obr. 28 Brousící stroj Struers Tegramin-30 a zalitý vzorek.....	37
Obr. 29 Mikroskop Nikon a tvrdoměr Durascan	38
Obr. 30 Vzdálenost vpichů při měření tvrdosti HV3.....	38
Obr. 31 Makrostruktura vzorků svařovaných drátem DMO-IG	39
Obr. 32 Vady v dolních rozích vzorku č. 1 (levý a pravý roh) (SM 50x)	39
Obr. 33 Provaření kořene vzorku č. 1 (SM 50x, 100x)	40
Obr. 34 Vady v mikrostrukturu vzorku č. 1 (SM 50x)	40
Obr. 35 Mikrostruktura TOO vzorku č. 1 (SM 100x, 500x)	40
Obr. 36 Mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 1 (SM 100x, 500x)	41
Obr. 37 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 1	41
Obr. 38 Mikrostruktura s vadami kořene vzorku č. 2 (levý a pravý roh), (SM 50x).....	42
Obr. 39 Mikrostruktura TOO vzorku č. 2 (SM 50x, 500x)	42
Obr. 40 Mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 2 (SM 500x)	42
Obr. 41 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 2.....	43
Obr. 42 Provaření kořene a vada v oblasti styku housenek vzorku č. 3 (SM 100x, 50x).....	44
Obr. 43 Trhlina A v TOO vzorku č. 3 (SM 200x, 500x)	44
Obr. 44 Trhlina B v TOO vzorku č. 3 (SM 200x, 500x)	44
Obr. 45 Mikrostruktura TOO vzorku č. 3 (SM 50x, 500x)	45
Obr. 46 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 3.....	45
Obr. 47 Makrostruktura vzorků svařovaných drátem DCMS-IG	46
Obr. 48 Vady v dolních rozích vzorku č. 4 (SM 50x)	46
Obr. 49 Studený spoj od levého rohu vzorku č. 4 (SM 50x)	46

Obr. 50 Mikrostruktura přídavného materiálu vzorku č. 4 (SM 500x).....	45
Obr. 51 Mikrostruktura TOO vzorku č. 4 (SM 100x, 500x)	46
Obr. 52 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 4.....	48
Obr. 53 Provaření rohů bez vad vzorku č. 5 (SM 50x).....	48
Obr. 54 Provaření kořene a mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 5 (SM 50x, 500x).....	48
Obr. 55 Mikrostruktura TOO vzorku č. 5 (SM 100x, 500x)	49
Obr. 56 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 5.....	49
Obr. 57 Provaření kořene vzorku č. 6 (SM 50x)	50
Obr. 58 Trhlina A (vpravo) trhlina B (vlevo) v TOO vzorku č. 6 (SM 200x).....	50
Obr. 59 Mikrostruktura TOO vzorku č. 6 (SM 100x, 500x)	50
Obr. 60 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 6.....	51
Obr. 61 Makrostruktura vzorků svařovaných drátem X70-IG	52
Obr. 62 Vady v dolních rozích vzorku č. 7 (SM 50x)	52
Obr. 63 Provaření kořene svaru vzorku č. 7 (SM 50x).....	52
Obr. 64 Studený spoj ve svarovém kovu vzorku č. 7 (SM 50x).....	52
Obr. 65 Mikrostruktura TOO vzorku č. 7 (SM 100x, 500x)	53
Obr. 66 Mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 7 (SM 100x, 500x)	53
Obr. 67 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 7.....	54
Obr. 68 Provaření kořene a vady vzorku č. 8 (SM 50x).....	54
Obr. 69 Mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 8 (SM 500x)	55
Obr. 70 Mikrostruktura TOO vzorku č. 8 (SM 100x, 500x)	55
Obr. 71 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 8.....	56
Obr. 72 Nedovařené rohy v drážce vzorku č. 9 (SM 50x).....	56
Obr. 73 Provaření kořene svaru (SM 50x).....	56
Obr. 74 Trhlina A na rozhraní svarového kovu a základního materiálu vzorku č. 9 (SM 200x)	57
Obr. 75 Trhlina B na pravé straně v TOO vzorku č. 9 (SM 500x).....	57
Obr. 76 Mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 9 (SM 500x)	57
Obr. 77 Mikrostruktura TOO vzorku č. 9 (SM 100x, 500x)	57
Obr. 78 Graf tvrdostí v jednotlivých oblastech vzorku č. 9.....	58

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Obsah legujících prvků.....	12
Tab. 2 Rozdělení uhlíkových ocelí	12
Tab. 3 Ekvivalentní značení ocelí.....	12
Tab. 4 Chemické složení oceli C60E dle ČSN EN 10083.....	15
Tab. 5 Přehled mechanických vlastností oceli C60E.....	16
Tab. 6 Přehled tepelného zpracování oceli C60E	16
Tab. 7 Chemické složení oceli C60E v hm. %	28
Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli C60E	28
Tab. 9 Chemické složení vybraných svařovacích drátů	29
Tab. 10 Technické parametry svařovacího stroje	31
Tab. 11 Chemické složení chranného plynu v %.....	31
Tab. 12 Svařovací parametry pro drát DMO- IG.....	33
Tab. 13 Svařovací parametry pro drát DCMS- IG.....	34
Tab. 14 Svařovací parametry pro drát X70- IG	35
Tab. 15 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 1.....	41
Tab. 16 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 2.....	43
Tab. 17 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 3.....	45
Tab. 18 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 4.....	47
Tab. 19 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 5.....	49
Tab. 20 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 6.....	51
Tab. 21 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 7.....	53
Tab. 22 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 8.....	55
Tab. 23 Naměřené hodnoty tvrdostí vzorku č. 9.....	58
Tab. 24 Porovnání velikostí TOO.....	59
Tab. 25 Minimální a maximální hodnoty tvrdostí jednotlivých oblastí vzorků	59

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový certifikát základní oceli C60E
- Příloha 2 Materiálový certifikát svarového kovu DMO-IG
- Příloha 3 Materiálový certifikát svarového kovu DCMS-IG
- Příloha 4 Materiálový certifikát svarového kovu X70-IG

14317

INSPECTION CERTIFICATE 钢材质量证明书

此质量证明根据EN 10204 3.1出具
(INSPECTION CERTIFICATE AS PER EN 10204 3.1)

PRODU|Shouie Hualfeng Manufacturing Corp.
ADD: |Liangjiaying Town, Gaobeidian City, Hebei Province, C

钢号 STEEL GRADE C60E+N		规格 SIZE \$ 360		证书编号 CERTIFICATE NO 0026							
交货状态 DELIVERY CONDITION NORMALIZED AND ROUGH TURNED		炉号 HEAT NO. 18T-439		合同号 CONTRACT NO 17EXP1031							
生产日期 DATE 2018-6-10		锻造合金圆棒(DIN7527/6) FORGED ALLOY STEEL ROUND BARS		执行标准 EN 10250							
品名 DESCRIPTION FORGED ALLOY STEEL ROUND BARS		公差直径 Tolerance Dia. +3/-0 MM		锻造比≥3.5 Reduction ratio 4.3							
化学成分 CHEMICAL COMPOSITION %											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	H2		
0.57	Max.	0.60	Max.	Max.	Max.	Max.	0.05	Max.	Max.		
0.65	0.40	0.90	0.030	0.035	0.40	0.10	0.40	0.02	2ppm		
0.58	0.19	0.64	0.022	0.005	0.33	0.00	0.06	0	1.00		
机械性能 Mechanical properties acc. to EN 10250											
屈服点 Yield Point Re		抗拉强度 Tensile str. Rm		延伸率 Elongation		收缩率 Reduction of Area		冲击测试 (Impact Test)		交货状态 FINISH	
N/mm ²		N/mm ²		%		Z%		ISOV J +20°C		ISOV J -20°C	
≥275		≥630		MIN. 11		Informative		≥27		≥27	
336		714		15		56		48		32	
221		224		OK		7.0					
Note: Material is free from radioactivity(max. 100Bq/kg), mercury and cadmium contamination.											
100% MISMATCH CHECKED											
Residual magnetism: Max. 10 A/ cm Straightness: Max. 2mm/m											
声波探		结晶粒度		非金属夹杂		长度 LENGTH (MM)		重量 WEIGHT (≤25000KGS)			
GOOD		EN ISO643		-METALLIC INCLUSIONS(PUR		1		5020		4050	
TOTAL						4050					
HA ≤		B ≤2.5		C ≤2.5		D ≤2.0		E ≤2.0		F ≤2.0	
0.5		0.5		0.0		0.0		0.0		0.0	
FI A ≤		B ≤2.0		C ≤2.0		D ≤2.0					
0.5		0.5		0.0		0.0					

上述钢材均按规定进行检查，检查结果全部合格，特此证明。
WE HEREBY CERTIFY THAT ABOVE STEELS HAVE BEEN SATISFACTORILY TESTED IN ACCORDANCE WITH THE SPECIFICATION.



Classifications

EN ISO 21952-A	EN ISO 21952-B	EN ISO 636-A	EN ISO 636-B	AWS A5.28	AWS A5.28M
W MoSi	W 52 I1 1M3	W 46 3 W2Mo	W 55A 3U W1M3	ER70S-A1	ER49S-A1
				(ER80S-G)	(ER55S-G)

Characteristics and typical fields of application

Copper coated GTAW rod for welding in boiler, pressure vessel, pipeline, and crane constructions as well as in structural steel engineering. Very tough deposit of high crack resistant, non-ageing. Recommended for the temperature range from -30 °C to $+500\text{ °C}$. Good copper bonding with low total copper content. Very good welding and flow characteristics.

Base materials

Similar alloyed creep resistant steels and cast steels, ageing resistant and steels resistant to caustic cracking

16Mo3, 20MnMoNi4-5, 15NiCuMoNb5, S235JR-S355JR, S235JO-S355JO, S450JO, S235J2-S355J2, S275N-S460N, S275M-S460M, P235GH-P355GH, P355N, P285NH-P460NH, P195TR1-P265TR1, P195TR2-P265TR2, P195GH-P265GH, L245NB-L415NB, L450QB, L245MB-L450MB, GE200-GE300

ASTM A 29 Gr. 1013, 1016; A 106 Gr. C; A, B; A 182 Gr. F1; A 234 Gr. WP1; A 283 Gr. B, C, D; A 335 Gr. P1; A 501 Gr. B; A 533 Gr. B, C; A 510 Gr. 1013; A 512 Gr. 1021, 1026; A 513 Gr. 1021, 1026; A 516 Gr. 70; A 633 Gr. C; A 678 Gr. B; A 709 Gr. 36, 50; A 711 Gr. 1013; API 5 L B, X42, X52, X60, X65

Typical analysis of the TIG rods (wt.-%)

	C	Si	Mn	Mo
wt.-%	0.1	0.6	1.1	0.5

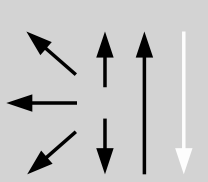
Mechanical properties of all-weld metal

Condition	Yield strength $R_{p0.2}$	Tensile strength R_m	Elongation A ($L_0=5d_0$)	Impact work ISO-V KV J	
	MPa	MPa	%	+20 °C	-30 °C
u	530 (≥ 460)	650 (550 – 740)	26 (≥ 22)	200	80 (≥ 47)
a	480	570	27	230	

u untreated, as-welded – shielding gas Argon

a annealed, 620 °C / 1h / furnace down to 300 °C / air – shielding gas Argon

Operating data

	Polarity:	Shielding gas:	Rod marking:	\varnothing (mm)
	DC (–)	100 % Argon	front: \star WMoSi back: 1.5424	1.6
				2.0
				2.4
				3.0

Preheating, interpass temperature and post weld heat treatment as required by the base metal.

Approvals

TÜV (0020.), KTA 1408.1 (8066.), DB (42.014.09), BV (UP), DNV (I YMS), CRS (3), CE, NAKS

Classifications

EN ISO 21952-A	EN ISO 21952-B	AWS A5.28	AWS A5.28M
G CrMo1Si	G 1CM3	ER80S-G	ER55S-G
		ER80S-B2 (mod.)	ER55S-B2 (mod.)

Characteristics and typical fields of application

GMAW wire for 1.25 % Cr 0.5 % Mo alloyed boiler, plate and tube steels as well as for the welding of quenched and tempered and case hardening steels. Preferably used for the steels 13CrMo4-5 or ASTM A335 P11/P12. Approved in long-term condition up to +570 °C service temperature.

The deposit is noted for its good mechanical properties and good toughness. Further, good resistance to cracking, when attacked by caustic soda, and the fact that it is suitable for nitriding, quenching and tempering are additional features. The values of the creep rupture strength lay within the scatter band of the material 13CrMo4-5.

The wire shows very good feeding characteristics, resulting in smooth welding and wetting behaviour. Uniform copper bonding with low total copper content.

Base materials

Creep resistant steels and similar alloyed cast steels, case hardening and nitriding steels of similar chemical composition, similar alloyed heat treatable steels with tensile strength up to 780 MPa, steels resistant to caustic cracking

1.7335 13CrMo4-5, 1.7262 15CrMo5, 1.7728 16CrMoV4, 1.7218 25CrMo4, 1.7258 24CrMo5, 1.7354 G22CrMo5-4, 1.7357 G17CrMo5-5

ASTM A193 Gr. B7, A335 Gr. P11 u. P12, A217 Gr. WC6

Typical analysis of solid wire (wt.-%)

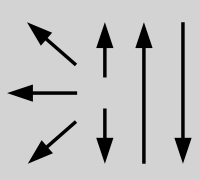
	C	Si	Mn	Cr	Mo
wt.-%	0.11	0.6	1.0	1.2	0.5

Mechanical properties of all-weld metal

Condition	Yield strength R _{p0,2}	Tensile strength R _m	Elongation A (L ₀ =5d ₀)	Impact work ISO-V KV J
	MPa	MPa	%	+20 °C
a	440 (≥ 355)	570 (≥ 550)	23 (≥ 20)	140 (≥ 47)

a annealed, 680 °C/1h / furnace down to 300 °C / air – shielding gas Ar + 18 % CO₂

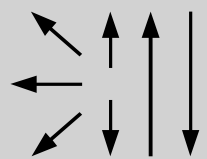
Operating data

	Polarity: DC (+)	Shielding gases: Argon + 15 – 25 % CO ₂ 100 % CO ₂ Using 100 % CO ₂ the mechanical properties can be different.	ø (mm)
			0.8
1.0			
1.2			
1.6			

Preheat, interpass temperature and post weld heat treatment as required by the base metal.

Approvals

TÜV (1091.), DB (42.014.15), SEPROZ, CE

Normbezeichnungen							
EN ISO 16834-A	EN ISO 16834-A	EN ISO 16834-B	AWS A5.28	AWS A5.28M			
G Mn3Ni1CrMo (für Draht)	G 69 5 M21 Mn3Ni1CrMo	G 76A 5 M21 3M1	ER110S-G	ER76S-G			
Eigenschaften und Anwendungsgebiete							
<p>Verkupferte Drahtelektrode für das Schweißen von hochfesten, vergüteten Feinkornbaustählen, mit Mindeststreckgrenze von 690 MPa.</p> <p>BÖHLER X 70-IG ergibt durch die präzise Zugabe von Mikrolegierungselementen ein Schweißgut, welches trotz hoher Festigkeit eine ausgezeichnete Duktilität und hohe Rissicherheit aufweist. Gute Tieftemperatur-Kerbschlagarbeit bis -50°C.</p>							
Grundwerkstoffe							
<p>Hochfeste Feinkornbaustähle S620Q, S620QL, S690Q, S690QL, N-A-XTRA M 700, alform® plate 620 M, alform® 700 M, alform® plate 700 M, aldur 620 Q, 620 QL, aldur 700 Q, 700 QL ASTM A 514 Gr. F, H, Q; A 709 Gr. 100 Type E, F, H, Q; A 709 Gr. HPS 100W</p>							
Richtanalyse des Massivdrahtes (Gew.-%)							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
Gew.-%	0,1	0,6	1,6	0,25	1,3	0,25	0,1
Mechanische Güterwerte des Schweißgutes							
Zustand	Dehngrenze R _{p2.0}	Zugfestigkeit R _m	Dehnung A (L ₀ =5d ₀)	Kerbschlagarbeit ISO-V KV J			
	MPa	MPa	%	+20°C	-50°C		
u	800 (≥ 690)	900 (770 – 940)	19 (≥ 17)	190	≥ 47		
u unbehandelt, Schweißzustand – Schutzgas Ar + 15 – 25% CO ₂							
Verarbeitungshinweise							
	Stromart DC (+)	Schutzgase: Argon + 15 – 25% CO ₂		ø (mm) 1,0 1,2			
Vorwärmung und Zwischenlagentemperatur auf Grundwerkstoff abstimmen.							
Zulassung							
TÜV (05547.), DB (42.014.19), ABS (X), BV (UP), DNV (IV Y69), GL (5Y69S), RMR (4Y69), SEPROZ, CE							