



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE CMT ADVANCED V PRŮMYSLOVÉ PRAXI

CMT ADVANCED APPLICATION IN INDUSTRIAL PRACTICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Šoulák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Petr Šoulák**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubiček**
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:

Aplikace CMT Advanced v průmyslové praxi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vysokopevnostní oceli jsou náchylné na vysoký tepelný příkon při svařování.

Nová metoda CMT Advanced výrazně redukuje tento příkon a je tedy perspektivní ke svařování uvedených ocelí. Úkolem experimentu je porovnat klasický MAG proces a CMT Advanced při svařování VP ocelí.

Cíle diplomové práce:

1. Současný stav problematiky svařování VP ocelí.
2. Literární studie procesu CMT Advanced a svařitelnosti VP ocelí.
3. Návrh a provedení experimentální práce.
4. Diskuze výsledků a hodnocení experimentu.

Seznam doporučené literatury:

AMBROŽ, O., B. KANDUS a J. KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS, 2001. 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.

FOLDYNA, V., K. HENNHOFER, V. OLŠANOVÁ, I. HLAVATÝ, J. KOUKAL, F. KRISTOFORY, V. OCHODEK, V. PILOUS, J. PURMENSKÝ, D. SCHWARZ a J. VESELKO. Materiály a jejich svařitelnost. 2 vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. 292 s. ISBN 80-857-7185-3.

ONDŘEJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 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, I. Zváranie a zvariteľnosť materiálov. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009. 486 s. ISBN 978-80-227-3167-6.

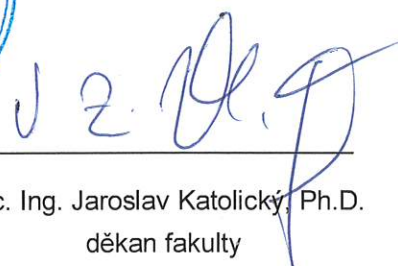
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 27. 10. 2018





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

V diplomové práci je zpracována problematika svařování ocelí s vyšší pevností. Práce také popisuje metodu obloukového svařování v ochranné atmosféře CMT Advanced. V experimentální části této práce je porovnávána metoda CMT Advanced s konvenční metodou obloukového svařování v ochranné atmosféře ve zkratovém režimu při svařování ocelí Hardox 450 a Weldox 700 E. Porovnávány jsou mechanické vlastnosti svaru získané pomocí příčné zkoušky tahem a měřeními mikrotvrdosti. Hodnocena byla makrostruktura a mikrostruktura. V poslední části práce je stručné ekonomické srovnání obou metod.

Klíčová slova

CMT Advanced, Hardox, Weldox, příčná zkouška tahem, mikrotvrdost

ABSTRACT

In presented diploma thesis is studied problematics of welding of high strength steels. This work also describes arc welding in protective atmosphere CMT Advanced. In experimental part of this work is CMT Advanced method compared with conventional arc welding in protective atmosphere in shortcut mode used for welding of Hardox 450 and Weldox 700 E. Comparing of mechanical properties of weld material are realized via transverse tensile testing and measuring of microhardness. Macrostructure and microstructure of weld was evaluated too. In the last part of this thesis is a brief economical assessment of both studied methods.

Key words

CMT Advanced, Hardox, Weldox, transverse tensile test, microhardness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠOULÁK, Petr. *Aplikace CMT Advanced v průmyslové praxi*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117326>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Aplikace CMT Advanced v průmyslové praxi** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
24.5.2019

Datum

.....
Bc. Petr Šoulák

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat ostatním zaměstnancům VUT za umožnění zpracování diplomové práce, poskytnutí potřebných dokumentů a konzultací.

Chtěl bych také poděkovat firmě Fronius za umožnění svaření vzorků a poskytnutí informací.

V neposlední řadě bych také rád poděkoval svým rodičům a rodině za podporu v průběhu celého studia a možnost studovat na VUT v Brně.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ.....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 OCELI S VYŠŠÍ PEVNOSTÍ	9
1.1 Druhy ocelí s vyšší pevností.....	9
1.2 Vysokopevnostní konstrukční oceli	10
1.3 Otěruvzdorné oceli	10
1.4 Pancéřové oceli.....	10
1.5 Výroba oceli s vyšší pevností	11
1.6 Termomechanické zpracování	11
2 SVAŘITELNOST OCELÍ S VYŠŠÍ PEVNOSTÍ	13
2.1 Tepelný příkon.....	13
2.2 Vodíkové trhliny.....	13
2.3 Stanovení ekvivalentu uhlíku.....	15
2.4 Výpočet předeřevu	16
2.5 Dělení ocelí s vyšší pevností.....	20
3 METODY SVAŘOVÁNÍ.....	22
3.1 Metoda MAG	22
3.2 Přenos kovu v oblouku	22
3.3 Ochranné plyny	25
3.4 Přídavný materiál	26
3.5 Metoda CMT.....	27
3.6 CMT Advanced.....	29
4 KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ.....	31
4.1 Příčná zkouška tahem	31
4.2 Zkouška mikrotvrlosti	33
4.3 Makroskopická a mikroskopická kontrola	33
5 EXPERIMENT.....	34
5.1 Weldox 700 E	34
5.2 Hardox 450.....	34
5.3 Svaření vzorků	35
5.4 Výpočet vneseného tepla	38

5.5 Příprava vzorků	38
5.6 Příčná zkouška tahem	42
5.6.1 Příčná zkouška tahem pro materiál Hardox 450	42
5.6.2 Příčná zkouška tahem pro materiál Weldox 700 E	45
5.7 Makroskopická kontrola	47
5.8 Mikroskopická kontrola	50
5.9 Zkouška mikrotvrdosti	58
5.10 Zhodnocení experimentu	60
6 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	61
7 ZÁVĚR	64
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	69
SEZNAM PŘÍLOH	71

ÚVOD

Strojírenské technologie podléhají neustálému vývoji jak z pohledu výroby, tak z pohledu materiálů. V současné době jsou na konstrukční materiály kladeny nároky především nižší hmotnosti při stejných mechanických vlastnostech. Nižší hmotnost u některých zařízení zvyšuje jeho nosnost a zároveň nedochází k nadměrnému zatěžování vozovek. S nižší hmotností se snižuje i spotřeba paliva. Zde mají své opodstatnění materiály s vyšší pevností, které mohou posunout hranice použití oproti klasickým materiálům. Dalším faktorem je nižší množství spotřebované energie a vyprodukovaných nečistot při výrobě těchto materiálů, protože větší množství obyčejné ocele může nahradit menší množství kvalitnější [1].

Jedna z nejrozšířenějších technologií ve strojírenství je svařování, které umožňuje nerozebíratelné spojování kovů pomocí tepla. Díky vývoji této technologie neustále roste její podíl na celkové výrobě. Požadavky jsou především na kvalitu a vlastnosti svarového spoje.

Cílem této práce je zjistit možnosti poměrně nové metody obloukového svařování v ochranné atmosféře CMT Advanced při svařování ocelí s vyšší pevností. Tyto oceli jsou citlivé na teplo, které vzniká při procesu svařování. Metoda CMT Advanced byla vyvinuta, aby během svařování vnášela do materiálu méně tepla. Bude tedy porovnána s konvenční metodou obloukového svařování v ochranné atmosféře při zkratovém režimu, která je jednou z nejrozšířenějších metod svařování. Jako zástupce ocelí s vyšší pevností byly vybrány dva materiály, na které je zaměřena diplomová práce. Vysokopevnostní materiál Weldox a ořezuvzdorný Hardox.



Obr. 1 Příklady použití oceli s vyšší pevností, vlevo rameno jeřábu z materiálu Weldox, vpravo korba nákladního automobilu z materiálu Hardox [2, 3].

1 OCELI S VYŠŠÍ PEVNOSTÍ

Ve strojírenství se neustále zvyšují nároky na materiály. Z tohoto důvodu je nutno vyrábět materiály s neustále lepšími a kvalitnějšími vlastnostmi. V oblasti konstrukce jsou to především vlastnosti pevnost, otěruvzdornost, odolnost za nízkých teplot a svařitelnost. Tyto vlastnosti se vybírají na základě použití. Materiály mohou být vhodné například pro velké jeřábové konstrukce, stavební konstrukce mostů nebo vysoce namáhaná důlní zařízení. Spotřeba těchto ocelí ve světě i v České republice roste a díky vývoji ceny bývá někdy jejich využití hospodárnější než běžné konstrukční oceli [4].

1.1 Druhy ocelí s vyšší pevností

Oceli s vyšší pevností můžeme rozdělit do skupin dle použití, které ukazuje tab.1. Pro konstrukce, kde je velké zatížení a je potřeba vysoká pevnost se hodí především vysokopevnostní konstrukční oceli. Na místech, kde je důležitá životnost a odolnost se používají otěruvzdorné oceli. Ve vojenském a civilním prostředí, kde ocel je často jediná věc mezi člověkem a kulkou se využívají pancéřové oceli, někdy také nazývané střelecky odolné [1].

Základem těchto materiálů je jejich jemnozrnná struktura s často termomechanickým zpracováním při válcování. Na základě výroby těchto materiálů je můžeme rozdělit do tří skupin, který udává písemný symbol v označení oceli [5].

- M – termomechanicky zpracované, válcovány za řízeného ochlazování
- Q – zušlechtné, kalené a popuštěné
- A – kalené a precipitačně vytvrzené

Tab. 1 Skupiny ocelí s vyšší pevností [5].

Skupina ocelí	Obchodní značky	Základní mechanické vlastnosti	Technologické vlastnosti
Vysokopevnostní konstrukční oceli	WELDOX, DOMEX, ALFORM, OPTIM	Re = 600÷1300 MPa	Svařitelnost, ohybatelnost
Otěruvzdorné oceli	HARDOX, XAR	Tvrdość 350÷700 HBW	Svařitelnost, obrobiteľnosť, ohybatelnost
Pancéřové oceli	ARMOX, RAMOR	Tvrdość 260÷640 HBW	Svařitelnost

Nejčastěji jsou tyto oceli známy a označovány podle obchodních značek. Od dubna roku 2015 však společnost SSAB, pod kterou patří obchodní značky WELDOX, DOMEX a OPTIM tyto značky sloučila a vytvořila novou značku STRENX [6].

1.2 Vysokopevnostní konstrukční oceli

Vysokopevnostní oceli můžeme rozdělit do dvou skupin. Oceli s mezí kluzu do 500MPa, kam patří většinou nekalené oceli a do skupiny s mezí kluzu nad 500MPa. Největší rozdíl v mechanických vlastnostech oproti klasické konstrukční oceli (označované písmenem S) je především v mezi pevnosti a mezi kluzu. Většina ostatních vlastností, například tažnost, vrubová houževnatost, zůstávají na stejné úrovni. Vysokopevnostní ocel je ve srovnání s klasickou konstrukční ocelí někdy i několikrát dražší (2x až 3x). Úspora nákladů tedy většinou nebývá důvodem jejich použití. Největší úspora při jejím použití je na hmotnosti. Hmotnost bývá v mnoha případech jeden z nejdůležitějších konstrukčních faktorů. Do skupiny výrobků a zařízení patří například mobilní jeřáby, mostové konstrukce a mnoho dalších, kde snížením vlastní hmotnosti dochází ke zvýšení nosnosti. Dalším důvodem použití vysokopevnostních ocelí může být menší ekologická náročnost výroby. Při použití menšího množství oceli se během výroby spotřebuje méně energie a vyprodukuje mnohem menší množství CO₂ a jiných nečistot [1, 7, 8].

1.3 Otěruvzdorné oceli

Otěruvzdorné oceli musí splňovat přísné požadavky na odolnost proti opotřebení. Mezi jejich vlastnosti patří vysoká tvrdost, vysoká pevnost a dobrá houževnatost. Díky jejich vysoké tvrdosti mají oceli mnohem větší životnost než běžné oceli a jsou proto vhodné pro situace, kde příčinou problémů opotřebení je otěr. Zvyšují tak životnost zařízení jako například korby výklopných nakladačů, drtičů kamení nebo lžice nakladačů. Tyto zařízení bývají obvykle zatěžovány třecí a rázovou abrazí v kombinaci s velkou deformací. Vysoká pevnost těchto materiálů umožňuje použít tenčí materiály, což zvyšuje nosnost zařízení. I když otěruvzdorné oceli mívají mnohem větší tvrdost, (3x až 4x) než běžné používané materiály, zachovávají si svařitelnost a přijatelnou obrobitelnost a díky tomu je snadné jejich zpracování [8, 9].

1.4 Pancéřové oceli

Pancéřové oceli mají garantované mechanické vlastnosti, přesné tolerance tloušťky a vynikající kvalitu povrchu. Tato ocel má vysokou tvrdost, pevnost a houževnatost. Díky těmto vlastnostem se tato ocel používá jako neprůstřelná ocel. Své využití má v oblastech civilní i vojenské ochrany. Používá se jako materiál pro obrněné vojenské vozy, obrněné limuzíny nebo jako materiál pro ochranné úkryty. Oceli jsou dodávány s garantovanými balistickými vlastnostmi, které jsou pro každou třídu oceli testovány podle mezinárodních norem. Jejich vysoká pevnost, houževnatost a odolnost proti porušení je docílena především termomechanickým zpracováním [8, 10].

1.5 Výroba oceli s vyšší pevností

Chemické složení a způsob tepelného zpracování je u vysokopevnostních a otěruvzdorných ocelí dosti podobný. V první fázi se plynulým odléváním vyrobí bramy s vysokou kvalitou, přesným chemickým složením a nízkým obsahem nežádoucích prvků. Další fází je válcování, jednotlivé bramy jsou ohřáty na teplotu okolo 1170 °C a jsou válcovány na kvarteto stolici na požadovanou tloušťku. V poslední fázi je ocel ohřata na teplotu 900 °C a prudce ochlazena proudem vody. U obou typů ocelí se jedná o kalené ocelové plechy s nízkým obsahem uhlíku a legujících prvků, aby při vysoké pevnosti byla zachována hlavně jejich svařitelnost. Rozdíl při výrobě vysokopevnostních a otěruvzdorných ocelí je v konečné fázi tepelného zpracování. Otěruvzdorné oceli se nepopouštějí, případně jenom za nízkých teplot (okolo 200 °C), aby si zachovaly vyšší odolnost vůči vrypům a abrazi. Vysokopevnostní oceli se popouštějí při vysokých teplotách (kolem 600 °C). Tímto vznikne jiná rovnováha mezi houževnatostí a pevností, zvýšená houževnatost na úkor snížení pevnosti. Nejpevnější oceli se vyrábí termomechanickým zpracováním, které je podrobněji popsáno v kapitole 1.6. Touto metodou se například vyrábí pancéřové oceli [1, 7, 11].

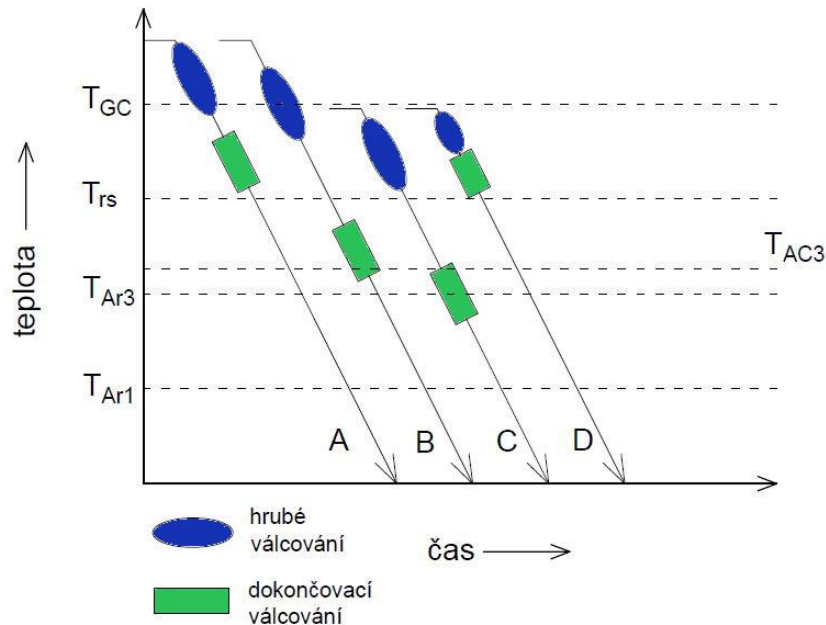
1.6 Termomechanické zpracování

Termomechanické zpracování (TMZ nebo také TMP z anglického thermomechanical processing) ocelí se označuje nekonvenční metoda výroby polotovarů, která vychází z hlubšího poznatku teorie dislokací. Základním principem je řízená deformace a tepelné zpracování k získání synergických efektů. Synergickým efektem je zde myšleno spolupůsobení více činitelů najednou. V případě TMZ je to tepelné a deformační zpracování, které přináší lepší výsledek než postupné zpracování (zvláště v samostatných operacích). Účel TMZ je vnášení deformace před, během nebo po austenitické transformaci. Na základě toho se termomechanické zpracování vysoce pevných ocelí klasifikuje na tři typy tab. 2 [12].

Tab. 2 Klasifikace termomechanického zpracování pro vysoce pevné oceli [13].

Typ I	<ul style="list-style-type: none"> • deformace před austenitickou transformací • obvyklé tváření za tepla • deformace před transformací austenitu na martenzit
Typ II	<ul style="list-style-type: none"> • deformace během austenitické transformace • deformace během transformace na martenzit • deformace během transformace na feriticko-karbidickou strukturu
Typ III	<ul style="list-style-type: none"> • deformace po transformaci austenitu • deformace martenzitu následovaná temperováním • deformace temperovaného martenzitu následovaná stárnutím • deformace produktů izotermické transformace

Toto rozdělení vychází z posloupnosti deformace a fázové transformace při zpracování. Rozdíl tedy u TMZ je oproti konvenčním metodám v přesném řízení mikrostrukturních změn při deformaci za tepla a za ochlazování. Tento rozdíl je znázorněn na obr. 2, kde jsou zobrazeny jednotlivé postupy při válcování. Teplota T_{Ar1} představuje dokončenou transformaci austenitu na ferit nebo ferit a cementit po ochlazení. Teplota T_{Ar3} je začátek transformace austenitu na ferit při ochlazování. Teplota T_{AC3} je teplota, kdy při ohřevu dojde k úplné transformaci feritu na austenit. Při teplotě T_{rs} dochází k zastavení rekrytalizace. Při teplotě T_{GC} dochází k hrubnutí zrna sekundární rekrytalizací, rozpuštěné precipitáty už neomezují růst zrna [13].



Obr. 2 Postupy válcování, převzato z [13].

Metoda A představuje konvenční válcování za tepla, kde dochází k předehevu, hrubému a dokončovacímu válcování. Teploty předehevu jsou vysoké z důvodu snadného výsledného úběru při válcování. Metoda B se nazývá konvenční řízené válcování. Princip této metody je válcování pod teplotou rekrytalizace, zde se austenitická zrna vysoce protahují a při velké deformaci vyplňují interkrytalickými defekty (například deformačními pásy a dvojčatěním). Při ochlazování pak austenitická zrna s velkým množstvím defektů transformují na velmi jemnou feritickou strukturu. Válcování v oblasti, kde se ve struktuře vyskytuje ferit a austenit se nazývá interkritické válcování, metoda C. Touto metodou se dosahuje struktury s velice jemným feritem a transformace zbytkového austenitu. Metoda D při, které se dosahuje opakované rekrytalizace během hrubého válcování i během dokončovacího válcování nad teplotou zastavení rekrytalizace se nazývá válcování s řízenou rekrytalizací. Výsledkem je dosažení jemnozrné austenitické struktury a potlačení mechanismu hrubnutí zrna [13].

Termomechanické zpracování tedy patří mezi vysoce sofistikované procesy, které se odlišují od konvenčního způsobu (tváření a pozdější tepelné zpracování). K navržení technologického postupu se používají výpočetní modely, které teoreticky předpovídají mikrostrukturní změny a dokáží předpovědět výsledné vlastnosti. Výrobní proces má vysokou produktivitu, etapy výroby začínají u kontinuálního lítí přes ohřev až k válcování a tepelnému zpracování. Využívá se tak především pro výrobu polotovarů [12, 13].

2 SVAŘITELNOST OCELÍ S VYŠŠÍ PEVNOSTÍ

Oceli s vyšší pevností mají tendenci být citlivější vůči praskání než měkké oceli, což je důvod, proč je důležité provádět dobrou kontrolu vneseného tepla před a během procesu svařování. Nejčastější vady materiálu jsou studené trhliny, které převážně způsobuje přítomnost vodíku. Dalším důležitým faktorem je zachování pevnosti a houževnatosti svaru, tak aby byla srovnatelná se základním materiálem a nedocházelo tak ke zhoršení vlastností svařované konstrukce [14].

2.1 Tepelný příkon

Svařovací proces tepelně ovlivňuje místo svaru, kde se mění mechanické vlastnosti a mikrostruktura oproti základnímu materiálu. Základní parametr, který ovlivňuje svarový spoj je vnesené teplo (tepelný příkon), které v sobě obsahuje parametry proudu, napětí a rychlosti svařování. Popisuje tak dodanou energii na délku svarového spoje [15].

Výpočet vneseného tepla [15]:

$$Q = \frac{k \times U \times I \times 60}{v \times 1000} \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.1)$$

kde: U [V] - svařovací napětí,
I [A] - svařovací proud,
v [mm.min⁻¹] - svařovací rychlost,
k [-] - koeficient tepelné účinnosti.

Během svařování dochází ke ztrátám ve svařovacím oblouku. Koeficient tepelné účinnosti (k) vyjadřuje množství energie, která přejde do svarového spoje. Tento parametr je závislý na použité svařovací metodě a konkrétních podmínkách svařování. Hodnoty pro některé metody svařování jsou uvedeny v tab. 3 [15].

Tab. 3 Koeficient tepelné účinnosti, převzato z [16].

Metoda svařování	k [-]
MMA	0,8
MAG, všechny metody	0,8
SAW	1,0
TIG	0,6

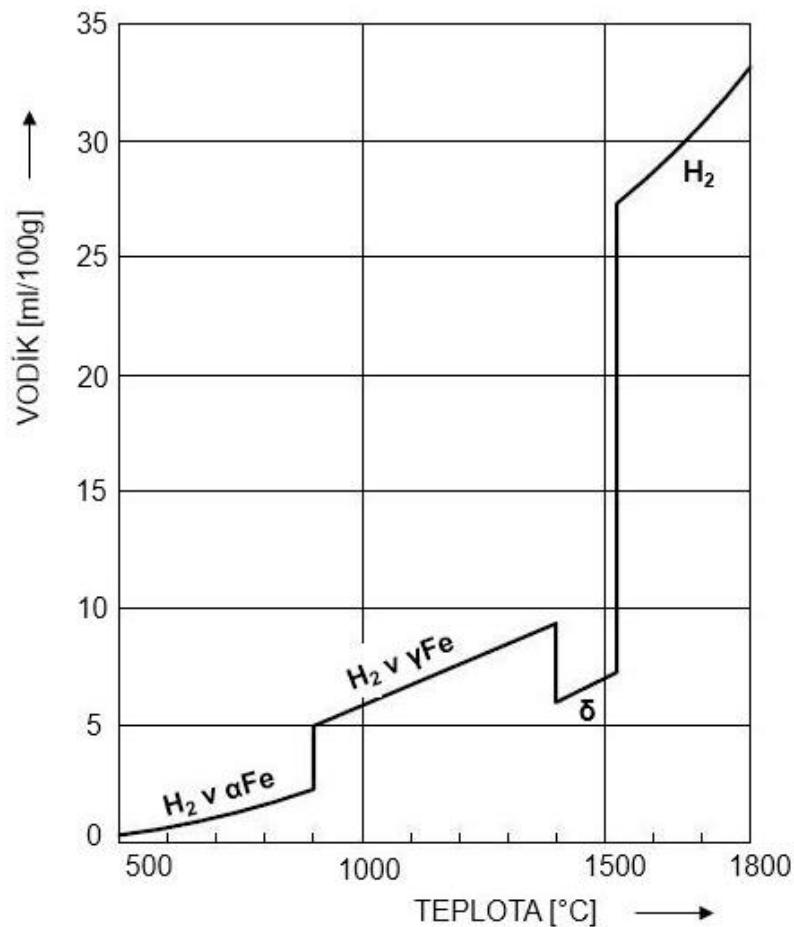
2.2 Vodíkové trhliny

Vodíkové trhliny nebo jinak řečeno studené trhliny jsou defekty, které vznikají při relativně nízkých teplotách. Výskyt těchto trhlín může být v tepelně ovlivněné oblasti nebo ve svarovém kovu, nejčastěji v podhousenkové oblasti. Trhliny mohou být orientovány podélně i příčně přes všechny oblasti svarového spoje. Vodíková trhlina je zpožděná trhlina, která se tvoří po skončení svařovacího procesu, když teplota ve svaru klesne pod hodnotu 200 °C. Trhlina nemusí vzniknout okamžitě po svařování. Kontrola potenciálních trhlín se obvykle provádí po 16-48 hodinách. Studené trhliny jsou transkrystalického charakteru, které mívají lesklý nezoxidovaný povrch. V tomto se liší od trhlín vzniklých za horka [17, 18, 19].

Tři hlavní příčiny vzniku studených trhlin [17]:

- Přítomnost vodíku ve svarovém spoji,
- struktura citlivá na přítomnost vodíku,
- vysoká přítomnost tahových napětí.

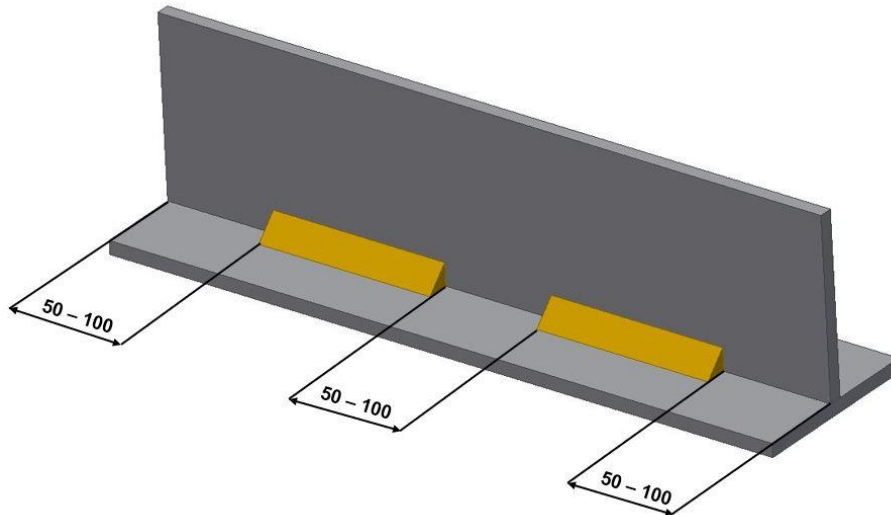
Tyto tři faktory působí společně a podněcují tak vznik studených trhlin. Zdrojem vodíku je nejčastěji vlhkost, která je v atmosféře, v obalu elektrod, v přidávném drátu, ale i na povrchu svařovaného materiálu. Rozpustnost vodíku závisí na teplotě. S rostoucí teplotou se rozpustnost vodíku v oceli zvyšuje. Vliv na vznik studených trhlin má obsah difuzního vodíku. Ten při teplotách nad 200 °C je rozpuštěn v oceli nebo svarovém kovu v disociovaném stavu ve formě protonu. Rozpustnost vodíku v oceli je zobrazena na obr. 3 [15].



Obr. 3 Diagram rozpustnosti vodíku v železe, převzato z [15].

K rekombinaci vodíku dochází při snížení teploty pod 200 °C. Při této reakci dochází ke vzniku velkých tlaků v místech, kde dochází k rekombinaci tedy v okolí vměstků, mikropórů, makropórů, dislokací a jiných krystalických poruch. Napětí vzniklé těmito tlaky, které dosahují hodnot na úrovni 0,6 mil. MPa, je dostatečně velké, aby vznikly trhliny. Nejcitlivější na vodíkové trhliny jsou převážně tvrdé struktury jako jsou martenzit a dolní bainit. Důvodem je rychlost difúze vodíku, která je v martenzitické struktuře nejpomalejší. Proto i malé množství difuzního vodíku může v této struktuře způsobit vznik trhlin. Méně citlivé jsou struktury feritické a austenitické [17].

Riziko vzniku studených trhlin může být sníženo používáním nízkovodíkových metod. Provádět sušení přídavných materiálů před svařováním, správně skladovat přídavný materiál a vyvarovat se jeho navlhnutí. Minimalizovat vznik zbytkových napětí. Menší kořenové mezery snižují koncentraci napětí. Napětí může být také sníženo, pokud začátek a konec svaru bude ve vzdálenosti 50–100 mm od kraje materiálu nebo jiného svaru (viz. obr.4) [20].



Obr. 4 Poloha začátku a konce svaru, převzato z [16].

U materiálů s vysokou pevností je možné navaření prvních vrstev a kořene přídavným materiálem s nižší pevností a na další vrchní vrstvy použít přídavný materiál o vysoké pevnosti. Tato technika zvyšuje odolnost vůči trhlinám, protože zde působí daleko nižší zbytkové napětí. Základním opatřením proti vzniku vodíkových trhli je použití předehřevu [16].

2.3 Stanovení ekvivalentu uhlíku

Oceli s vyšší pevností mívají relativně nízké množství legujících prvků. Nicméně množství legur, které je přidáváno do oceli je rozhodující pro dosažení požadovaných mechanických vlastností. Příspěvek jednotlivých legujících prvků ke svařitelnosti můžeme vyjádřit pomocí uhlíkového ekvivalentu, který nám udává schopnost kalitelnosti oceli. Snazší kalitelnost oceli vede k většímu nebezpečí vzniku křehkých trhlin. Nižší hodnota uhlíkového ekvivalentu odpovídá vyšší odolnosti vůči vodíkovým trhlinám. Pro výpočet existuje několik modelů a každý vzorec je odvozen ze studie založené pro konkrétní ocel. Výpočty jsou uvedeny v normě: ČSN EN 1011-2 Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí. Mezi nejčastější používané mezinárodní uhlíkové ekvivalenty jsou modely CET vztah 2.2 [15] a CEV vztah 2.3 [15].

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40} [\%] \quad (2.2)$$

Pro obsah legujících prvků: C = 0,05 až 0,25 hm. %, Si < 0,80 hm. %, Mn = 0,50 až 1,90 hm. %, Cr < 1,50 hm. %, Cu < 0,70 hm. %, Ni < 2,50 hm. %, Mo < 0,75 hm. %, Ti < 0,12 hm. %, V < 0,18 hm. %, B < 0,005 hm. %, Nb < 0,06 hm. %.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (2.3)$$

Rovnici lze požit pro obsah prvků: C = 0,05 až 0,25 hm. %, Si < 0,80 hm. %, Mn < 1,70 hm. %, Cr < 0,90 hm. %, Cu < 1,00 hm. %, Ni < 2,50 hm. %, Mo < 0,75 hm. %, V < 0,20 hm. %.

Oba vztahy doporučuje norma ČSN EN 1011-2. Pro oceli s vyšší pevností je preferován uhlíkový ekvivalent CET, který je navržen, aby vyhovoval těmto ocelím. Výpočet podle CEV někdy označován pouze CE se zaměřuje na nelegované a nízko legované oceli s nižší pevností a lze použít v rozsahu CEV 0,30 až 0,70 %. Pokud u oceli jsou známy pouze obsahy C a Mn připočítá se k CEV hodnota 0,03, která má zahrnout vliv ostatních prvků. Výpočet podle CEV není vhodný pro oceli obsahující bór. Pokud jsou svařovány oceli s různými hodnoty uhlíkového ekvivalentu je rozhodující vyšší hodnota. Výpočet uhlíkového ekvivalentu je často prostředek pro určení, jestli je zapotřebí předehřívání materiálu, aby bylo zabráněno vodíkovým trhlinám [21].

2.4 Výpočet předehřevu

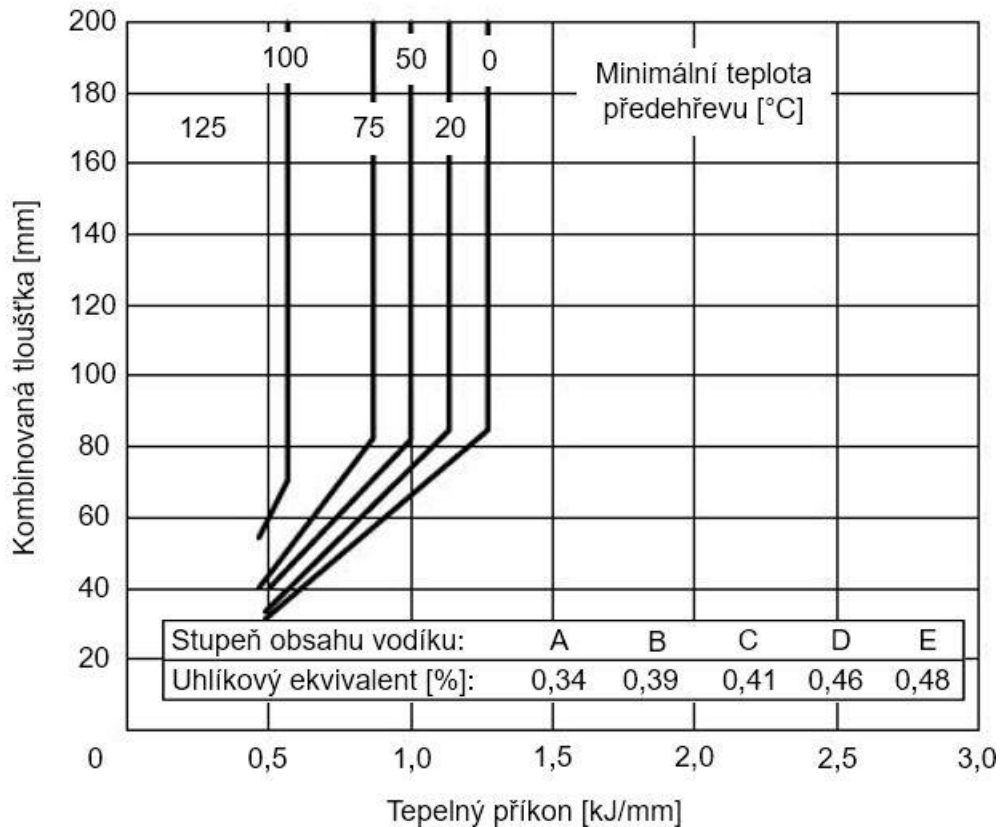
Kvůli náchylnosti k zakalení tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu, kterou vyjadřuje uhlíkový ekvivalent, je jedním ze základních opatření předehřev materiálu. Díky předehřevu se snižuje rychlost ochlazování, která brání zakalení a vznikají struktury příznivější z hlediska difuze vodíku. Výdrž na vyšších teplotách prodlužuje dobu, kdy může vodík difundovat ze svarového kovu. Předehřev snižuje zbytkové napětí díky nižšímu teplotnímu gradientu. Teplotu předehřevu, která se označuje T_p , je možné stanovit několika způsoby. Jedna z možností je stanovit předehřev podle ARA diagramu, u kterého můžeme sledovat teplotu počátku transformace austenitu na martenzit. Další možnost je pomocí empirických vzorců, které jsou získané na základě vyhodnocení experimentálních zkoušek praskavosti, například zkouška praskavosti CTS (controlled thermal severity), zkouška praskavosti Tekken nebo zkouška praskavosti RD (research department) [15].

Výpočet teploty předehřevu pro svařování nelegovaných, jemnozrnných a nízko legovaných ocelí je podle normy ČSN EN 1011-2, která obsahuje dvě metody. U metody A se teplota odečítá z grafů, které jsou uvedeny v normě na základě obsahu difuzního vodíku, kombinované tloušťky svarového spoje, hodnoty ekvivalentního uhlíku a tepelného příkonu. Materiál musí splňovat podmínky chemického složení pro metodu CEV. Stupeň obsahu vodíku je měřen podle normy ČSN EN ISO 3690 a stanovuje ho výrobce podle tab.4. Rozřazen je do pěti stupňů podle obsahu difuzního vodíku v ml na 100 g svarového kovu [21].

Tab. 4 Stupně obsahu difuzního vodíku [21].

Obsah difuzního vodíku [ml/100 g svarového kovu]	Stupeň obsahu vodíku
> 15	A
10 ≤ 15	B
5 ≤ 10	C
3 ≤ 5	D
≤ 3	E

Kombinovaná tloušťka je počítána jako součet tloušťek základního materiálu ve vzdálenosti 75 mm od svarové hrany. Kombinovaná tloušťka je proto u koutových svarů vyšší než u svarů tupých, protože je zde více materiálu, který může teplo odvádět. Vnesené teplo je počítáno podle vztahu 2.1. Příklad grafu ke stanovení teploty předehřevu je na obr. 5. Teploty stanovené z grafů se mohou zvýšit, pokud tloušťka materiálu je nad 50 mm nebo jsou svařovány kořenové housenky u oboustranných tupých svarů větších tloušťek [15].



Obr. 5 Diagram pro stanovení teploty předehřevu, převzato z [21].

Metoda B počítá teplotu předehřevu za pomoci výpočtu. Při použití této metody musí být splněny podmínky pro výpočet uhlíkového ekvivalentu podle CET. Výpočet v sobě zahrnuje vliv chemického složení oceli, tloušťky svařovaného materiálu, obsahu difuzního vodíku HD ve svarovém kovu, tepelného příkonu a vnitřního napětí [15].

Vliv chemického složení oceli [21]:

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.4)$$

kde: CET [%] - uhlíkový ekvivalent (podle vztahu 2.2).

Vliv tloušťky svařovaného materiálu [21]:

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.5)$$

kde: d [mm] - tloušťka svařovaného materiálu.

Vliv obsahu difuzního vodíku HD ve svarovém kovu [21]:

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.6)$$

kde: HD [ml·100g⁻¹] - obsah vodíku.

Vliv tepelného příkonu [21]:

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.7)$$

kde: Q [kJ·mm⁻¹] - tepelný příkon,
CET [%] - uhlíkový ekvivalent (podle vztahu 2.2).

Výpočet teploty přehřevu [21]:

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.8)$$

Teplota přehřevu se vypočítá jako součet jednotlivých přírůstků vztah 2.8 nebo je možné teplotu vypočítat podle vztahu 2.9 [21], který je možné použít pro oceli s mezí pevností (R_m) do 1000 MPa.

$$T_p = 697 \cdot CET + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 328 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.9)$$

kde: CET [%] - uhlíkový ekvivalent (podle vztahu 2.2),
d [mm] - tloušťka svařovaného materiálu,
HD [ml·100g⁻¹] - obsah difuzního vodíku,
Q [kJ·mm⁻¹] - tepelný příkon.

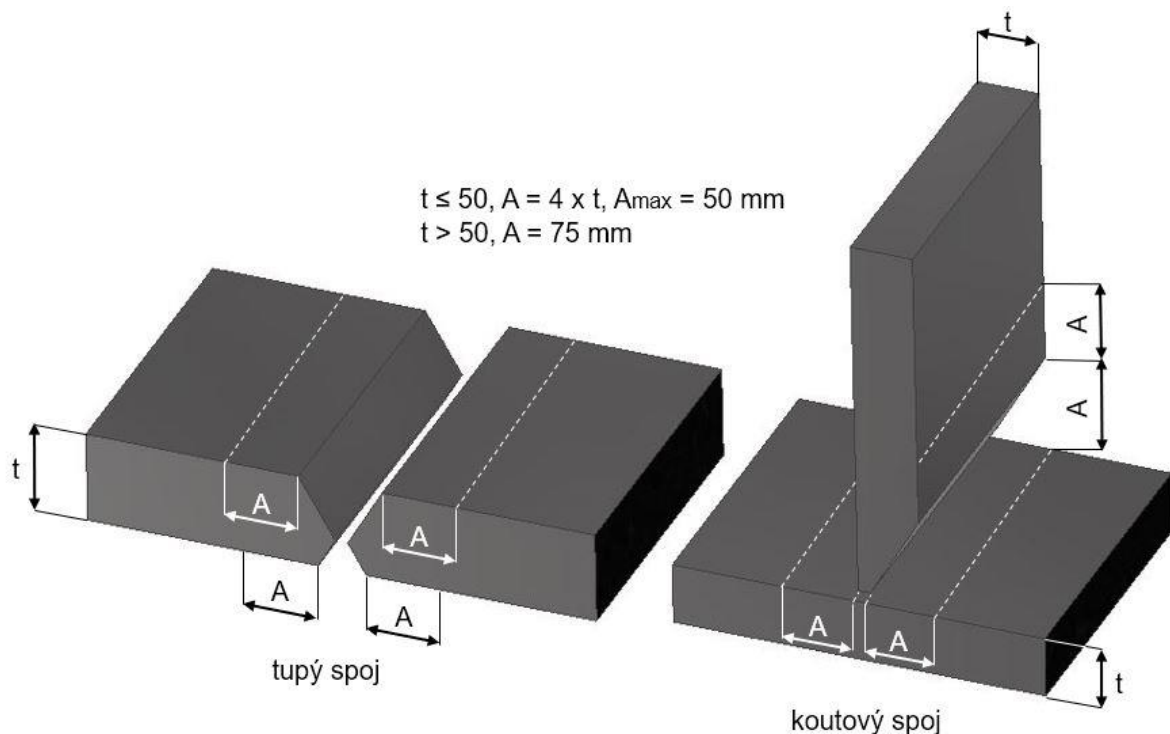
Pokud je teplota přehřevu počítána dle vztahu 2.9 musí být splněny podmínky [15]:

- uhlíkový ekvivalent základního materiálu CET = 0,2 až 0,5 %, dále má být uhlíkový ekvivalent CET základního materiálu větší o 0,03 % než CET svarového kovu, pokud ne pro výpočet teploty přehřevu se použije CET svarového kovu zvýšený o 0,03 %
- tloušťka svařovaného materiálu d = 10 až 90 mm, při tloušťce materiálu nad 25 mm je nutné, aby stehy a kořenové svary byly svařované ve dvou vrstvách, a to s použitím měkkého a houževnatého svarového kovu,
- jednovrstvé koutové, stehové a kořenové svary mají mít minimální délku 50 mm,
- obsah difuzního vodíku základního materiálu HD = 1 až 20 ml·100g⁻¹,
- použitý tepelný příkon v rozsahu Q = 0,5 až 4,0 kJ·mm⁻¹,
- pokud tloušťka svaru nedosáhne jedné třetiny tloušťky svařovaného materiálu u více vrstevých tupých a koutových svarů neochlazují se svary na teplotu interpass, jinak se snižuje obsah difuzního vodíku dohřevem,

- u svarů s pouze částečným průvarem je potřeba sledem svařování minimalizovat jejich plastickou deformaci,
- svařované oceli skupiny 1 až 4 podle TNI CEN ISO/TR 15608 s mezí kluzu větší jak 460 MPa, tloušťkou materiálu nad 30 mm a pod tavidlem je doporučeno snížit obsah difuzního vodíku použitím dohřevu na minimální teplotě 250 °C po dobu minimálně 2 hodiny přímo z teploty interpass ihned po svařování.

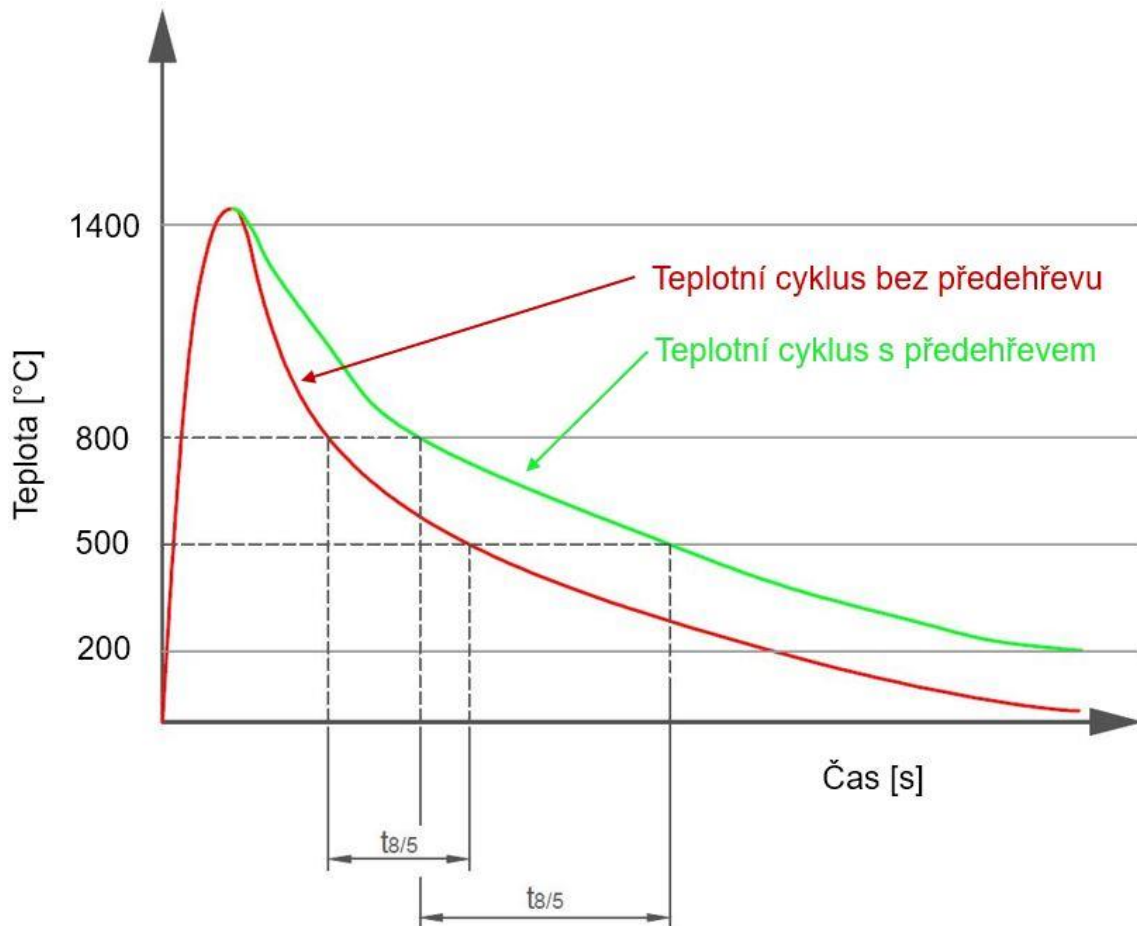
Vypočítané teploty platí pro podmínky, kdy okolní teplota je nad 0 °C. Pokud svařování probíhá za nestandardních podmínek například nízká teplota, povětrnostní vlivy nebo vyšší vlhkost, je potřeba použít vyšší teplotu přehřevu [21].

Měření teploty přehřevu se řídí normou ČSN EN ISO 13916. Měření se provádí v určené vzdálenosti, která je zobrazena na obr. 6. Teplota je měřena na opačné straně ohřívajícího materiálu. Pokud je teplota potřeba měřit na ohřívající straně je nutné dodržet čas pro vyrovnaní teploty po odstranění topných elementů. Tato doba jsou 2 minuty na každých 25 mm tloušťky základního materiálu. V případě, kdy je použito zařízení, které ohřívá materiál po celou dobu svařování a není přístup k měření z opačné strany, provádí se měření na ohřívající povrchu bezprostředně u místa svarové plochy. V normě jsou definované i další teploty, které jsou důležité pro svařování. Teplota interpass, označovaná T_i , která udává nejčastěji maximální teplotu svaru a přiléhajícího základního materiálu bezprostředně před aplikací další svarové housenky. Teplota ohřevu, označovaná T_m , která udává minimální teplotu oblasti svaru, která musí být dodržena před začátkem svařování, pokud bylo přerušeno. Na měření teploty se používají termokřídy (TS), dotykové teploměry (CT), termočlánky (TE) a optické, nebo elektrické zařízení pro bezdotykové měření (TB) [22, 23].



Obr. 6 Vzdálenosti měřících bodů, převzato z [22].

Pomocí teplotního cyklu, který vyjadřuje závislost teploty na čase, můžeme sledovat rychlost ochlazování. Nejčastěji sledujeme dobu ochlazování mezi teplotami 800 °C a 500 °C. Tato doba se nazývá parametr $t_{8/5}$. Při těchto teplotách dochází ke strukturním transformacím ve svarovém spoji. Dodržením tohoto parametru můžeme docílit potřebné výsledné struktury ve svaru. Volbou teploty přehřevu nebo velikostí vneseného tepla tak dosahujeme požadovaného parametru $t_{8/5}$. Ukázka teplotního cyklu svařování s přehřevem a bez přehřevu je na obr. 7 [20].



Obr. 7 Teplotní cyklus svařování s přehřevem a bez přehřevu, převzato z [20].

Stanovit parametr $t_{8/5}$ můžeme z ARA diagramu „in situ“, pomocí měření termočlánkem nebo výpočtem. Výpočet se liší pro malé a velké tloušťky materiálu. U svařování velkých tloušťek se počítá s trojrozměrným tepelným tokem. U malých tloušťek je počítáno podle dvourozměrného tepelného toku. Pokud parametr $t_{8/5}$ narůstá, klesají hodnoty tvrdosti, snižuje se nárazová práce a tranzitní teplota roste [20, 23].

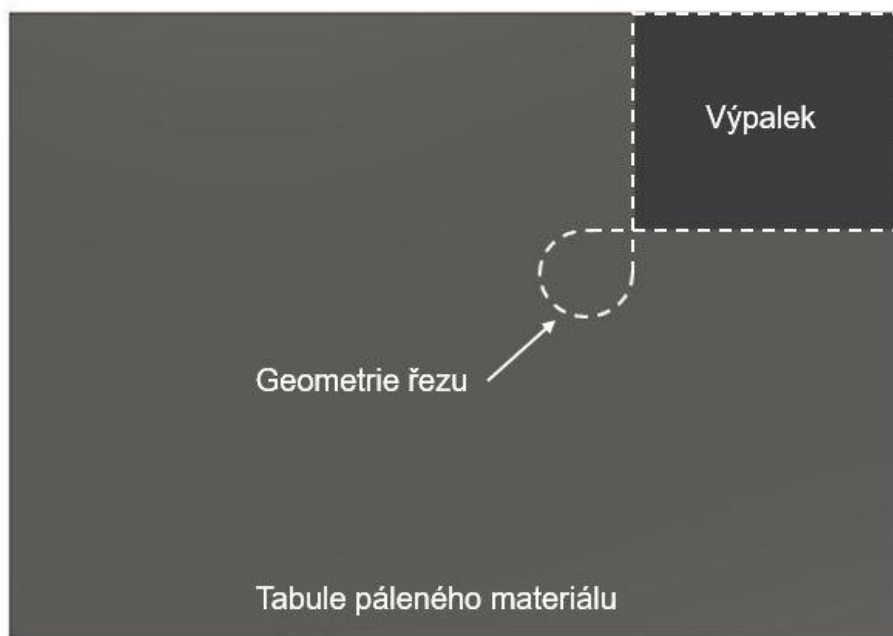
2.5 Dělení ocelí s vyšší pevností

V praxi se dělení materiálu provádí několika způsoby, které se rozdělují na studený a tepelný proces. Do studených procesů patří metody stříhání, vysekávání a řezání vodním paprskem s abrazivem. První dvě metody jsou při použití pro ocel s vyšší pevností vhodné pro dělení menších tloušťek. Při použití studených procesů v materiálu nevzniká žádná tepelně ovlivněná oblast a nedochází tak ke změně mechanických vlastností. U tepelných procesů, kam patří řezání kyslíkem, plazmou a laserovým paprskem, vzniká tepelně ovlivněná oblast (TOO), tab. 5 [1, 18].

Tab. 5 Metody dělení materiálu a velikost TOO, převzato z [1].

Metoda dělení	Tepelně ovlivněná oblast řezáním
Plamen	4 až 10 mm
Plasma	2 až 5 mm
Laser	0,4 až 3 mm
Vodní paprsek	0 mm

V této oblasti dochází ke změnám mechanických vlastností a stejně jak u svařování zde hrozí vznik studených (vodíkových) trhlin, které se mohou objevit až po několika hodinách nebo dnech. U tepelných procesů použití předehřevu a nižší řezné rychlosti snižuje úroveň tahových napětí. Další možností snížení zbytkových tahových napětí je volba geometrie řezání, kam patří například vyhnutí se ostrým rohům při řezání. Ostré rohy jsou místa, kde dochází k poklesu rychlosti řezání a vzniká tak v těchto místech k nadměrnému pnutí. Pokud jsou rohy nutné, doporučuje se zvolit postup řezání, který je na obr. 8 [20].



Obr. 8 Vhodný postup pro řezání rohů, převzato z [20].

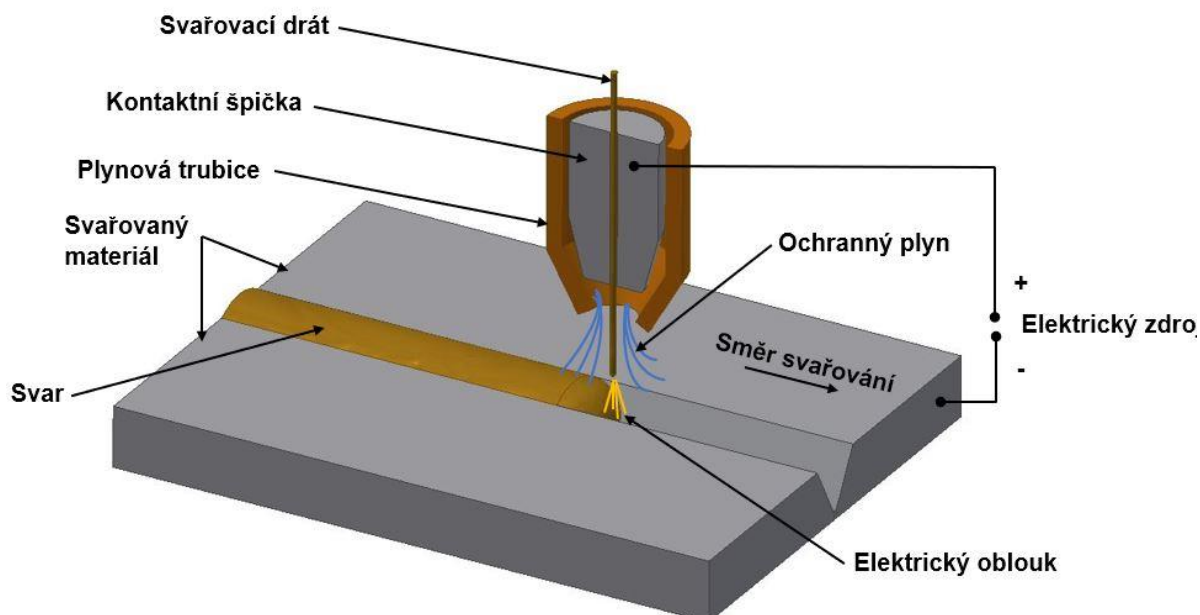
Nejúčinnější metoda, jak zamezit vodíkovému praskání je použití předehřevu. Nicméně u metod jako je laserové a plazmové svařování má negativní vliv na kvalitu řezu. V závislosti na situaci může být předehříván celý materiál nebo jen jeho část, která bude řezána. Pokud jsou páleny díly o větších tloušťkách, které jsou náchylnější na vodíkové trhliny, je aplikován dohřev nebo se díly přikrývají minerální vlnou po řezání, aby se prodloužila doba ochlazování. U řezání menších dílů, u kterých jejich objem nedokáže dostatečně odvést dodané teplo při řezání, se vyskytuje riziko vyžhání materiálu. Teplota tak může vzrůst nad maximální teploty předehřevu a může dojít k poklesu tvrdosti celého dílu. Možným řešením, jak minimalizovat ztrátu tvrdosti je provádět řezání pod vodou, které snižuje dopad tepla a snižuje i riziko žhání u malých dílů. Mezi další výhody řezání pod vodou je menší deformace výpalku. Důvodem je, že voda chladí díl při řezání a brání tak teplu deformovat díl. Další výhodou je snížení kouře a prachu vzniklého při řezání a snazší manipulace s díly po řezání [18, 20].

3 METODY SVAŘOVÁNÍ

V experimentální části diplomové práce budou porovnávány dvě metody svařování. První metoda je obloukové svařování v atmosféře aktivního plynu tzv. MAG, která patří k jedné z nejrozšířenějších metod svařování. Druhou metodou bude CMT Advanced. Jedná se o modifikovanou metodu obloukového svařování v ochranné atmosféře, které v průmyslové praxi není natolik rozšířená.

3.1 Metoda MAG

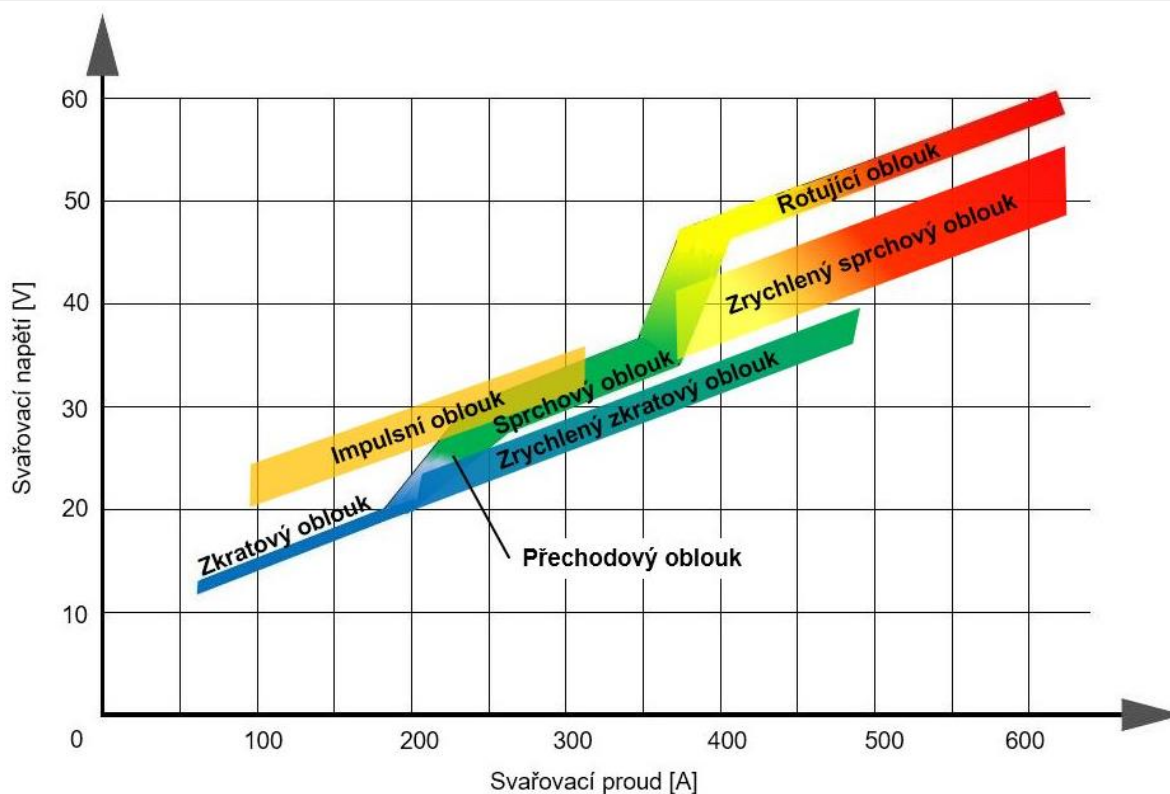
Metoda MAG z anglického metal active gas je metoda obloukového svařování v atmosféře aktivního plynu. Principem metody (obr.9) je hoření elektrického oblouku mezi tavící se elektrodou a svařovaným materiálem. Tavící se elektroda je u této metody ve formě svařovacího drátu. Svařovací drát je odvíjen z cívky a pomocí podávacího zařízení, vybaveného kladkami, je uvnitř bodně podáván do svařovacího hořáku. Přívod elektrického proudu je zajištěn pomocí tření mezi drátem a špičkou hořáku, který je vyroben z dobře vodivého materiálu. Volný konec drátu je obklopen plynovou hubicí, která přivádí a zároveň usměrňuje ochranný plyn. Ochranný aktivní plyn zamezuje přístupu okolního vzduchu ke svarové lázni. Dalším úkolem je aktivně se podílet na chemických reakcích, které probíhají v roztaveném svarovém kovu. Tuto metodu lze snadno využít v automatizovaném nebo robotizovaném provozu, protože přísun drátu i plynu je mechanizován. Metoda MAG má jednu z největších proudových hustot a to až $600 \text{ A} \cdot \text{mm}^2$ se svařovacími proudy od 30 do 800 A. S vyšším svařovacím proudem roste rychlost svařování a nutnost svařovacího hořáku chladit, aby nedošlo k jeho poškození. U této metody se svařování provádí nejčastěji stejnosměrným proudem, kde kladný pól je přiveden na svařovací drát a záporný pól je na svařovaném materiálu [24, 25].



Obr. 9 Princip metody MAG, převzato z [24].

3.2 Přenos kovu v oblouku

Přenosem kovu se u svařovacího procesu rozumí přechod roztaveného přídavného materiálu do místa svarové lázně. Na přenos kovu má vliv napětí, proud, ochranný plyn a přídavný materiál. Rozdělení typů přenosů kovu v závislosti na svařovacích parametrech je znázorněno na obr. 10 [26].



Obr. 10 Druhy přenosu kovu v oblouku, převzato z [27].

Krátký oblouk se zkratovým přenosem

U zkratového přenosu kovu se na svařovacím drátu začíná odtavovat kapka kovu, která při kontaktu se svařovaným materiálem způsobí zkrat a přerušení oblouku. Při zkratu dojde k navýšení proudu a kapka kovu se oddělí od svařovacího drátu a opět se zapálí oblouk. Tento proces nastává v rozsahu proudu od 60 do 180 A při napětí okolo 14 až 22 V. Zkratový přenos probíhá v čistém oxidu uhličitém nebo ve směsích argonu a oxidu uhličitém. Kvůli opakovanému zhasínání elektrického oblouku dochází k poměrně velkému rozstříku přídavného materiálu a je tedy zapotřebí dynamický zdroj, který dokáže pojmout proudové špičky. Tento přenos kovu je používán u svařování tenkých plechů a navařování kořenových vrstev [26, 27].

Krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem

Zrychlený zkratový přenos má napětí podobné jako klasický zkratový přenos, tedy okolo 14 až 25 V, ale svařovací proud je nad 200 A. Vyšší bývá i rychlost svařovacího drátu a výkon navaření. Drát je pod velkou rychlostí a úhlem sklonu tlačěn do místa svaru. Vyšší frekvence zkratu způsobuje menší kapky a je potřeba navýšit průtok ochranného plynu. Přenos kovu probíhá ve směsi argonu a 8 % oxidu uhličitého. Metoda je vhodná pro rychlejší svařování tenkých plechů, kořenových svarů a polohových svarů. Vyznačuje se také menším rozstříkem bez ulpívání kapek roztaveného kovu na svařovaném materiálu [26, 27].

Přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty

Přechodový oblouk vzniká při svařovacím napětí okolo 22 až 28 V a proudu 190 až 300 A. Často je tento přenos kovu nazýván kapkovým. Vlivem vysokého proudu je na konci drátu odtavována velká kapka kovu, která je velkou rychlostí vymrštěna do svarové lázně. Toto oddělování probíhá při nízké frekvenci okolo 5 až 40 kapek

za sekundu. Přechodový oblouk probíhá v čistém oxidu uhličitém. Tento proces se kvůli nepravidelným zkratům a mimoosém uvolňování kapek vyznačuje velkým rozstříkáním a v praxi se proto často nepoužívá [26, 27].

Dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem

Tento přenos je realizován ve směsích oxidu uhličitého a argonu (minimálně 80 % argonu). Argon způsobuje snazší ionizaci plynu, díky které vzniká plazma, které obklopuje a přehřívá konec tavicího se drátu. Pro přenos jsou typické hodnoty proudu okolo 200 až 500 A a napětí od 28 do 40 V. Vysoký proud a působení elektromagnetických sil vytváří velké množství drobných kapek, které tvoří tzv. sprchu. Sprchový přenos vnáší do základního materiálu velké teplo. Výhodou tohoto přenosu je nízký rozstříkání materiálu a použití pro svařování silných a středně silných materiálů [26, 27].

Impulsní bezzkratový přenos

U většiny druhů svarových přenosů kovu v oblouku dochází k velkému rozstříkání roztaveného kovu a výskytu vad ve svarech. Z tohoto důvodu byl vyvinut impulsní přenos kovu. Tento přenos má svařovací proud a napětí řízený v čase pomocí mikroprocesoru svařovacího zdroje. Základní svařovací proud, od 20 do 50 A, slouží k ionizaci plynu a tím vedení elektrického proudu. V řízených intervalech je proud navyšován a slouží ke svařování. Tento proud můžeme měnit spolu s frekvencí tzv. pulsů, která se pohybuje mezi 25 až 500 Hz. Mikroprocesor může řídit i tvar průběhu svařovacího proudu. Pro tento přenos se používá obdobné složení ochranného plynu jako u sprchového přenosu. Výhoda tohoto přenosu je ve vysokém výkonu odtavení při nižším vneseném teple. Mezi nevýhody patří vyšší cena svařovacího zdroje a nutnost vyššího stupně ochrany kvůli vysoce emitovanému elektromagnetickému záření v oblouku [26, 27].

Moderovaný bezzkratový přenos

U tohoto přenosu se používají velmi vysoké svařovací parametry. Svařovací proud dosahuje hodnot od 450 do 750 A a napětí hodnot od 40 do 50 V. Ochranný plyn se pro tuto metodu používá Argon s 8 % oxidu uhličitého. Díky vysokým svařovacím parametrům je potřeba vyšší rychlost svařovacího drátu a vyšší průtok ochranného plynu v rozmezí 18 až 25 l.min⁻¹. Kapky u tohoto přenosu dosahují velikosti průměru drátu a vysokou frekvencí a rychlostí dopadají do svarové lázně. Metoda je používána pro svařování velkých tloušťek při vyšších svařovacích rychlostech [26, 27].

Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu

Tento přenos kovu je velmi podobný moderovanému bezzkratovému přenosu. Hodnoty svařovacího proudu jsou stejné, liší se ale vyšším napětím, které dosahuje hodnot až 65 V. Konec svařovacího drátu je vysokým proudem a napětím zahříván až na teplotu tavení. Intenzivní magnetické pole roztáčí vysunutý konec drátu a uvolňované kapky kovu vytváří kuželový tvar. Rotující oblouk, je proto používán pro svařování hlubokých a širokých svarů [26, 27].

3.3 Ochranné plyny

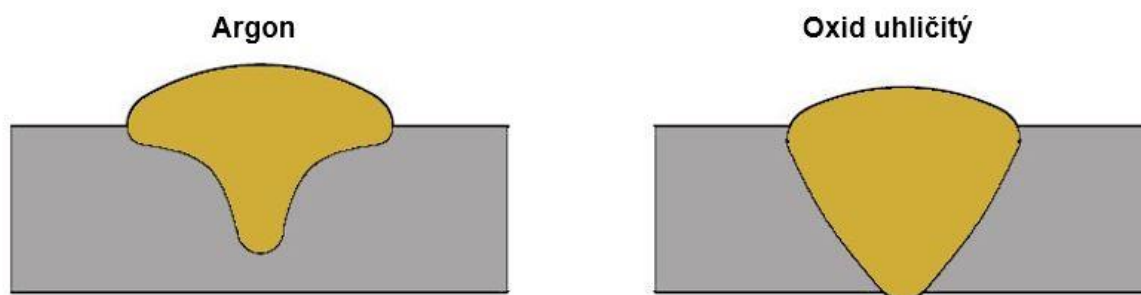
Hlavní funkcí ochranného plynu je chránit svarovou lázeň před kyslíkem a dusíkem ze vzduchu. Díky tomu vznikají příznivější mechanické vlastnosti ve svarovém kovu. Ochranný plyn také pomáhá usnadnit stabilizaci oblouku při svařování. Chemické složení ochranného plynu je závislé na konkrétní situaci svařování. Při svařování ocelí s vyšší pevností se ochranný plyn používá stejný jako pro svařování nelegovaných a nízko legovaných ocelí, tedy aktivní plyn, který se zároveň podílí na chemických a metalurgických vlastnostech svarové lázně. Nejčastěji se používají směsi argonu s oxidem uhličitým nebo samotný oxid uhličitý. Některé směsi jsou určeny pro svařování určitým typem oblouku [24, 28].

Argon

Přidání argonu do ochranného plynu je podporována tvorba oblouku při svařování. Atomy argonu jdou poměrně snadno ionizovat, v důsledku toho argon podporuje snadné zapalování oblouku. Argon také podporuje tvorbu sprchového přenosu kovu, ale 100 % argonu by vedlo k nestabilnímu oblouku během svařování. Je tedy potřeba, aby ochranný plyn obsahoval další složky plynu, které mají schopnost stabilizovat oblouk. Argon podporuje tvorbu úzkého a hlubokého profilu svaru, někdy nazývaného jako argonový prst, obr. 11. Toto snižuje schopnost přenosu tepla v tavenině v průběhu svařování. Negativní efekt relativně úzkého a hlubokého profilu svaru je někdy nedostatečné promísení a propojení materiálu ve svaru a vyšší náchylnost k pórovitosti ve svarovém kovu [20, 28].

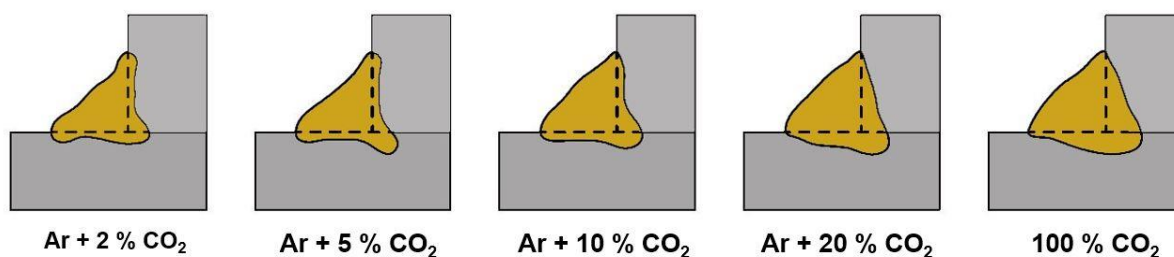
Oxid uhličitý

Oxid uhličitý ve směsích ochranného plynu přispívá ke stabilitě oblouku. Také zvyšuje kapacitu tepla, která pomáhá vytvářet poměrně velký a kulatý profil svaru, obr. 11. Tento typ svaru poskytuje lepší odolnost proti pórovitosti a je lepší z hlediska propojení svařovaných materiálů. Oxid uhličitý se do směsných ochranných plynů přidává poměrně v malém množství. Pokud by ho bylo ve směsi hodně, bránilo by vzniku sprchového oblouku. Pro sprchový oblouk by mělo být oxidu uhličitého ve směsi méně než 25 % [20, 28].



Obr. 11 Profily svaru při použití argonu a oxidu uhličitého, převzato z [20].

Ve směsích ochranných plynů se kombinují vlastnosti jednotlivých složek plynů. Zvýšený podíl konkrétního plynu vede k většímu vlivu vlastností pro konkrétní plyn. Ukázka možných profilů svaru podle složení ochranného plynu jsou znázorněny na obr.12 [28].



Obr. 12 Profily svarů podle složení ochranného plynu, převzato z [20].

Některé směsi ochranných plynů mohou obsahovat i menší množství kyslíku, do 5 %. Kyslík podporuje oxidační hoření a dále pomáhá zvýšit povrchové napětí roztaveného kovu, tekutost svarové lázně a zlepšuje i odplynění. Ochranné plyny tak mohou ovlivňovat způsob přenosu kovu, hloubku závaru, množství rozstříku, rychlost svařování a stabilitu elektrického oblouku. Průtok ochranného plynu se pohybuje od 8 do 25 l.min⁻¹. Plyn je dodáván od výrobce v požadovaném chemickém složení v talkových lahvích nebo je možné plyn čerpat z centrálních rozvodu a pomocí směšovacího zařízení vytvářet potřebné složení plynu [20, 28].

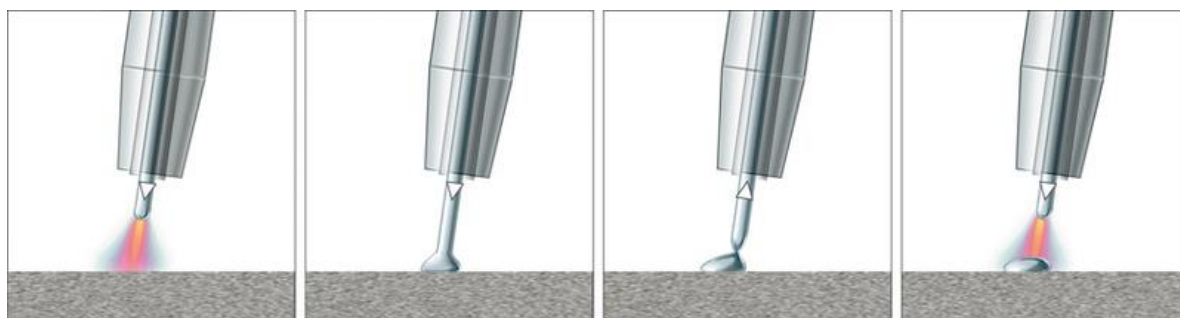
3.4 Přídavný materiál

Oceli s vyšší pevností, jako jsou například Hardox nebo Weldox, jsou obvykle svařovány nelegovaným nebo nízko legovaným přídavným materiálem. Tyto přídavné materiály mají obsah legujících prvků okolo 7 až 8 hm. %. Zbývající část se skládá z železa a malého podílu nečistot. Zásadním významem tohoto přídavného materiálu je kombinace vysoké statické pevnosti s příznivými hodnotami houževnatosti ve svarovém kovu. Přídavné materiály, které jsou dostupné na trhu, mají nejvyšší hodnotu meze kluzu okolo 930 MPa. Použití přídavného materiálu, který má nižší mez kluzu než základní materiál, může mít i výhody v podobě lepší houževnatosti ve svarovém kovu, nižší zbytkové napětí a zvýšenou odolnost vůči vodíkovým trhlinám. Pokud je svařován vícevrstvý svar doporučuje se, aby první vrstvy byly svařeny přídavným materiálem s nižší pevností a až na další plnicí vrstvy byl použit přídavný materiál s vyšší pevností. Tento způsob podporuje odolnost vůči vodíkovým trhlinám. Při volbě vhodného přídavného materiálu je důležité, aby obsah vodíku byl dostatečně nízký a bylo tak minimalizováno riziko vzniku studených (vodíkových) trhlin. Doporučené maximální množství difuzního vodíku je 5 ml H₂ ve 100 g svarového kovu. Tyto požadavky plní většina plných drátů, které se používají pro MAG svařování. Plněné elektrody, které obsahují ve formě prášku tavidla, struskotvorné přísady a kovový prášek jsou náchylnější k vlhkosti z okolního prostředí a mohou být tak zdrojem vodíku ve svarovém kovu. Přídavný materiál má být skladován, tak aby nebyl vystaven nečistotám, vlhkosti a mastnotě [16; 20].

Další možností je svařovat oceli s vyšší pevností pomocí přídavného materiálu z nerezové austenitické oceli. Svarový kov tak bude obsahovat podstatné množství austenitické struktury po svaření. Tento spoj má velmi vysokou odolnost proti vodíkovým trhlinám, protože v austenitu se rozpustí více vodíku než v mikrostruktuře nelegovaného nebo nízko legovaného přídavného materiálu. Austenit také zvyšuje tažnost ve svarovém kovu, proto svar může mít vyšší houževnatost než základní materiál. Nerezový austenitický přídavný materiál se také používá, pokud potřebujeme svařit ocel o vyšší pevnosti s nerezovou ocelí, manganovou ocelí a obtížně svařovanou ocelí, jako je například pružinová ocel. Nevýhodou těchto přídavných materiálů je vyšší cena [16, 20].

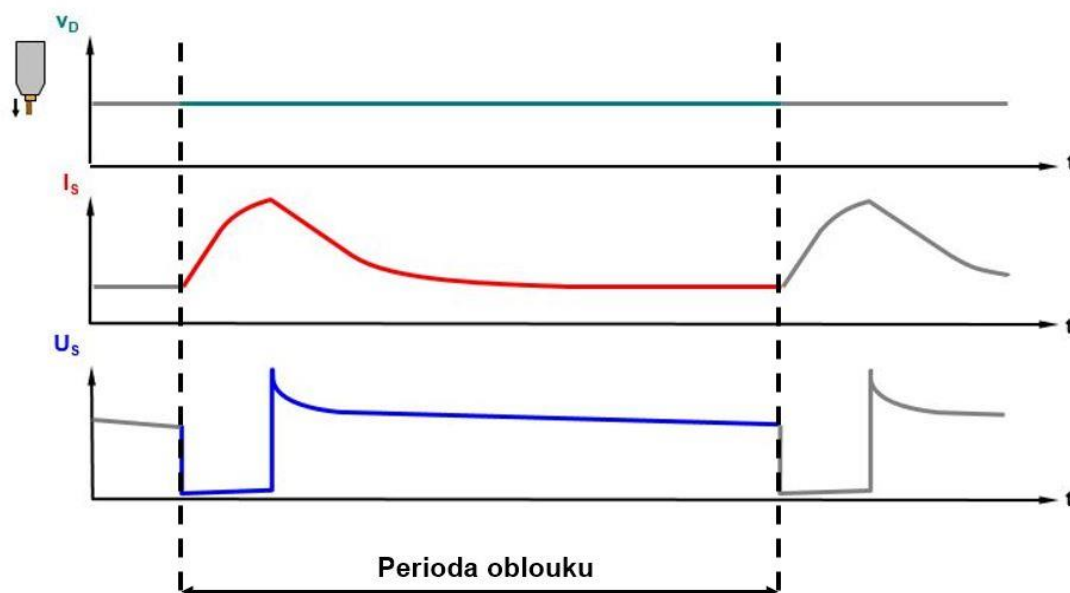
3.5 Metoda CMT

Metoda CMT je zkratka z anglického cold metal transfer (v překladu studený přenos kovu). Jedná se o modifikovanou metodu obloukového svařování v ochranné atmosféře. Metodu CMT můžeme používat pro aplikace, kde je využíván aktivní i inertní plyn. Tento proces pracuje s nízkým vnosem tepelné energie oproti konvenčním metodám MAG/MIG. Metoda využívá speciálního uvolňování kapky kovu, která využívá střídavého dopředného a zpětného pohybu drátu, jak je znázorněno na obr. 13 [29].



Obr. 13 Princip metody CMT [30].

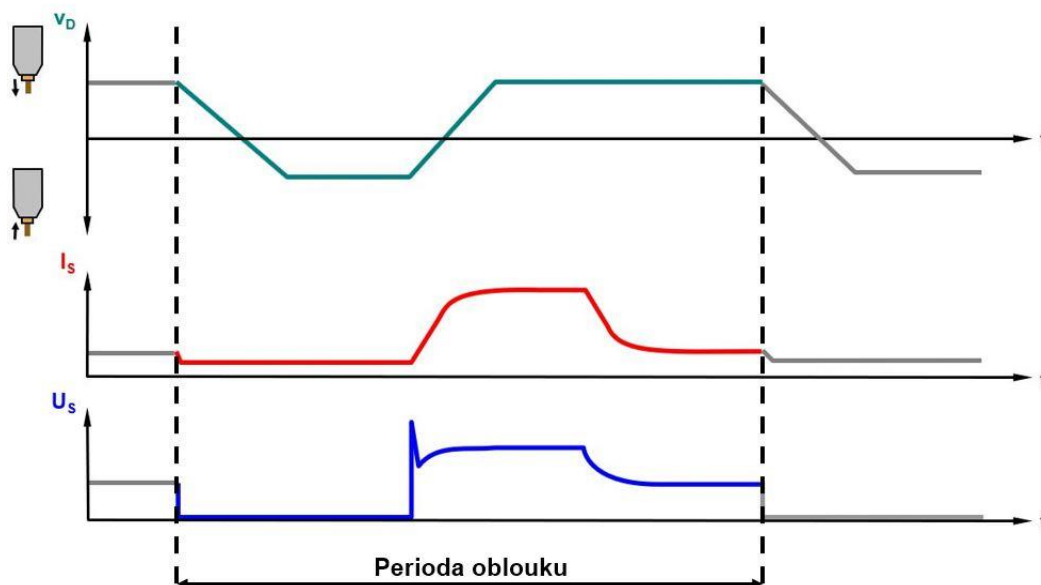
Principem běžného svařování krátkým obloukem je vznik zkratu se svařovaným materiálem a pouze dopředný pohyb drátu. V okamžiku zkratu dochází k nárůstu proudu, který způsobí přerušení zkratu. Vysokým proudem dochází k explosivnímu uvolnění kapky kovu a znovu zapálení oblouku. Kvůli explosivnímu uvolňování kapek kovu se tato metoda vyznačuje velkým rozstříkem. Další nevýhodou je vysoké tepelné zatížení, které vzniká při zkratovém proudu. Ukázka průběhu zkratového oblouku je na obr. 14 [29].



Obr. 14 Průběh rychlosti podávání drátu (v_D), svařovacího proudu (I_s), svařovacího napětí (U_s) pro krátký oblouk, převzato z [30].

U metody CMT se svařovací drát nepohybuje pouze ve směru dopředném, ale dochází zde k opakovanému zatažení. Svařovací drát se u této metody pohybuje směrem ke svařovanému materiálu do doby, než vznikne zkrat. V tomto okamžiku dochází k obrácení pohybu drátu a snížení proudu a napětí. Jakmile dojde k přerušení zkratu, směr pohybu drátu se znovu obrátí a proces začíná znovu. Tento proces

neprobíhá podle stanoveného časového programu, je řízen vznikem a přerušením zkratu. Pokud zkrat nastane za delší dobu, začne také zatahování drátu později a naopak. Díky tomu má metoda CMT perfektní kontrolu délky oblouku, která je po každém zkratu nastavena pomocí mechanických veličin. Průběh svařování metodou CMT je na obr. 15 [30].



Obr. 15 Průběh rychlosti podávání drátu (v_D), svařovacího proudu (I_s), svařovacího napětí (U_s) pro metodu CMT, převzato z [30].

Přerušení zkratu tedy u této metody nedochází působením proudu, ale pomocí zpětného zatažení drátu, díky kterému dochází i k uvolnění kapky. Zkratový proud je tedy udržován na velmi nízké úrovni, která přispívá k nižšímu tepelnému zatížení. Průměrná frekvence těchto cyklů dosahuje až 70 Hz, to znamená, že délka oblouku je nastavována až sedmdesátkrát za sekundu [30].

Aby bylo možné tento proces provozovat, musí být svařovací systém vybaven pohonnou jednotkou v hořáku a absorpčním členem. Celý svařovací systém je digitálně řízený a probíhá zde velmi rychlá komunikace mezi jednotlivými komponenty. Protože u metody CMT dochází k rychlé změně pohybu svařovacího drátu, byl svařovací hořák vybaven pohonnou jednotkou, která zprostředkovává potřebný pohyb drátu. Jednotkou je střídavý servomotor bez převodovky, protože převodovka by při vysoké frekvenci pohybu vnášela do pohybu nepřesnosti. Vinutí motoru bylo zabudováno přímo do krytu hořáku z důvodu ušetření velikosti a lepší polohy těžiště pro robotizované svařování. Ukázka hořáku pro ruční a robotizované svařování metodou CMT je na obr. 16 [31].



Obr. 16 Svařovací hořák pro metodu CMT. a) ruční svařování, b) robotizované svařování [32, 33].

Motor v podavači drátu, oproti motoru v hořáku, koná jenom pohyb dopředu. Je to z důvodu velké setrvačnosti podavače, který nese hmotnost cívky s drátem, kvůli které by nedokázal měnit směr pohybu potřebně rychle. V určité chvíli tedy dochází, že motor v podavači se otáčí proti pohonné jednotce v hořáku. Proto je v systému zařazen absorbér. Ten má za úkol vyrovnat rozdíly v délce drátu mezi těmito dvěma posuvy. Bowden v absorbéru je upevněný pouze na jedné straně, druhý konec je v něm volně. Oblouk, který vytváří bowden může tedy dosedat na vnitřní a vnější okraj absorbéru, podle toho, jestli dochází k většímu nebo menšímu odběru drátu. Otáčky podavače se řídí tak, aby bowden v absorbéru byl na středu. Díky tomu může pohonná jednotka v hořáku vytahovat a zatahovat drát zcela volně bez vynaložení větší síly. Absorbér je zobrazen na obr. 17 [31].

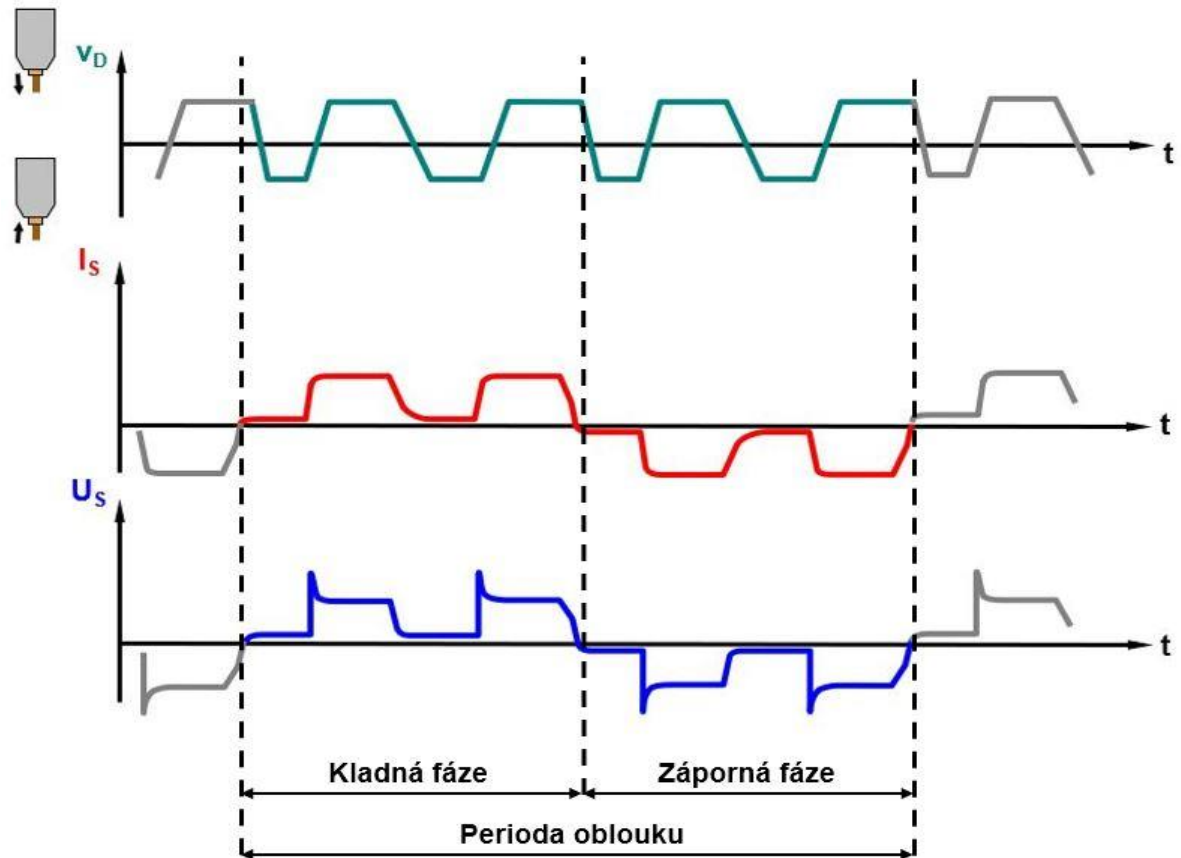


Obr. 17 Absorbér [30]

Metodou CMT je možné svařovat všechny možné materiály jako metodami MAG a MIG. Výhodou je oproti nim, že metoda je téměř bez rozstříku. Odpadá tak následné čištění, které je časově náročné. Další výhodou je svařování tenkých plechů. Kvůli nízkému tepelnému zatížení je tato metoda schopná svařovat tenké plechy tak, aby se spojily, ale neroztavily. Toho se využívá především v automobilovém průmyslu, který se snaží vyrábět lehká vozidla. Metodou je možné svařovat například hliníkový plech o tloušťce 0,4 mm bez použití svařovací podložky. Metoda CMT je také schopna svařovat ocel s hliníkem. Ve spoji dochází k natavení hliníkového materiálu a u ocelového materiálu dochází k pájení. Podmínkou pro spojení je, že ocelový plech musí být pozinkovaný. Požadavek na pozinkovanou vrstvu je alespoň 10 mikronů, aby byl povrch dostatečně smáčivý. Nevýhodou tohoto spojení je vznik křehké intermetalické fáze, která má velkou tvrdost, nízkou tvárnost a poměrně vysokou náchylnost ke korozi. Pro snížení korozní náchylnosti se používá přídavný materiál na bázi AlSi [34, 35].

3.6 CMT Advanced

Metoda CMT Advanced ještě rozšiřuje možnosti svařování. Proces je vhodný na aplikace, které vyžadují velmi nízký a flexibilně nastavitelný vnos tepla. Tato metoda dokáže pracovat s vyšší rychlostí svařovacího drátu a díky tomu i s vyšším odtavným výkonem při nezměněné úrovni vnesené energie. CMT Advanced kombinuje střídání polaritu oblouku s reverzací pohybu drátu. Kladná fáze oblouku určuje závar a působí zde čistící efekt. Záporná fáze má vliv především na odtavný výkon. Znamená to tedy, že při stejné úrovni elektrického výkonu se v záporné fázi odtaví větší množství svařovacího drátu než v kladné fázi. Ke změně polarity dochází během fáze zkratu v době, kdy nehoří oblouk, protože svařovací drát je v kontaktu se svařovaným materiálem. Proces je tak velice stabilní. Délka oblouku je tedy opět řízena mechanicky, prostřednictvím pohybu drátu nezávisle na napětí. Průběh svařování CMT Advanced je na obr. 18 [35, 36].



Obr. 18 Průběh rychlosti podávání drátu (v_D), svařovacího proudu (I_s), svařovacího napětí (U_s) pro metodu CMT Advanced, převzato z [36].

Využití této metody je především u svařování velmi tenkých plechů. Metoda se vyznačuje taky velmi dobrou přemostitelností spáry, bez nutnosti rozkyvu drátu. Kvůli poměrně nízkému vnosu tepla je možné svařovat i oceli s vyšší pevností, které jsou na vnos tepla citlivější [37].

4 KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ

Z důvodu bezpečnosti provozu svařovaných konstrukcí je důležité, aby svarové spoje splňovaly požadavky pro danou konstrukci, proto je nutné kontrolovat svarové spoje. K hodnocení a kontrole svarových spojů se používají destruktivní a nedestruktivní zkoušky. U nedestruktivních zkoušek nedochází k porušení svaru a výrobek je možné dále používat. Tyto zkoušky slouží k odhalení svarových vad, a to buď vnitřních nebo povrchových. Naopak u destruktivních zkoušek je zkušební svar nenávratně zničen a slouží především k zjišťování a ověření mechanických vlastností. Díky těmto zkouškám můžeme odhalit povrchové a vnitřní vady svarů, ale také hodnotit tvar svaru a velikost TOO. Vady ve svarech vznikají například při tuhnutí svarové lázně, špatnou nebo nedostatečnou přípravou svarových ploch nebo špatným způsobem svařování. Vady svarových spojů jsou popsány v normě ČSN EN ISO 6520-1, která rozděluje vady do šesti skupin, a to na trhliny, dutiny, pevné vměstky, studené spoje a neprůvary, vady tvaru a rozměru a jiné vady. Základní nedestruktivní zkoušky k zjišťování povrchových vad [15, 38]:

- Vizualní kontrola tavných svarů (ČSN EN ISO 17637),
- zkoušení kapilární metodou (ČSN EN ISO 23277),
- zkoušení magnetickou metodou práškovou (ČSN EN ISO 17638).

Základní nedestruktivní zkoušky pro zjišťování vnitřních vad [38]:

- Radiografické zkoušení (ČSN EN ISO 17636-1 a ČSN EN ISO 17636-2),
- zkoušení ultrazvukem (ČSN EN ISO 17640).

Základní destruktivní zkoušky [38]:

- Příčná zkouška tahem (ČSN EN ISO 4136),
- zkouška ohybem (lámavosti, ČSN EN ISO 5173),
- zkouška rázem v ohybu (ČSN EN ISO 9016),
- zkouška rozlomením (ČSN EN ISO 9017),
- makroskopická a mikroskopická kontrola svarů (ČSN EN ISO 17639),
- zkoušení tvrdosti (ČSN EN ISO 9015-1),
- zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů (ČSN EN ISO 9015-2).

V experimentální části této práce bude provedena a hodnocena příčná zkouška tahem, zkouška mikrotvrdosti a hodnocení mikro a makro struktury, proto budou podrobněji popsány pouze tyto zkoušky.

4.1 Příčná zkouška tahem

Tato zkouška je jedna ze základních metod k získání mechanických vlastností svarového spoje. Princip této zkoušky je založen na plynulém zatěžování zkušební vzorku až do jeho přetržení. Během této zkoušky je zjišťována závislost zatěžující síly na prodloužení, které jsou zobrazovány v tahovém diagramu. Z těchto veličin je následně určena mez pevnosti (R_m), mez kluzu (R_e), popřípadě smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$), tažnost (A) a kontrakce (Z). Provedení zkoušky předepisuje norma ČSN EN ISO 4136, která stanovuje rozměry zkušebních vzorků, způsob jejich odběru a opracování, pro kovové materiály svařené metodami tavného svařování. Zkušební vzorky se odebírají příčně (kolmo) ke svarovému spoji. Svarový spoj má být po opracování uprostřed zkušební vzorku. Vzorky musí být označeny, aby bylo možné určit místo svarového spoje, které bylo zkoušeno. Metoda dělení pro odběr

vzorku nesmí ovlivnit nebo změnit jeho vlastnosti. Při použití tepelného dělení je potřeba ovlivněnou část obrobit. Samotná zkouška tahem je podle normy ČSN EN ISO 6892-1, která specifikuje průběh, hodnocení a určení hodnot mechanických vlastností. Vztahy pro určení základních a deformačních charakteristik jsou [15, 39]:

Pevnost v tahu [40]:

Pevnost v tahu je napětí odpovídající maximálnímu zatížení.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (4.1)$$

kde: F_m - maximální zatěžující síla [N],
 S_0 - počáteční plocha příčného průřezu zkušební vzorku [mm²].

Mez kluzu [40]:

Mez kluzu je napětí, při kterém se materiál začíná plasticky deformovat. Materiál může vykazovat výrazné odlišení horní meze kluzu R_{eH} , která představuje maximální napětí před prvním poklesem zatížení a dolní meze kluzu R_{eL} , což je nejnižší hodnota napětí během plastického kluzu. U pevnějších materiálů je tato oblast nevýrazná a používá se smluvní mez kluzu. Tato hodnota se určí ze závislosti zatížení na prodloužení. Například smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ se získá pomocí vnesení rovnoběžky s přímkovou částí závislosti ve vzdálenosti, která odpovídá deformaci 0,2 % z počáteční délky tyče (L_0), tak získáme zatížení, které odpovídá smluvní mezi kluzu. Podělením této hodnoty počáteční průřezovou plochou zkušební vzorku dostaneme smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (4.2)$$

kde: F_e - zatěžující síla na mezi kluzu v tahu [N].

Tažnost v procentech [40]:

Tažnost v procentech představuje trvalé prodloužení konečné měřené délky (L_U) po přetržení v procentech počáteční měřené délky (L_0). Pro stanovení konečné měřené délky se přetržené části musí přiložit k sobě a vzdálenost změřit.

$$A = \frac{L_U - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.3)$$

kde: L_U - konečná měřená délka po lomu [mm],
 L_0 - počáteční měřená délka [mm].

Kontrakce v procentech [40]:

Kontrakce v procentech je vyjádření největší změny průřezu po přetržení v procentech počátečního průřezu (S_0).

$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4.4)$$

kde: S_0 - počáteční průřezová plocha [mm²],
 S_U - minimální průřezová plocha po lomu [mm²].

Poměrné prodloužení [40]:

Poměrné prodloužení je přírůstek počáteční měřené délky v každém okamžiku během zkoušky vztažené na počáteční měřenou délku.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [-] \quad (4.5)$$

kde: ΔL - přírůstek počáteční délky v každém okamžiku zkoušky [mm].

4.2 Zkouška mikrotvrdosti

Zkouška mikrotvrdosti se provádí na příčných řezech svarových spojů. Provedení zkoušky předepisuje norma ČSN EN ISO 9015-2. Pro měření této tvrdosti se používají mikrotvrdoměry, které jsou schopny změřit tvrdost v jednotlivých částech svaru a TOO. Principem měření mikrotvrdosti je vlačování indentoru definovanou velikostí síly, která je v rozmezí 0,98 N až 49 N (HV 0,1 až HV 5), do měřeného materiálu. Nízká síla vytváří velmi malé vtisky, a proto je potřeba, aby byl povrch před měřením velmi dobře upraven. Měření se tedy provádí na rovném, leštěném a naleptaném povrchu. Vtisky jsou uspořádány buď v řadě nebo jednotlivě v definované vzdálenosti od povrchu. Zároveň musí být dostatečně daleko od sebe, aby se vzájemně neovlivňovaly. Touto zkušební metodou můžeme získat průběh hodnot tvrdostí přes všechny oblasti svarového spoje (základní materiál, svarový kov a TOO). U měření mikrotvrdosti podle Vickerse je indentor diamantové tělísko ve tvaru čtyřbokého jehlanu (pyramidy). Plocha otisku je následně měřena pomocí světelného mikroskopu. Vyhodnocovány jsou délky úhlopříček vpichu. Menší vpich znamená větší tvrdost materiálu. Výsledné hodnoty mikrotvrdosti nelze porovnávat s klasickou tvrdostí [15, 41].

4.3 Makroskopická a mikroskopická kontrola

Účelem těchto zkoušek je pozorování vzorků. Provedení je podle normy ČSN EN ISO 17639. U makroskopické kontroly je pozorování prováděno ve skutečné velikosti nebo při malém zvětšení (max. 30krát). Hodnotí se především tvar svaru a velikost TOO. Mikroskopická kontrola slouží k pozorování vzorku pod mikroskopem při velkém zvětšení, a to až 2000krát. Díky tomu můžeme pozorovat jednotlivá zrna a strukturní složky svaru a TOO. Tyto kontroly se provádí na připravených výbrusech, které jsou odebrány z oblastí, které je potřeba kontrolovat. Důležité je popsání vzorku, aby byla možná jeho identifikace. Nejčastěji je kontrolován příčný řez svaru, který zahrnuje všechny oblasti svarového spoje. Při odebírání vzorků je důležité, aby nedošlo ke změně struktury vlivem deformace nebo tepelným ovlivněním. Odebírání se nejčastěji provádí pomocí rozbrušovací pily s chlazením místa řezu. Pro pozorování makro výbrusu není vždy potřeba dalších úprav povrchu a vzorek je kontrolován přímo nebo po naleptání. Pro detailnější kontrolu nebo pro přípravu na mikro kontrolu se vzorky před leptáním brousí a leští. Pro lepší manipulaci a stabilitu při úpravě povrchu se výbrusy zalévají do dentacrylu nebo zalisují do pryskyřice. Broušení vzorků se provádí pomocí brusných papírů s různou zrnitostí a typem brusiva za sucha nebo pod vodou. Leštění se provádí na vhodné tkanině s použitím brusné suspenze. Podle druhu materiálu se používají různá leptadla, nejčastěji roztoky kyselin, do kterých se zkoumaná část vzorku na krátkou dobu ponoří nebo se vzorek leptadlem potírá. Díky rozdílné schopnosti rozpouštění dochází k zviditelnění jednotlivých struktur. Další možností je elektrolytické leptání, kde probíhá elektrochemická reakce, při které dochází k odebírání vrstev materiálu [15, 42].

5 EXPERIMENT

V experimentální části této práce bude porovnávána metoda MAG v režimu CMT Advanced s konvenční metodou MAG se zkratovým přenosem kovu. Svařovány budou dva materiály. Pevnostní ocel Weldox 700 E a ořezvzdorná ocel Hardox 450. V průmyslové praxi se tyto materiály nejčastěji svařují konvenční metodou MAG. Cílem této práce je zjistit možné využití metody CMT Advanced při svařování těchto materiálů. U svarových spojů budou hodnoceny jejich mechanické vlastnosti a jednotlivé metody spolu budou porovnány.

5.1 Weldox 700 E

Pro experiment byl použit materiál Weldox 700 E o tloušťce 4 mm. Tato ocel je univerzální konstrukční pevnostní ocel. Číselná hodnota 700 v názvu znamená velikost meze kluzu, tedy 700 MPa. Písmeno E v názvu vyjadřuje minimální nárazovou práci 69 J při teplotě -40 °C. Ocel je využívána například pro mostní konstrukce, jeřáby, části podvozků a konstrukce ropných plošin. V roce 2015 se u materiálu Weldox změnila obchodní značka na Strenx. Mechanické vlastnosti udávané výrobcem jsou uvedeny v tab. 7. Chemické složení materiálu je uvedeno v tab. 6. Tyto hodnoty jsou z materiálového certifikátu, který je uveden v příloze č. 1.

Tab. 6 Chemické složení Weldox 700 E.

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
0,150	0,290	1,280	0,011	0,001
Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	V [%]	Ti [%]
0,150	0,050	0,294	0,016	0,010
Cu [%]	Al [%]	Nb [%]	B [%]	N [%]
0,010	0,052	0,020	0,002	0,002

Tab. 7 Základní mechanické vlastnosti Weldox 700 E [43].

Tloušťka [mm]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_5 min. [%]	Tvrdość [HBW]
4 – 53	700	780 – 930	14	260 – 310
53 – 100	650	780 – 930	14	260 – 310
100 – 160	650	710 – 900	14	240 – 290

Výpočet uhlíkového ekvivalentu CET:

$$CET = 0,15 + \frac{(1,28 + 0,294)}{10} + \frac{(0,15 + 0,01)}{20} + \frac{0,05}{40} = 0,317 \% \quad (2.2)$$

5.2 Hardox 450

Druhým svařovaným materiálem v experimentální části byl Hardox 450 o tloušťce 6 mm. Tento materiál je ořezvzdorný plech s vysokou tvrdostí a pevností. Číselná hodnota v názvu udává tvrdost, tedy 450 HBW. Materiál je využíván na místech, kde dochází k velkému opotřebení například lžíce bagrů, korby nákladáků, na pracovní části drtičů materiálu a zemědělských strojů. Chemické složení materiálu je uvedeno v tab. 8. Hodnoty jsou z materiálového certifikátu, který je v příloze č. 2. Základní mechanické vlastnosti udávané výrobcem jsou v tab. 9.

Tab. 8 Chemické složení Hardox 450.

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
0,170	0,500	1,330	0,012	0,003
Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	B [%]	
0,030	0,030	0,001	0,001	

Tab. 9 Základní mechanické vlastnosti Hardox 450 [44].

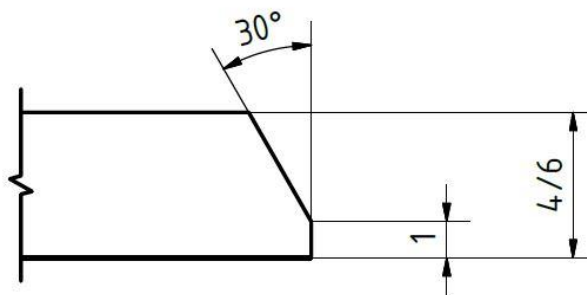
Tloušťka [mm]	Tvrdost [HBW]	Mez kluzu [MPa] (není garantovaná)	Nárazová práce při teplotě -40 °C [J]
3,2 – 80	425 – 475	1250	50
80 – 103	410 – 475	1250	50
103 – 130	390 – 475	1250	50

Výpočet uhlíkového ekvivalentu CET:

$$CET = 0,17 + \frac{(1,33 + 0,001)}{10} + \frac{(0,03 + 0)}{20} + \frac{0,03}{40} = 0,305 \% \quad (2.2)$$

5.3 Svaření vzorků

Vzorky pro svařování byly vyřezány z tabule pomocí laseru. Následovala příprava svarových ploch podle normy ČSN EN ISO 9692-1, kde na svařovaných částech byly vyfrézované úkosy podle obr. 19.



Obr. 19 Příprava svarového spoje.

Svařování probíhalo ve spolupráci s firmou Fronius v Praze, která poskytla možnost svařit vzorky. Pro obě metody bylo použito stejné zařízení, kde se pouze měnil režim svařování. Svařovací zdroj byl použit CMT Advanced 4000 R s podavačem drátu VR 7000 CMT a ovládáním RCU 5000i. Svařovací pohyb obstarával robot od firmy ABB IRB 1600x/1.45 vybavený svařovacím hořákem Robacta Drive CMT. Svařovací sestava je na obr. 20 a 21.



Obr. 20 Svařovací zdroj a podavač drátu.



Obr. 21 Svařovací robot.

Svařované vzorky byly před samotným svařováním ručně nabodovány s mezerou 1,5 mm. Parametry svařování byly odzkoušeny na menších vzorcích, kvůli úspoře materiálu. Nejlepšími svařovacími parametry, které jsou v tab. 10 pak byly svařeny zkoumané vzorky. Přídavný materiál byl použit drát G3Si1 (OK AristoRod 12.50) o průměru 1 mm. Tento drát je vhodný ke svařování většiny běžných nelegovaných konstrukčních ocelí. Je vhodný i pro svařování jemnozrnných ocelí. V praxi je, ale používán i pro svařování ocelí s vyšší pevností jako jsou Hardox a Weldox. Zvolen byl tedy přídavný materiál s nižší pevností než základní materiál. Důvodem bylo získání vyšší houževnatosti a nižší náchylnosti ke vzniku trhlin. Typické chemické složení drátu a typické mechanické vlastnosti svarového kovu jsou uvedeny v tab. 11. Při svařování byl použit ochranný plyn M21 se složením 8 % CO₂ v 92 % Ar.

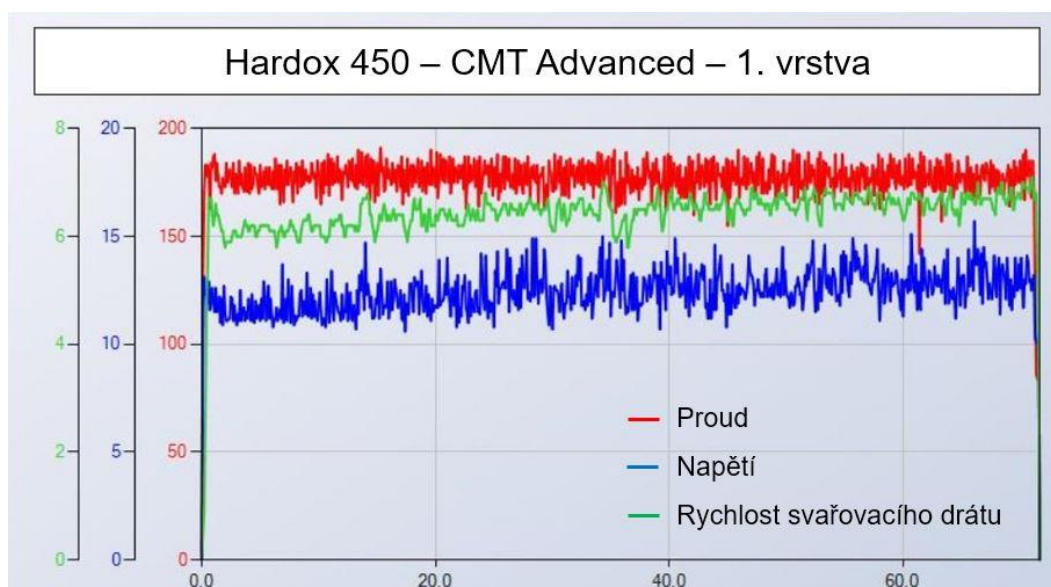
Tab. 10 Svařovací parametry.

Materiál – metoda	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm.min ⁻¹]	Poznámka
Hardox – Zkrat - 1.vrstva	170	17,6	610	
Hardox – Zkrat - 2.vrstva	222	21,9	1000	
Hardox – CMT Ad. -1.vrstva	190	15,4	610	
Hardox – CMT - 2. vrstva	185	13,4	320	rozkyv 4 mm
Weldox – Zkrat	159	17,2	610	
Weldox – CMT Ad.	184	15,4	610	

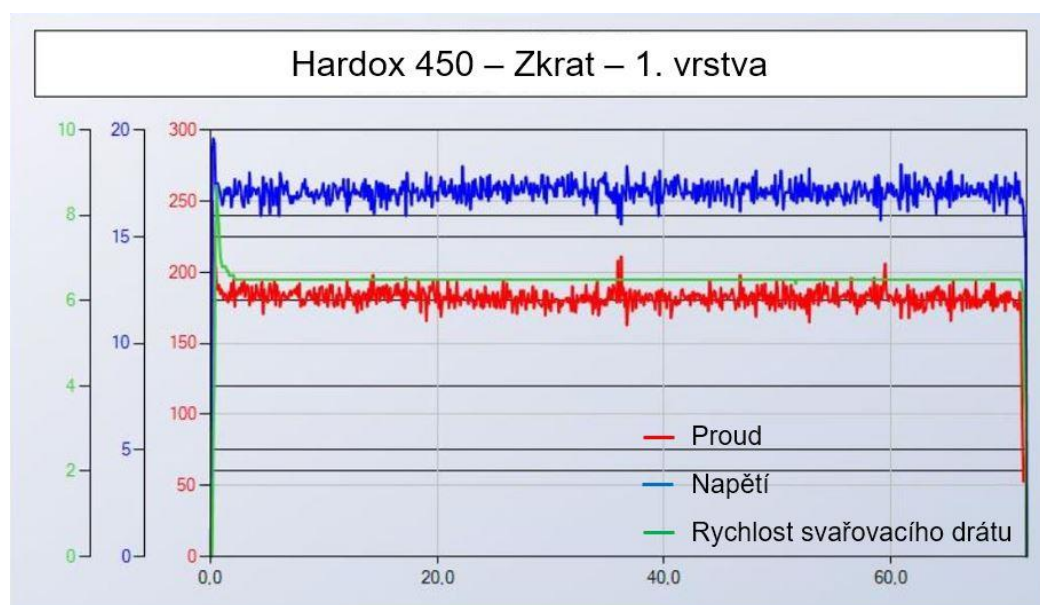
Tab. 11 Typické chemické složení a mechanické vlastnosti svarového kovu drátu G3Si1 [45].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]	Nárazová práce [J]/°C			
						20	-20	-30	-40
0,1	0,9	1,5	560	470	26	130	90	70	60

Svařování bylo bez přehřevu materiálu. Výrobce doporučuje materiál Weldox přehřívat od tloušťky 30 mm a materiál Hardox od tloušťky 20 mm. Materiál Weldox o tloušťce 4 mm byl svařen jednou vrstvou oběma metodami. Druhý materiál Hardox o tloušťce 6 mm byl zavařen na dvě vrstvy u obou metod, ale kvůli nutnosti vyššího výkonu nebyl na druhou vrstvu použit režim CMT Advanced, který nedokáže pracovat při tak vysokých svařovacích parametrech. Byl tedy použit režim čistého CMT s rozkyvem svařovacího pohybu 4 mm. Příklady průběhu svařování pro režim CMT Advanced a zkratový režim jsou na obr. 22 a 23.



Obr. 22 Průběh svařování v režimu CMT Advanced pro 1. vrstvu u materiálu Hardox 450.



Obr. 23 Průběh svařování v režimu Zkrat pro 1. vrstvu u materiálu Hardox 450.

5.4 Výpočet vneseného tepla

Na vlastnosti svaru má velký vliv dodané teplo během procesu svařování, které ovlivňuje mechanické vlastnosti a velikost TOO. To popisuje vnesené teplo, které bylo vypočítáno ze svařovacích parametrů tab. 10, pomocí vztahu 2.1. Výsledky jsou uvedeny v tab. 13. Vzorový výpočet bude proveden pro materiál Weldox a zkratový režim svařování. Parametry pro vzorový výpočet jsou uvedeny v tab. 12.

Tab. 12 Svařovací parametry pro materiál Weldox při zkratovém režimu svařování.

Materiál – metoda	Proud [A]	Napětí [V]	Svařovací rychlost [mm.min ⁻¹]	Koeficient tepelné účinnosti k [-]
Weldox – Zkrat	159	17,2	610	0,8

$$Q = \frac{0,8 \times 17,2 \times 159 \times 60}{610 \times 1000} = 0,2152 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (2.1)$$

Tab. 13 Vypočítané vnesené teplo.

Materiál – metoda	Vnesené teplo [kJ.mm ⁻¹]
Hardox – Zkrat - 1.vrstva	0,2354
Hardox – Zkrat - 2.vrstva	0,2334
Hardox – CMT Ad. - 1.vrstva	0,2302
Hardox – CMT - 2. vrstva	0,3719
Weldox – Zkrat	0,2152
Weldox – CMT Ad.	0,2230

5.5 Příprava vzorků

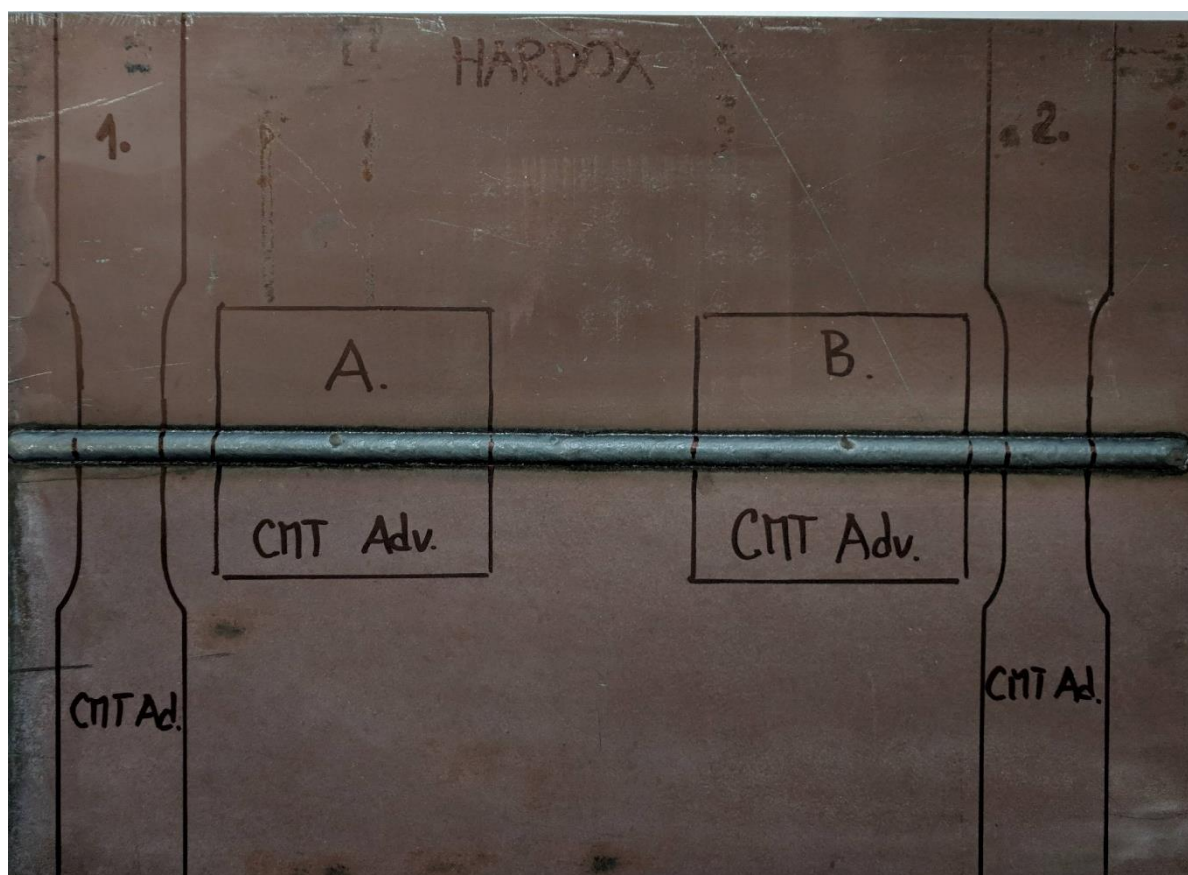
Svařené vzorky byly rozřezány pomocí laseru na vzorky pro příčnou zkoušku tahem tab. 14, na výbrusy pro zkoušku mikrotvrdomosti, makroskopickou a mikroskopickou kontrolu tab. 15. Ukázka míst odběru vzorku je na obr. 24. Ostatní fotografie svařených vzorků i ze strany kořenu jsou v příloze č. 3 až 6.

Tab. 14 Vzorky pro příčnou zkoušku tahem.

Vzorek	Materiál – metoda	Poloha
1.	Hardox – CMT Advanced (+CMT)	začátek svaru
2.	Hardox – CMT Advanced (+CMT)	konec svaru
3.	Hardox – Zkrat	začátek svaru
4.	Hardox – Zkrat	konec svaru
5.	Weldox – CMT Advanced	začátek svaru
6.	Weldox – CMT Advanced	konec svaru
7.	Weldox – Zkrat	začátek svaru
8.	Weldox – Zkrat	konec svaru

Tab. 15 Vzorky pro výbrusy.

Vzorek	Materiál – metoda	Poloha
A	Hardox – CMT Advanced (+CMT)	začátek svaru
B	Hardox – CMT Advanced (+CMT)	konec svaru
C	Hardox – Zkrat	začátek svaru
D	Hardox – Zkrat	konec svaru
E	Weldox – CMT Advanced	začátek svaru
F	Weldox – CMT Advanced	konec svaru
G	Weldox – Zkrat	začátek svaru
H	Weldox – Zkrat	konec svaru



Obr. 24 Ukázka míst odběru vzorků z materiálu Hardox.

Z částí pro výbrusy byly vyřezány pomocí rozbrušovací pily Struers Labotom – 3 menší vzorky kolmo k ose svaru, které zahrnovaly svarový kov, TOO a základní materiál. Pro snadnější manipulaci a lepší stabilitu při broušení a leštění byly vzorky zalisovány do pryskyřice při teplotě okolo 200 °C na automatickém lisu Ecopress 100 od firmy Metkon, obr. 26. Dalším krokem bylo broušení a leštění, které probíhalo na zařízení Struers Labopol – 5, obr. 25. Broušení bylo postupně provedeno na brusných papírech pod vodou se zrnitostí 80, 600 a 1200. Na leštění byly použity leštící plátina s diamantovou suspenzí s velikostí diamantového zrna 9 a 3 μm . Závěrečné leštění bylo pomocí leštící pasty s částicemi korundu o velikosti 1 μm .

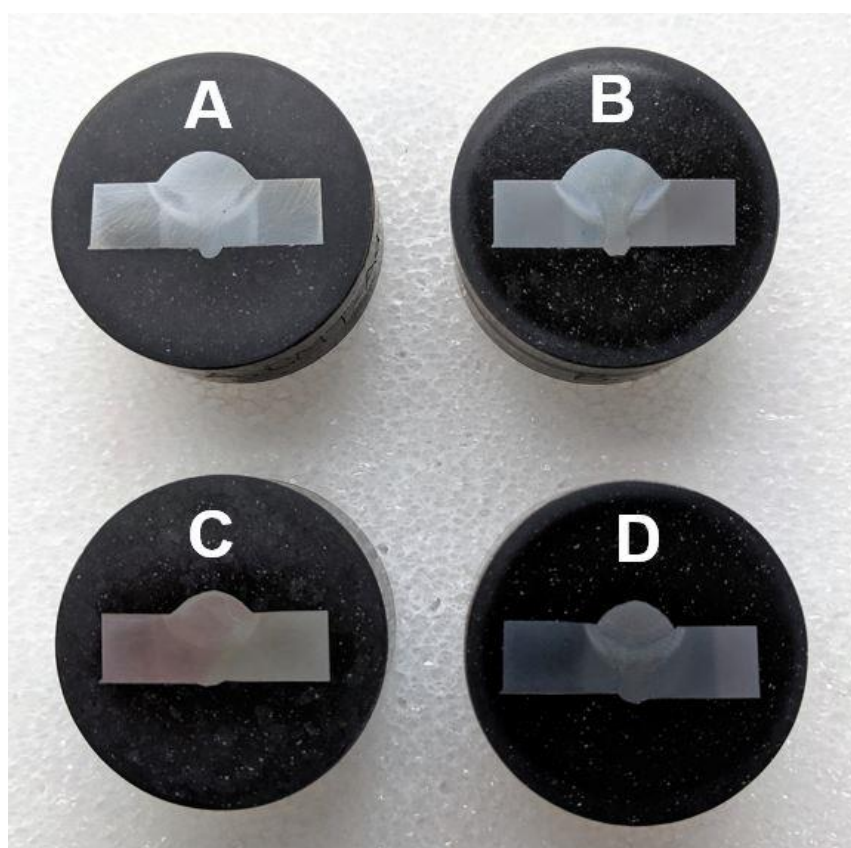


Obr. 25 Broušící a lešticí zařízení Struers Labopol 5.

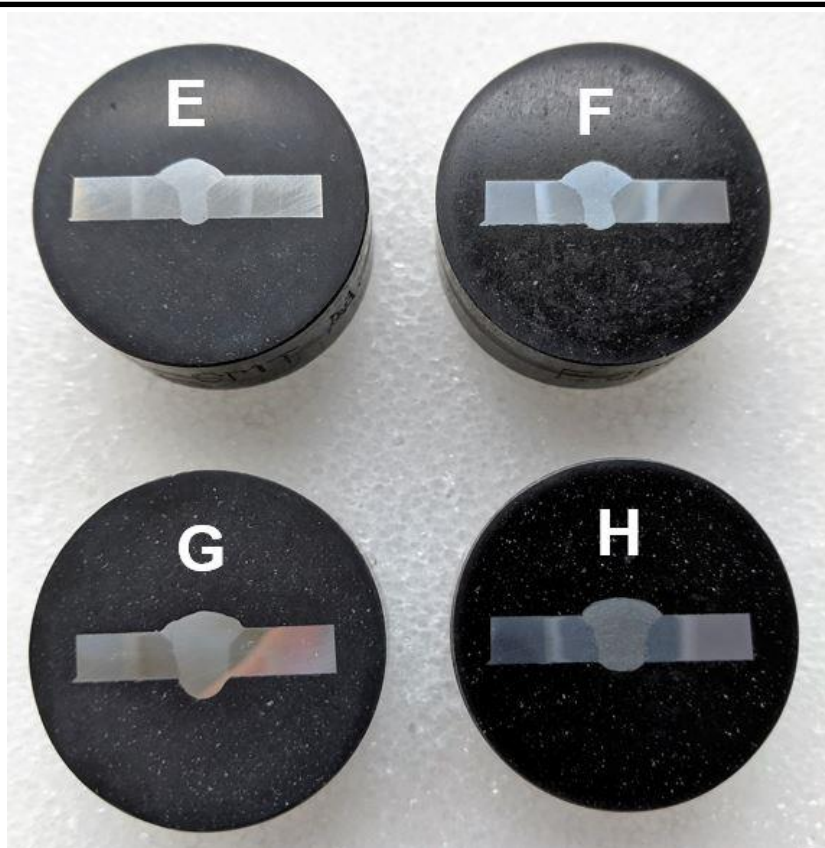


Obr. 26 Automatický lis Ecompress 100.

Aby bylo možné pozorovat strukturu a velikost TOO byly vzorky naleptány. Leptadlem byl 3 % Nital, což je kyselina dusičná na alkoholové bázi, která se používá na leptání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Vzorky byly leptány ponořením po dobu 5 sekund. Následným opláchnutím lihem byly neutralizovány zbytky leptadla. Připravené výbrusy jsou na obr. 27 a 28.

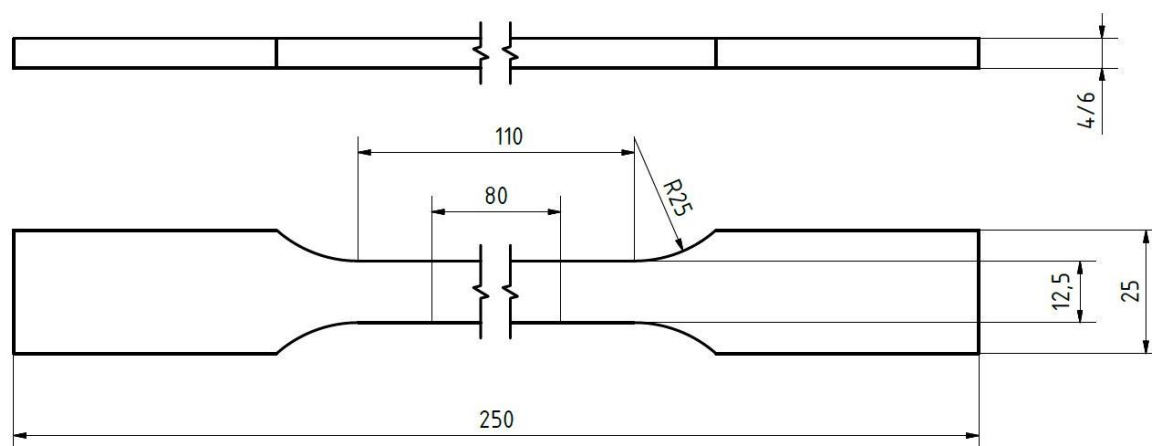


Obr. 27 Připravené výbrusy z materiálu Hardox.



Obr. 28 Připravené výbrusy z materiálu Weldox.

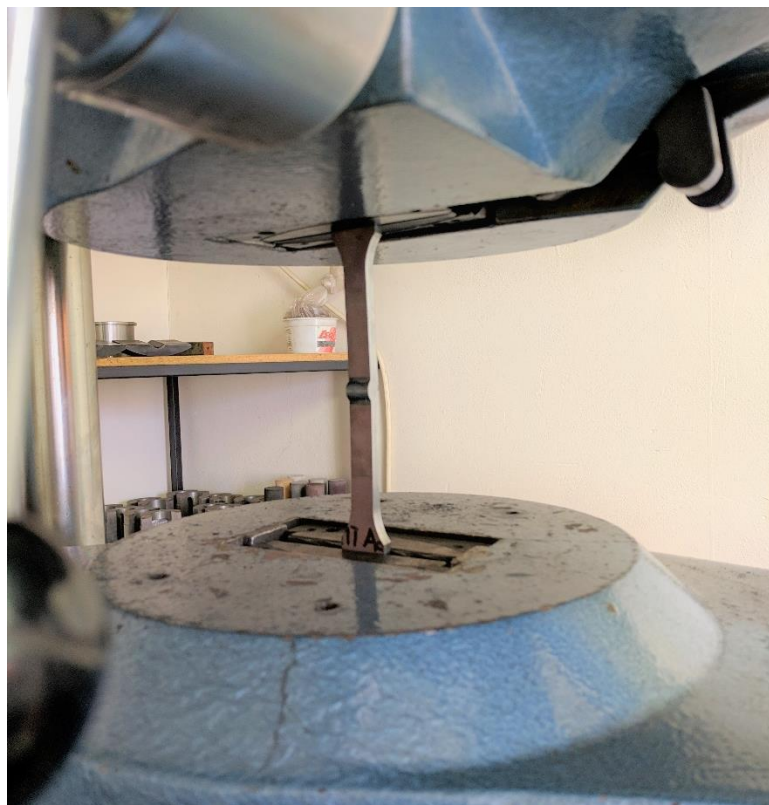
Pro příčnou zkoušku tahem byly použity nenormalizované vzorky, kvůli maximální síle zkušecího stroje. Rozměry byly upraveny tak, aby bylo zařízení schopno vzorek přetřhnout. Zvolené rozměry jsou na obr. 29. Vzorky byly nejprve vypálené laserem s přídavkem 1,5 mm. Přídavek byl následně odfrézován, aby byla odstraněna tepelně ovlivněná část po laserovém paprsku.



Obr. 29 Zvolené rozměry vzorku pro příčnou zkoušku tahem.

5.6 Příčná zkouška tahem

Příčná zkouška tahem byla provedena na hydraulickém zkušebním stroji ZD 40 s maximální zkušební silou 400 kN. Tento stroj je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem, který dokáže snímat polohu s rozlišením 0,01 mm. Data získané během zkoušky jsou přenášeny do počítače s programem M-TEST. Technické parametry a podrobnější popis stroje je uveden v příloze č. 7. Ukázka upnutí vzorku je na obr. 30.



Obr. 30 Ukázka upnutí vzorku do zkušebního zařízení.

5.6.1 Příčná zkouška tahem pro materiál Hardox 450

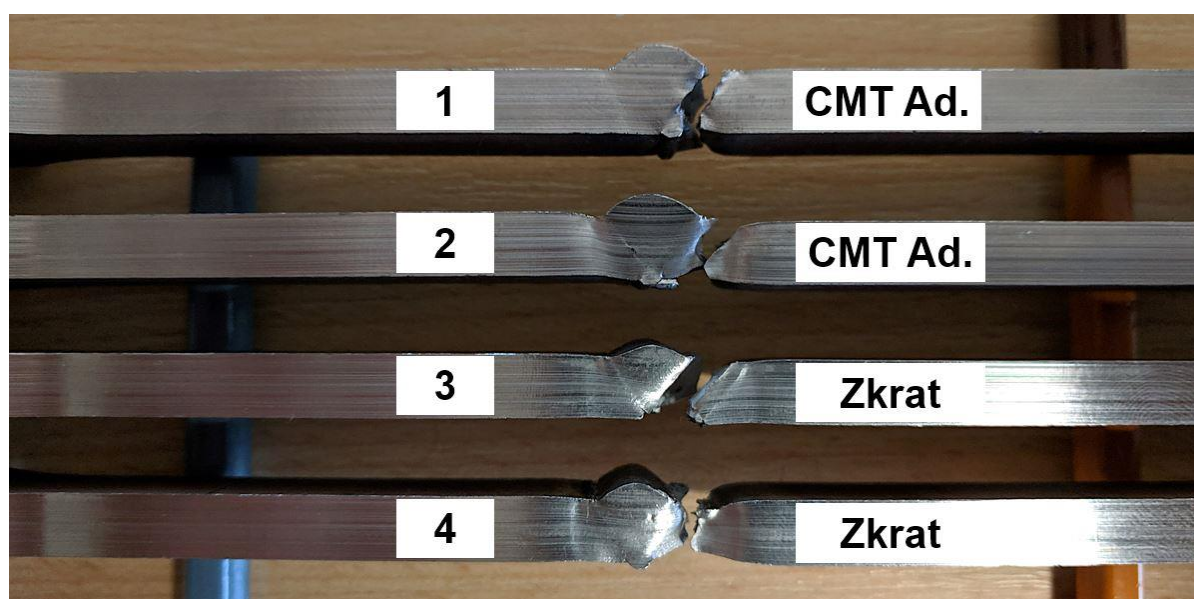
U materiálu Hardox došlo k lomu u obou metod buď v TOO nebo přímo ve svaru. Přetržené vzorky jsou na obr. 31. Boční pohled na lomy vzorků z boční části je na obr. 32. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tab. 16.

Tab. 16 Výsledky příčné zkoušky tahem pro materiál Hardox.

Vzorek	Plocha průřezu S_0 [mm ²]	Zatěžující síla F_m [N]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]
1	75	55 504,00	740,05	734,66
2	75	59 539,20	793,86	758,74
3	75	53 952,00	719,36	692,77
4	75	55 579,20	741,06	718,61



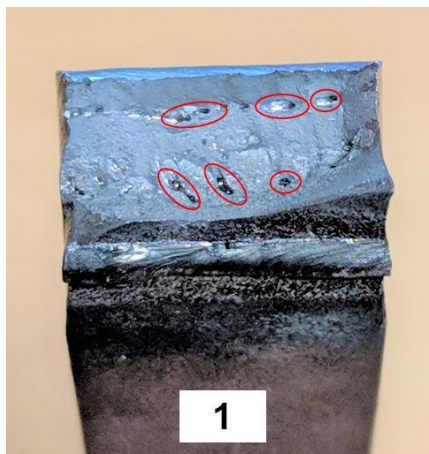
Obr. 31 Přetržené vzorky z materiálu Hardox.



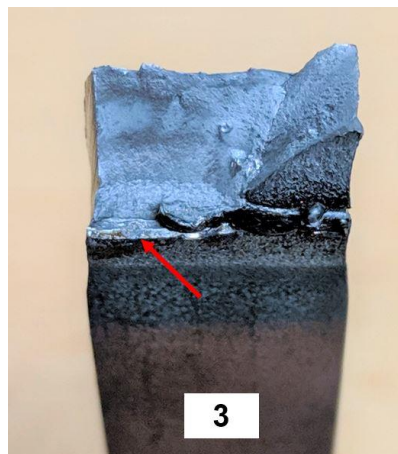
Obr. 32 Boční pohled na lomy vzorků.

Jak je vidět vzorek 1 prasknul na hranici svarového kovu s TOO. Příčina tohoto lomu a jeho polohy je výskyt pórů v této oblasti, jak je ukázáno na obr. 33. U vzorku 3 se lom vyskytuje částečně ve středu svarového kovu. Tento lom byl způsoben neprovařenou částí kořene svaru obr. 34. Vzorky 2 a 4 prasknuly v TOO obr. 35 a 36. Kde je lomová plocha tvořena křehkou a tvárnou částí.

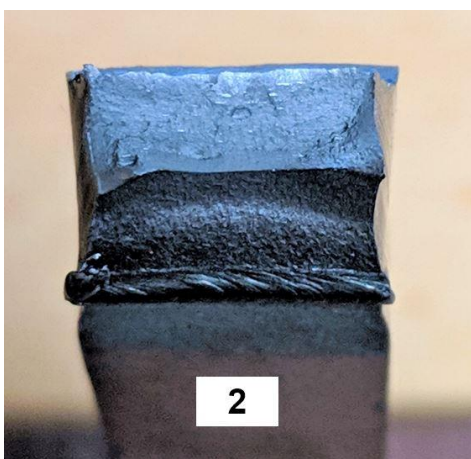
Z hodnot získaných ze zkušebního zařízení byl vytvořen pracovní tahový diagram obr. 37 a smluvní tahový diagram obr. 38, pro který bylo potřeba vypočítat poměrné prodloužení podle vztahu 4.5.



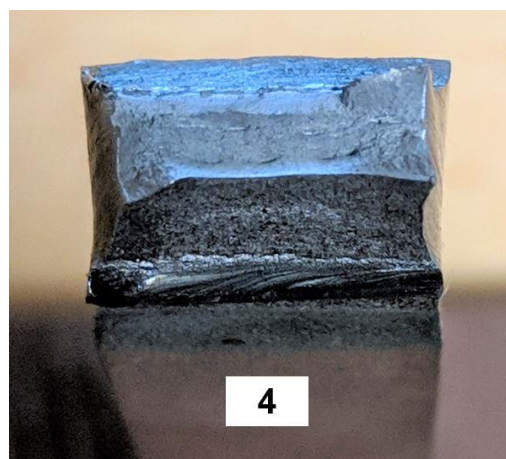
Obr. 33 Lom vzorku 1 s výskytem pórů.



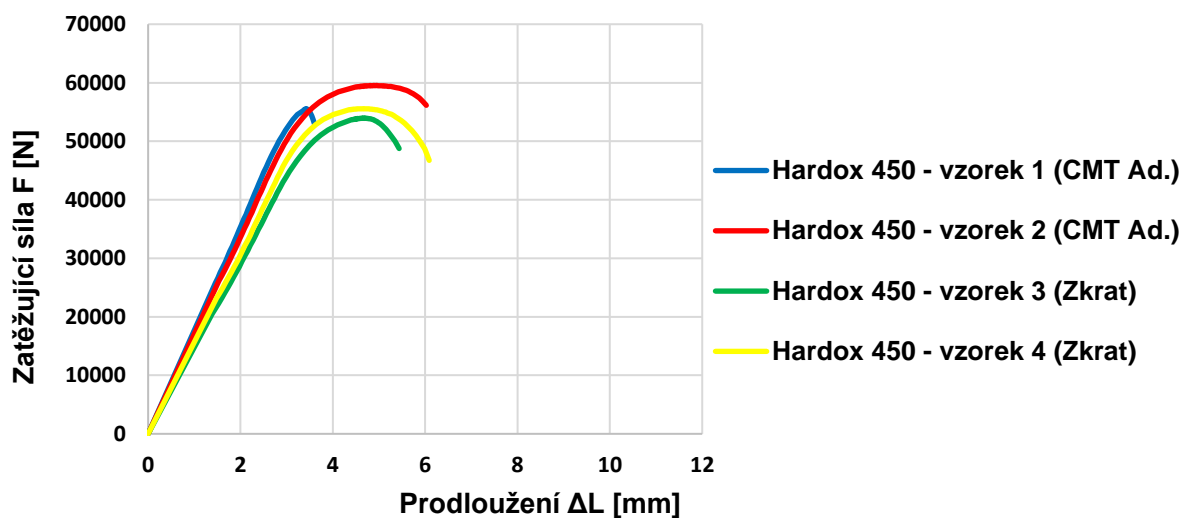
Obr. 34 Lom vzorku 2 s neprovařenou částí kořene svaru.



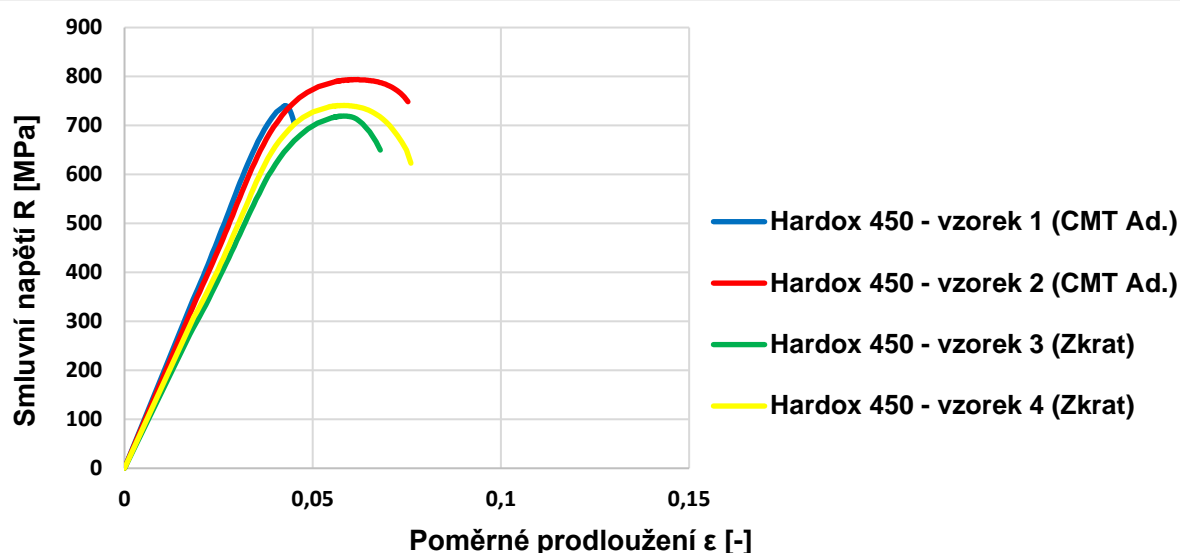
Obr. 35 Lom vzorku 2.



Obr. 36 Lom vzorku 4.



Obr. 37 Pracovní tahový diagram pro materiál Hardox.



Obr. 38 Smluvní tahový diagram pro materiál Hardox.

5.6.2 Příčná zkouška tahem pro materiál Weldox 700 E

U materiálu Weldox došlo u všech vzorků k lomu mimo svar. Znamená to, že bylo docíleno kvalitního svaru. Výsledky z příčné zkoušky tahem odpovídají základnímu materiálu a jsou uvedeny v tab. 17. Přetržené vzorky jsou na obr. 39.

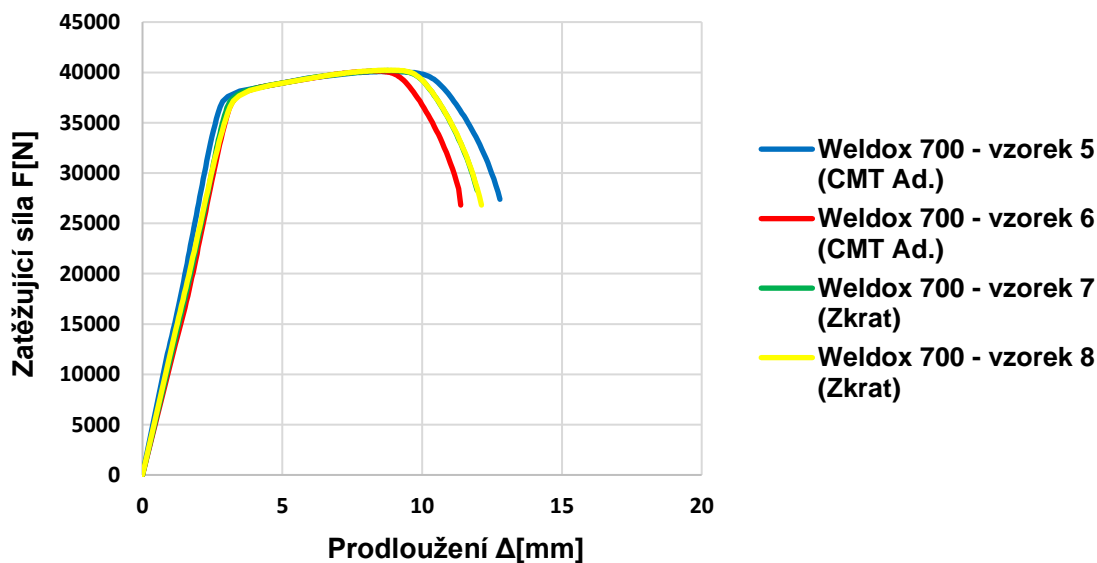
Tab. 17 Výsledky příčné zkoušky tahem pro materiál Weldox.

Vzorek	Plocha průřezu S_0 [mm ²]	Zatěžující síla F_m [N]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]
5	50	40 086,80	801,74	755,65
6	50	40 134,80	802,70	758,68
7	50	40 200,80	804,02	757,93
8	50	40 228,80	804,58	756,04

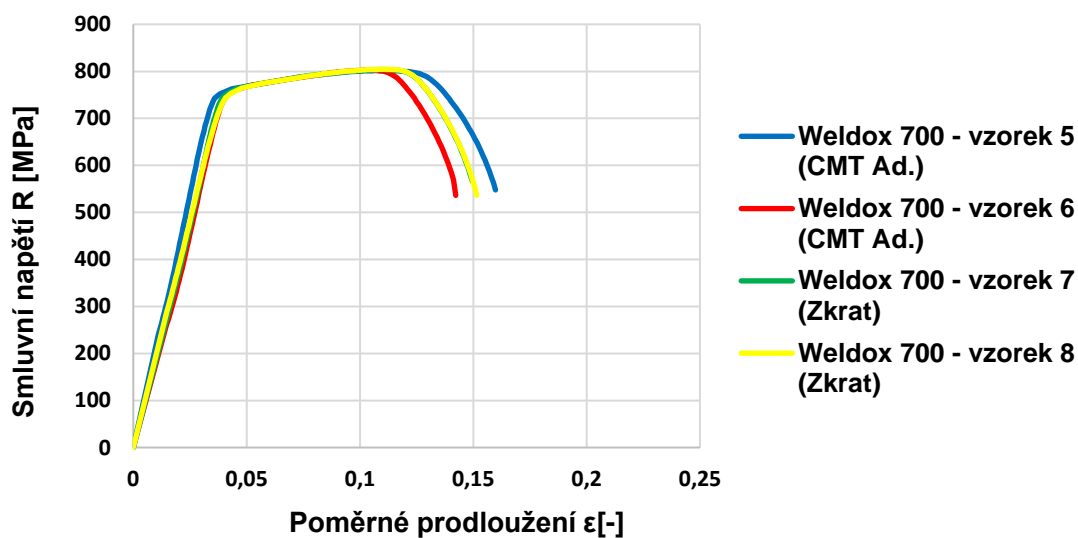


Obr. 39 Přetržené vzorky z materiálu Weldox.

Z hodnot, které byly získané ze zkušebního zařízení byl vytvořen pracovní tahový diagram obr. 40 a smluvní tahový diagram obr. 41. Poměrné prodloužení ve smluvním tahovém diagramu bylo počítáno podle vztahu 4.5. Křivky pro vzorek 7 a 8 jsou v diagramech totožné a překrývají se.



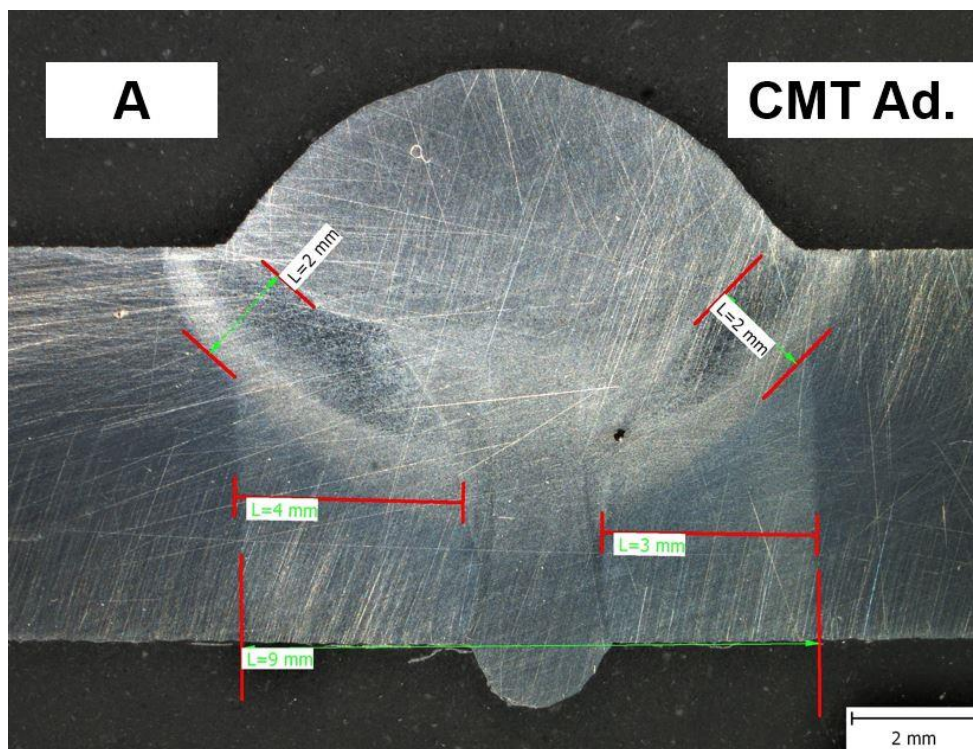
Obr. 40 Pracovní tahový diagram pro materiál Weldox.



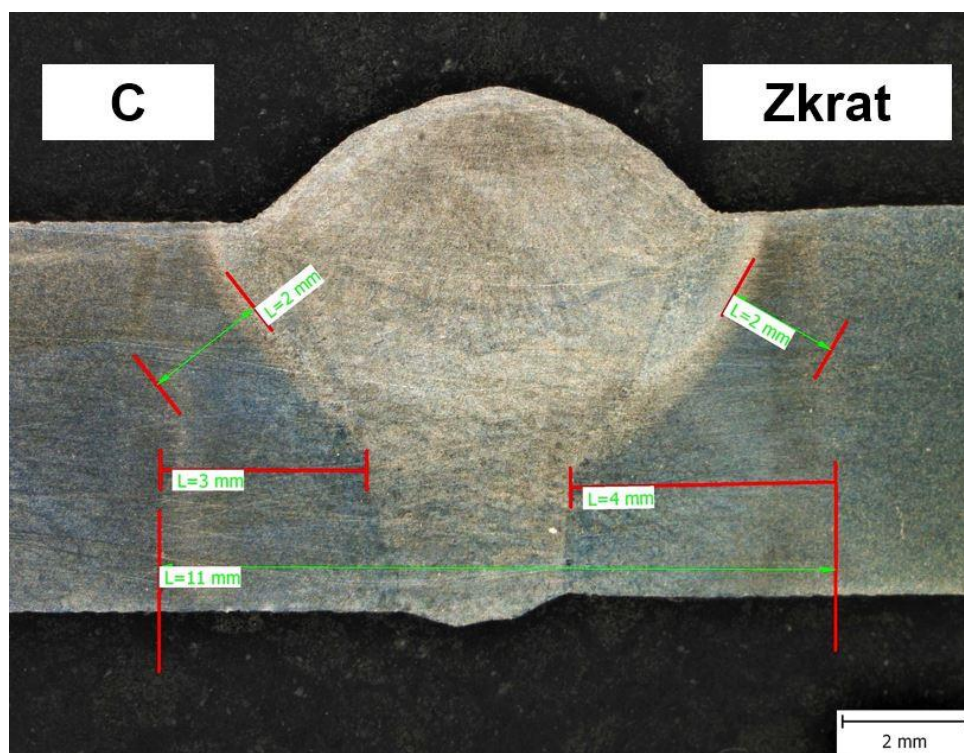
Obr. 41 Smluvní tahový diagram pro materiál Weldox.

5.7 Makroskopická kontrola

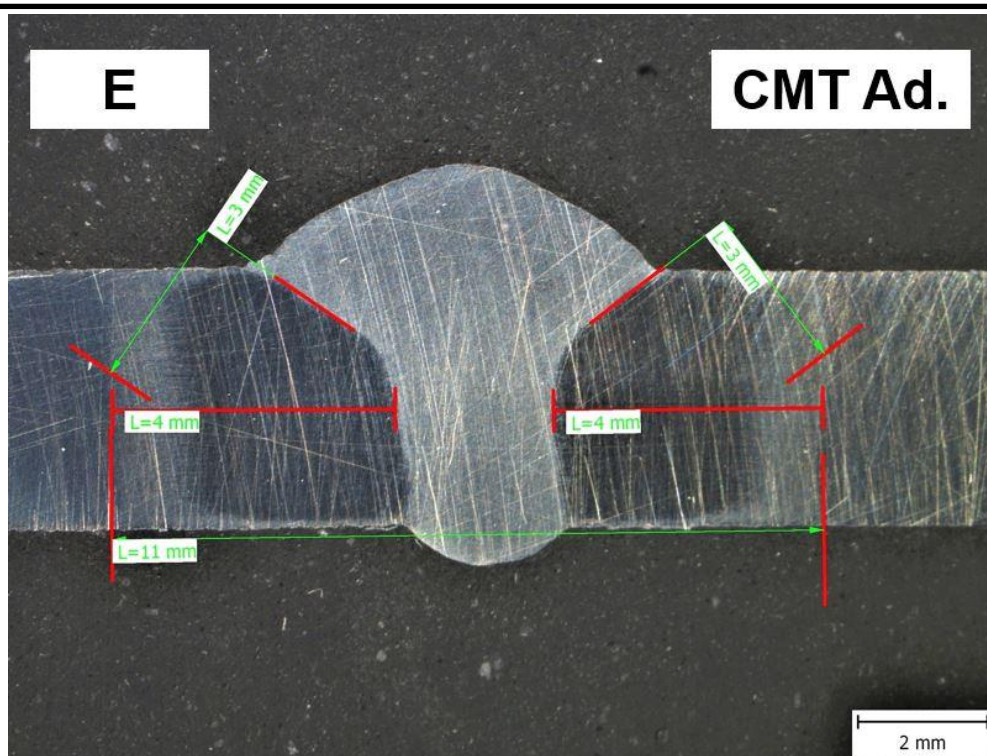
Připravené výbrusy byly pomocí stereomikroskopu Olympus SZ61 nafoceny. Zvětšení při pořízení snímků bylo 13,4. Na snímcích byly pomocí počítače měřeny rozměry TOO. Snímky na začátku a konci svaru jsou víceméně totožné, proto jsou v práci pouze začátky svaru, obr. 42 až 45. Konce svaru jsou uvedeny v příloze č. 8 a 9. Rozměry TOO pro všechny vzorky jsou uvedeny v tab. 18.



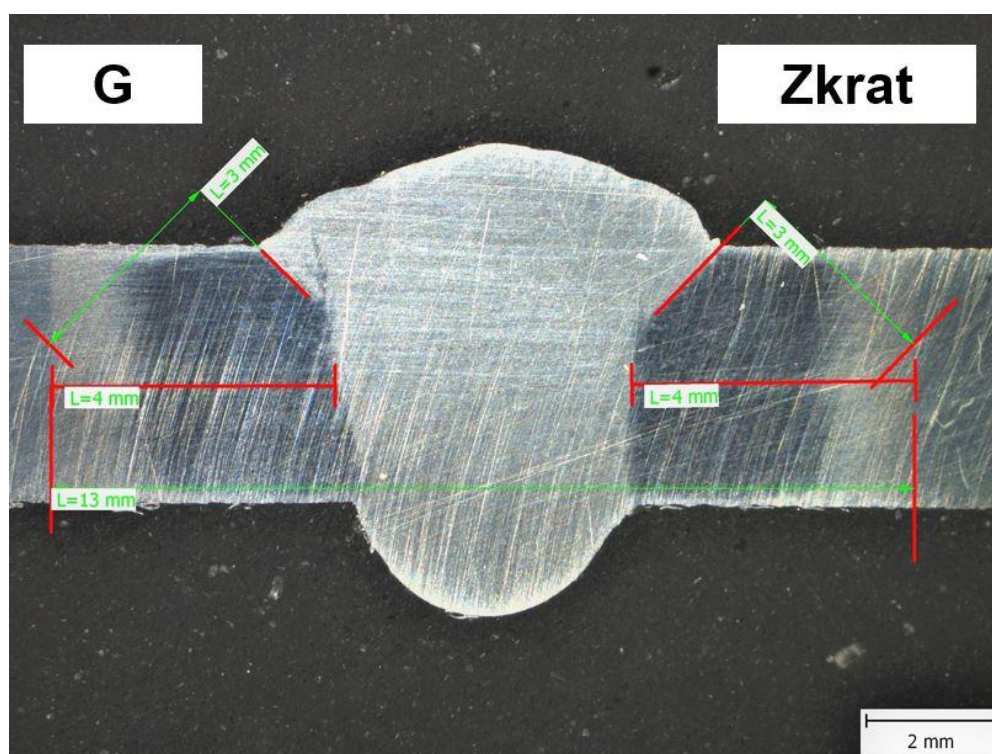
Obr. 42 Makroskopický snímek materiálu Hardox – CMT Ad.



Obr. 43 Makroskopický snímek materiálu Hardox – Zkrat.

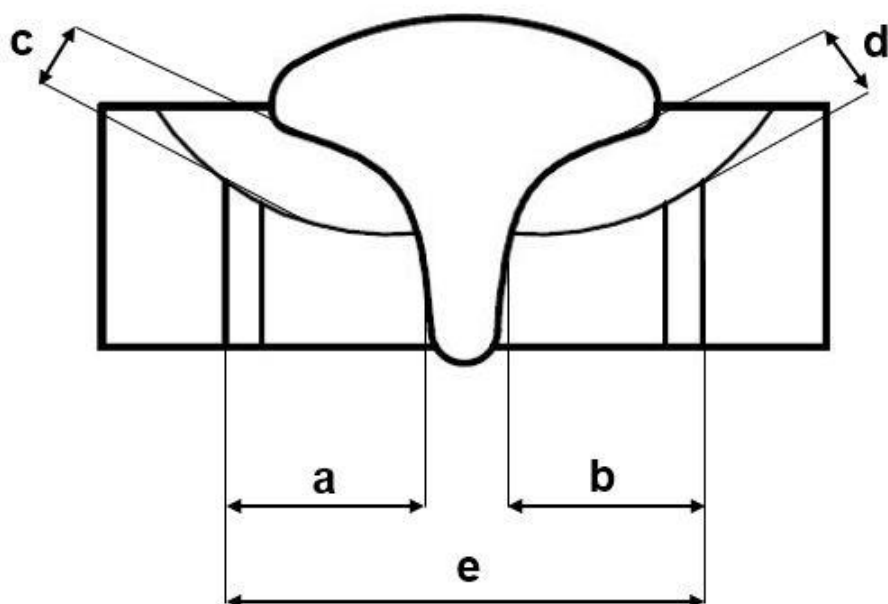


Obr. 44 Makroskopický snímek materiálu Weldox – CMT Ad.



Obr. 45 Makroskopický snímek materiálu Weldox – Zkrat.

Na obr. 46 je zobrazeno schéma svaru, kde jsou naznačeny rozměry, které jsou uvedeny v tab. 18.



Obr. 46 Rozměry TOO.

Tab. 18 Rozměry TOO.

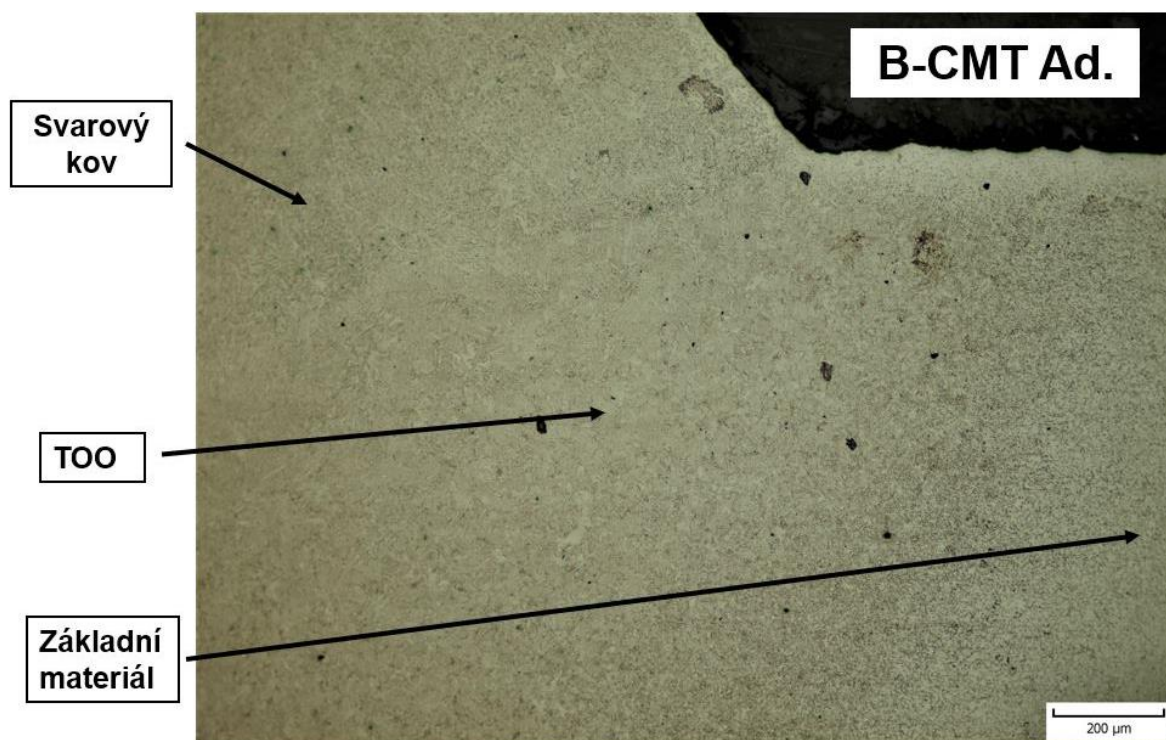
Vzorek	a [mm]	b [mm]	c [mm]	d [mm]	e [mm]
A	4	3	2	2	9
B	4	4	2	2	9
C	3	4	2	2	11
D	4	3	3	2	10
E	4	4	3	3	11
F	4	4	2	3	11
G	4	4	3	3	13
H	4	5	3	3	13

Mezi metodami, jak je vidět na snímcích a v tab. 18, není ve velikosti TOO značný rozdíl. Znamená to tedy, že obě metody vnesly do svaru podobné množství tepla. Na snímcích je dále vidět, že pro svary metodou v režimu zkratu jsou svary mnohem širší což může způsobovat svařovací napětí, které je u této metody vyšší.

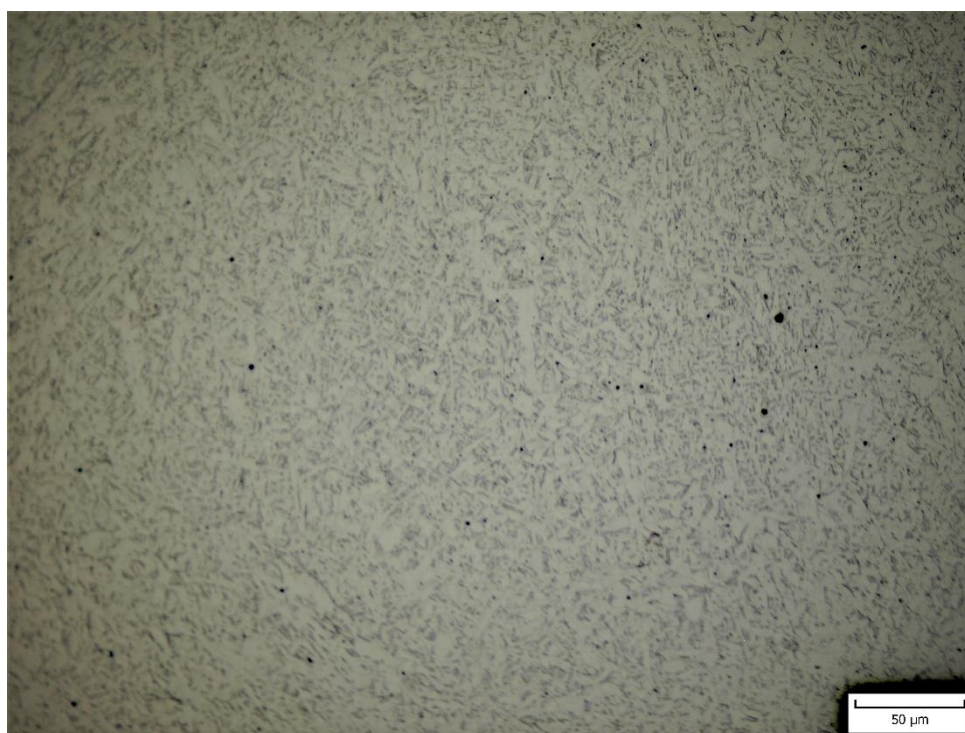
5.8 Mikroskopická kontrola

Na vyleštěných a naleptaných výbrusech byla provedena makroskopická kontrola. Ta byla provedena pouze na jednom výbrusu pro každý svařený vzorek. Vybrány pro tuto kontroly byly konce svaru. Snímky mikrostruktury byly pořízeny pomocí metalografického mikroskopu MTM 406 s maximálním zvětšením 400 a počítačového programu Quickfoto industrial 2.2.

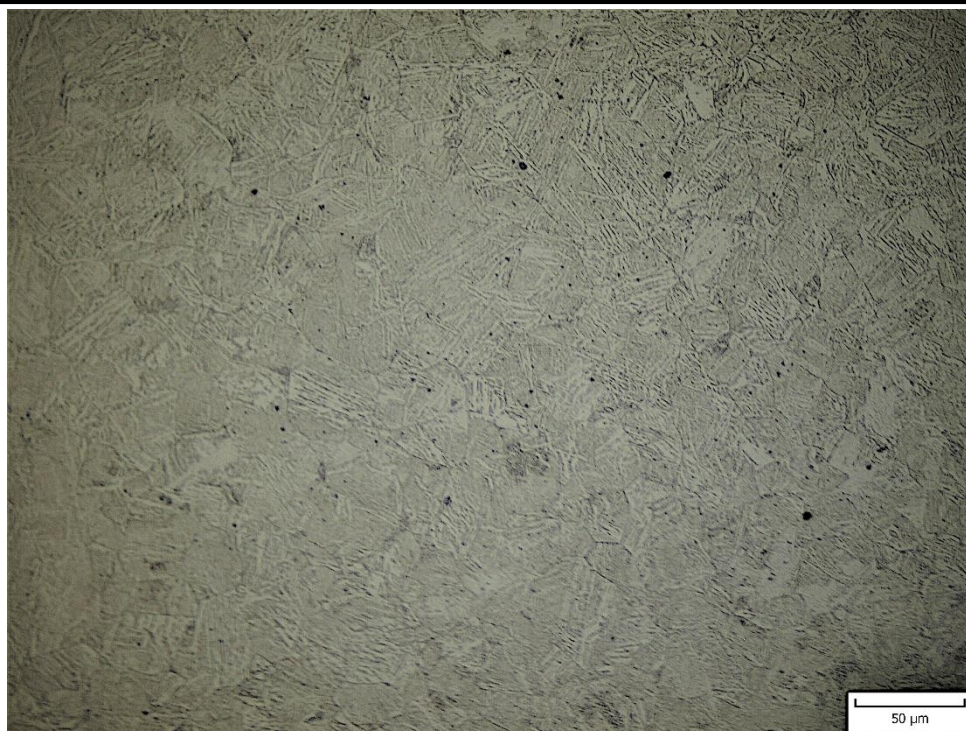
Mikroskopické snímky materiálu Hardox svařené metodou CMT Ad. (2. vrstva CMT):



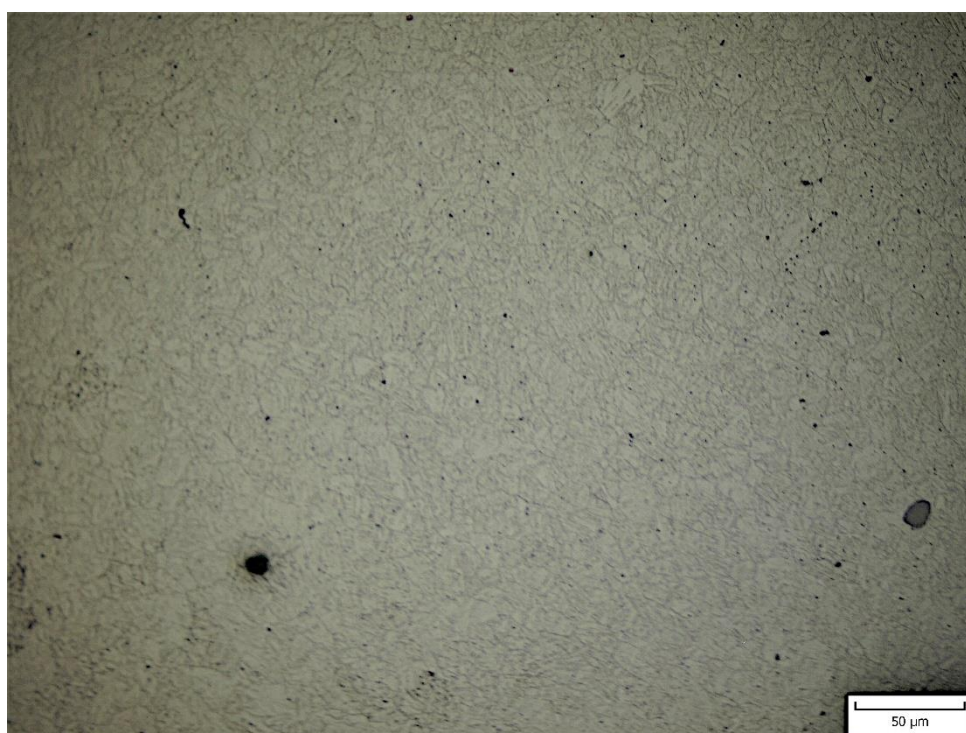
Obr. 47 Mikrostruktura vzorku B, zvětšení 100x.



Obr. 48 Mikrostruktura svarového kovu vzorku B, zvětšení 400x.



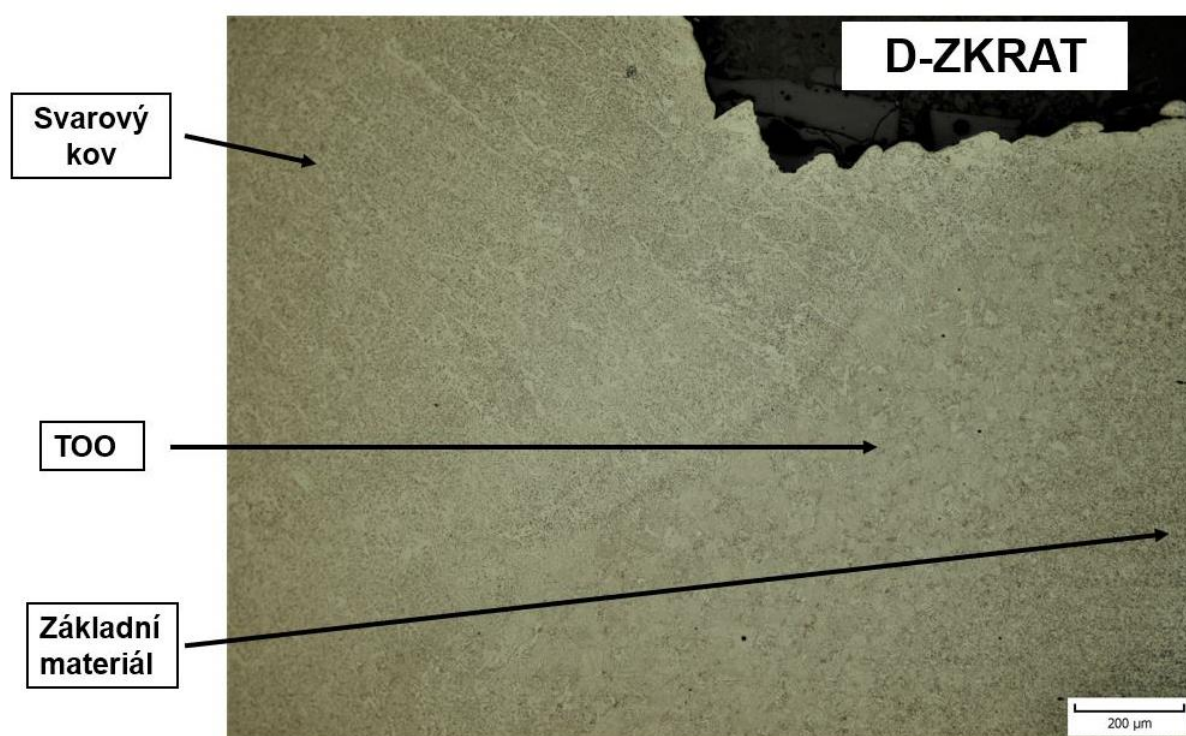
Obr. 49 Mikrostruktura TOO vzorku B, zvětšení 400x.



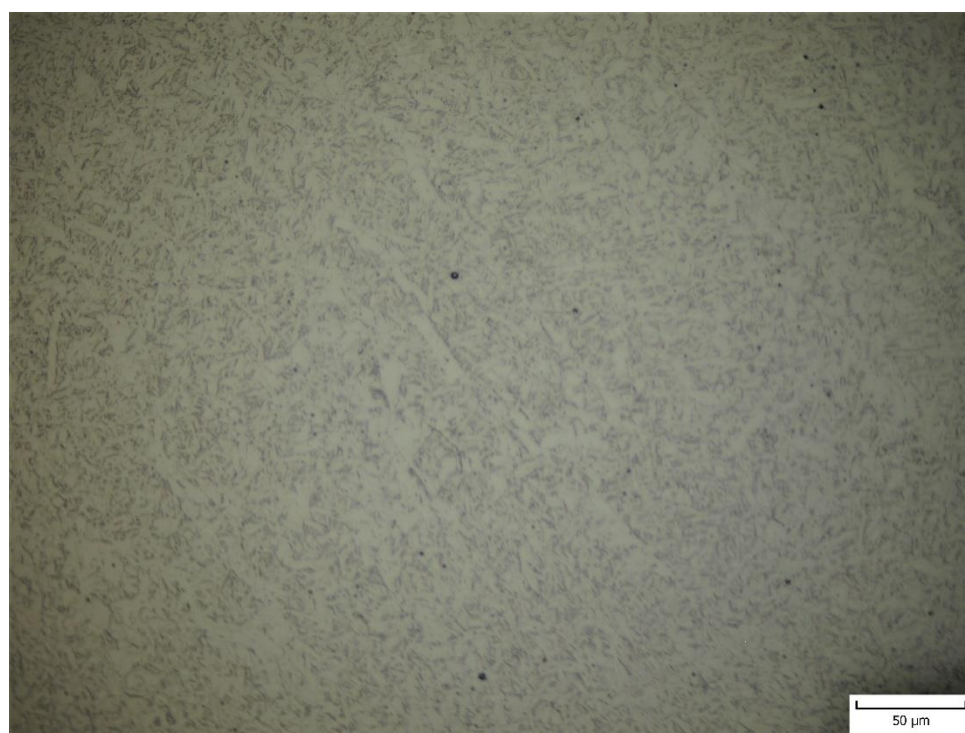
Obr. 50 Mikrostruktura základního materiálu vzorku B, zvětšení 400x.

Na obr. 47 je snímek pravé části svaru vzorku B, kde je vyznačen svarový kov, TOO a základní materiál. Na obr. 48 je snímek svarového kovu s větším zvětšením. Struktura odpovídá acikulárnímu feritu. Na obr. 49 je struktura TOO, která odpovídá Widmanstättenově struktuře. Obr. 50 je snímek základního materiálu se strukturou dolního bainitu.

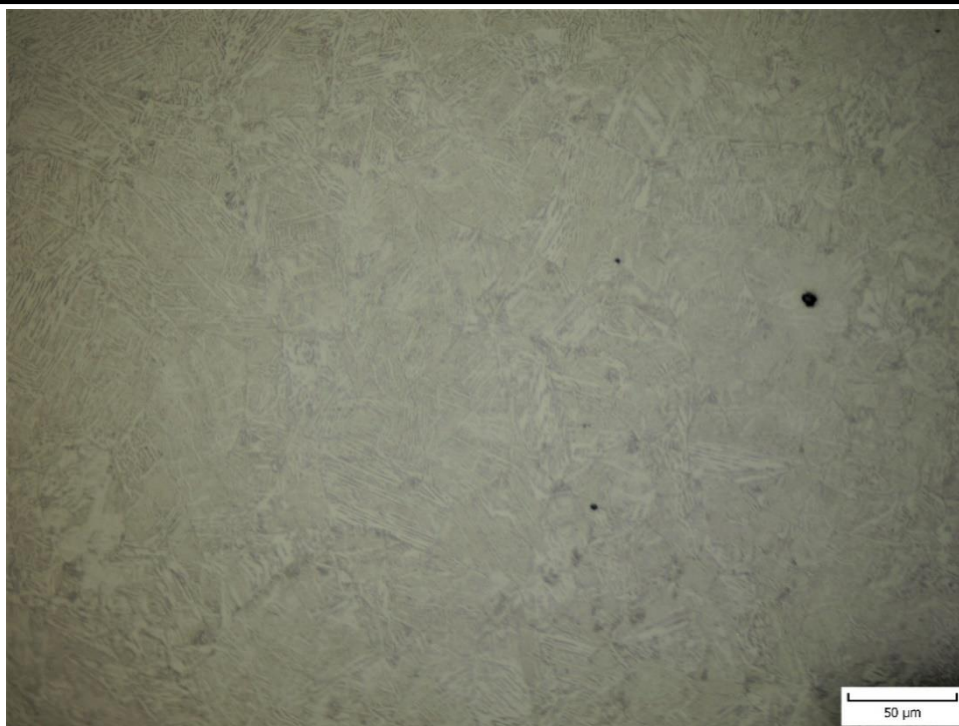
Mikroskopické snímky materiálu Hardox svažené v režimu zkrat:



Obr. 51 Mikrostruktura vzorku D, zvětšení 100x.



Obr. 52 Mikrostruktura svarového kovu vzorku D, zvětšení 400x.



Obr. 53 Mikrostruktura TOO vzorku D, zvětšení 400.



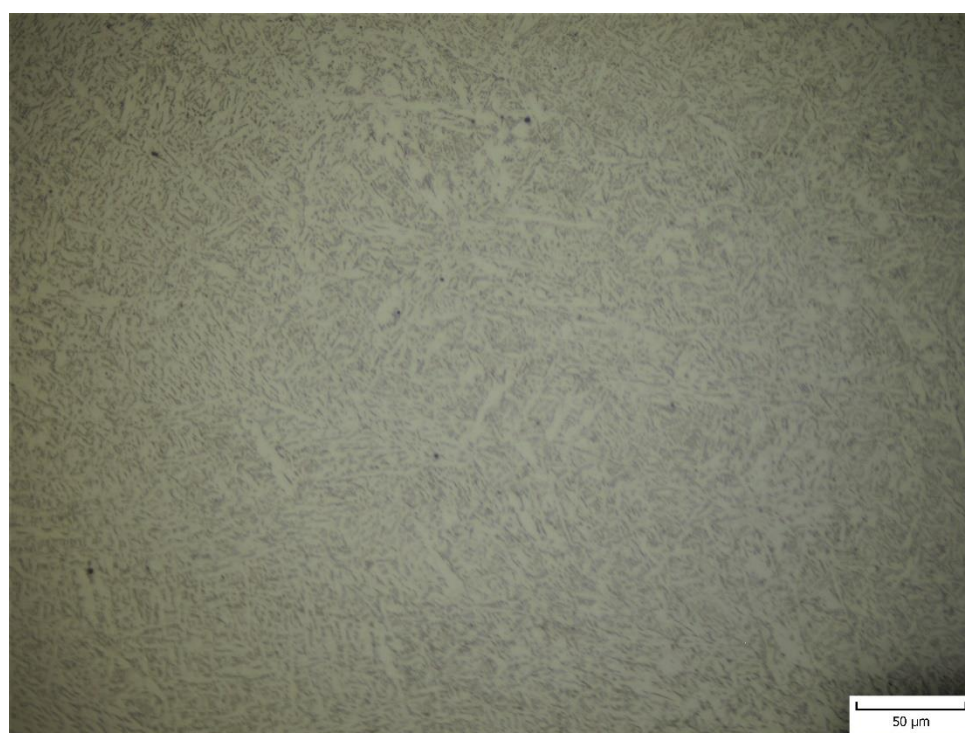
Obr. 54 Mikrostruktura základního materiálu vzorku D, zvětšení 400x.

U metody zkrat vznikla velice podobná mikrostruktura. Na obr. 51 je vidět pravá část svaru vzorku D, kde jsou vyznačeny oblasti svarového kovu obr. 52, TOO obr. 53 a základní materiál obr. 54. Svarový kov má stejnou strukturu tedy acikulární ferit, který vzniká především u svarových spojů nízkolegovaných ocelí. Struktura TOO je Widmanstättův ferit, který vzniká při vyšších rychlostech ochlazování. Ve svarech je to nežádoucí struktura, protože kvůli hrubým zrnům se zvyšuje křehkost. Základní materiál je tvořen strukturou dolního bainitu, který má vyšší tvrdost a dobrou houževnatost.

Mikroskopické snímky materiálu Weldox svařeného metodou CMT Advanced:



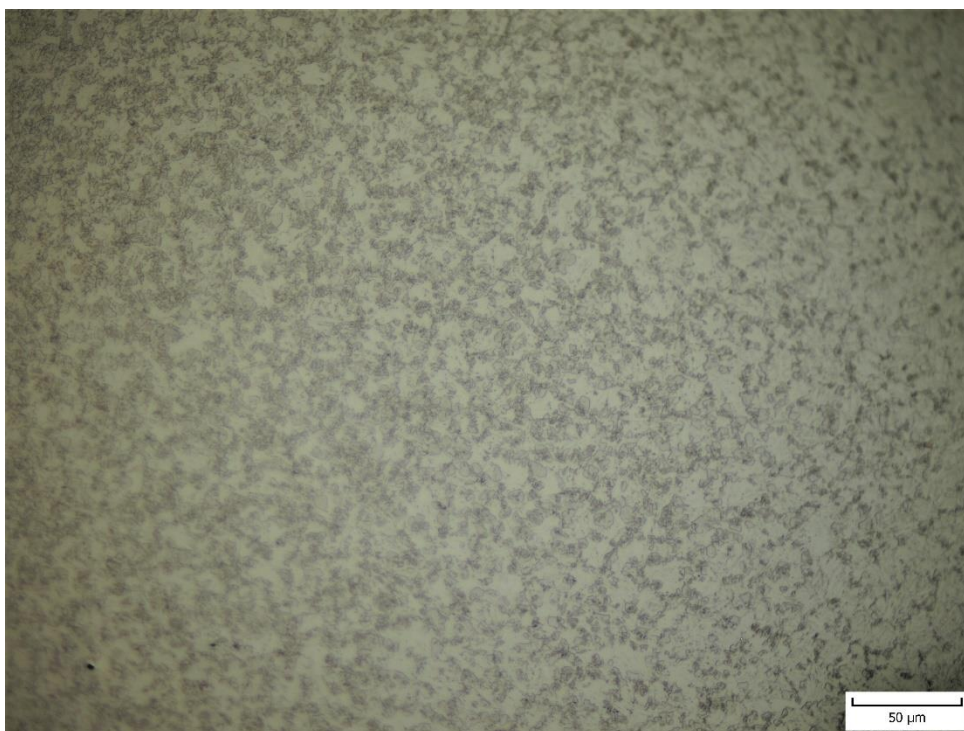
Obr. 55 Mikrostruktura vzorku F, zvětšení 100x.



Obr. 56 Mikrostruktura svarového kovu vzorku F, zvětšení 400x.



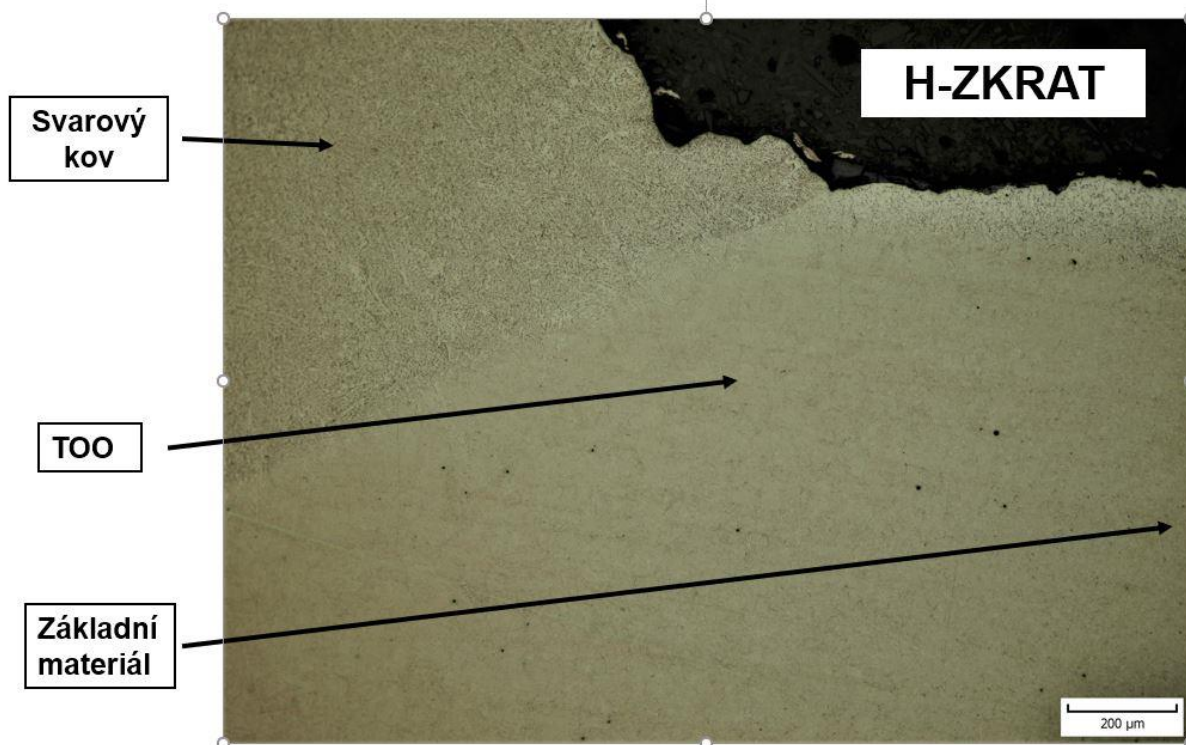
Obr. 57 Mikrostruktura TOO vzorku F, zvětšení 400x.



Obr. 58 Mikrostruktura základního materiálu vzorku F, zvětšení 400x.

Na obr. 55 je mikrostruktura pravé části vzorku F. Na tomto snímku jsou vyznačeny jednotlivé části svaru. Svarový kov obr. 56 má stejnou mikrostrukturu jako materiál Hardox, tedy acikulární ferit. Důvodem je použití stejného přídatného materiálu. Mikrostruktura TOO obr. 57 je martenzito – bainitická struktura. Základní materiál obr. 58 je také tvořen kombinací martenzitu a dolního bainitu.

Mikroskopické snímky materiálu Weldox svařené v režimu zkrat:



Obr. 59 Mikrostruktura vzorku H, zvětšení 100x.



Obr. 60 Mikrostruktura svarového kovu vzorku H, zvětšení 400x.



Obr. 61 Mikrostruktura TOO vzorku H, zvětšení 400x.



Obr. 62 Mikrostruktura základního materiálu vzorku H, zvětšení 400x.

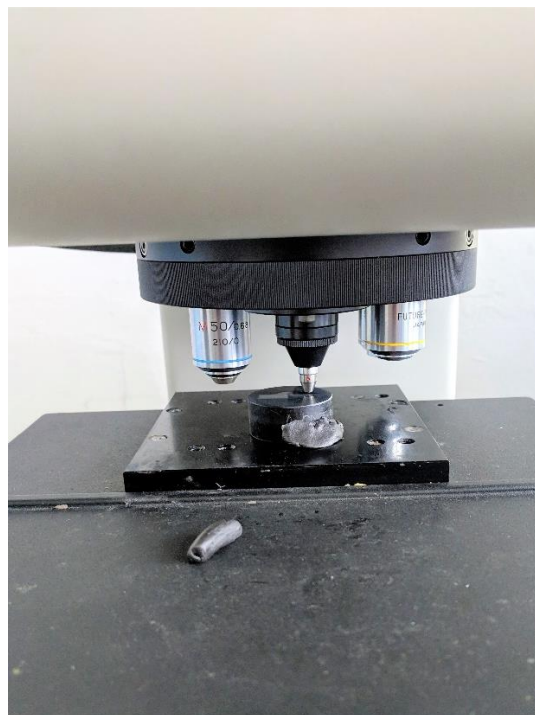
Mikrostruktura vzorku H obr. 59 je velice podobná vzorku F. Mikrostruktura svarového kovu obr. 60 acikulární ferit. TOO obr. 61 je také podobná vzorku F, liší se velikostí zrn. Základní materiál obr. 62 je znovu kombinace dolního bainitu s martenzitem.

5.9 Zkouška mikrotvrlosti

Zkouška mikrotvrlosti byla provedena na mikrotvrdoměry Leco LM 247 AT, obr. 63, metodou dle Vickerse. Zkušební zatížení bylo 0,1 kg (9,81 N), což odpovídá HV 0,1. Doba působení zatížení byla 10 s. Úhlopříčky vtisků byly měřeny mikroskopem, které zařízení samo vyhodnocovalo. Měřen byl jeden vzorek pro každý materiál a metodu svařování.

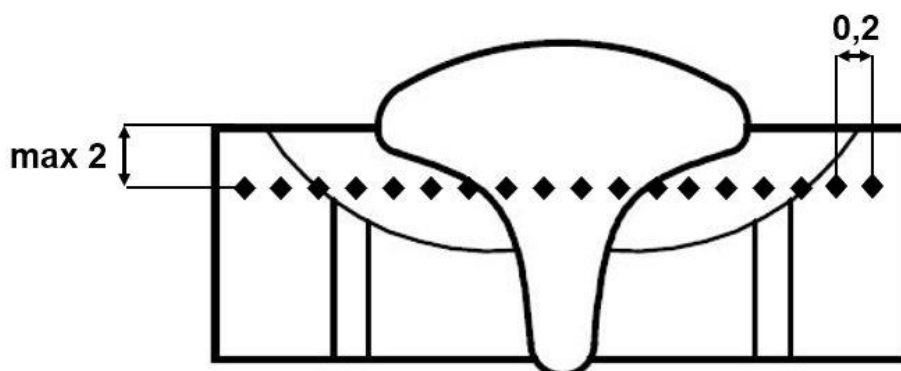


Obr. 63 Mikrotvrdoměr Leco LM 247 AT.



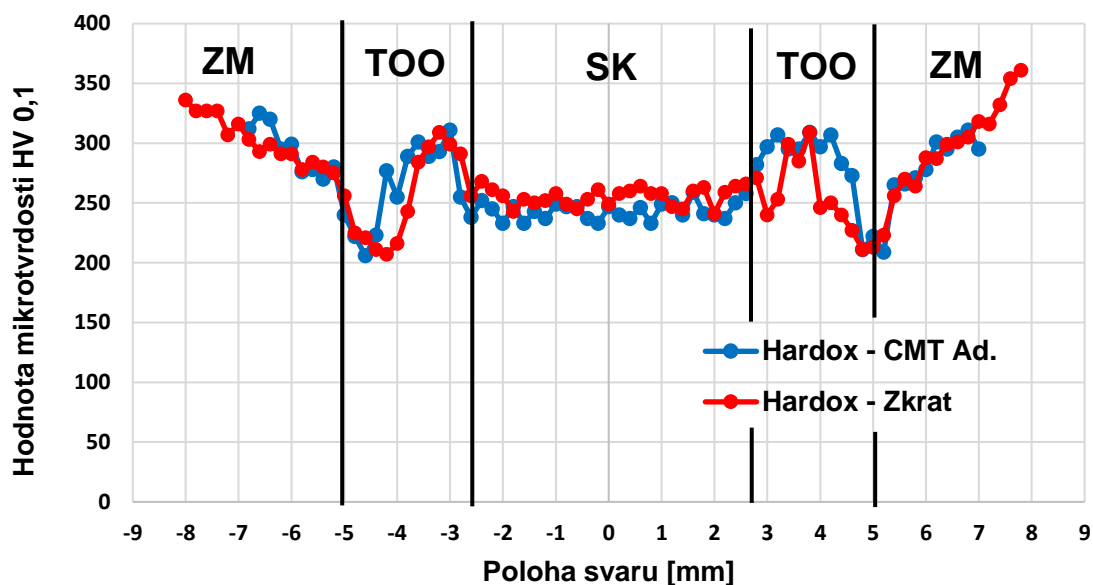
Obr. 64 Měření mikrotvrlosti.

Měření bylo provedeno formou řady vtisků, tak aby byla změřena tvrdost základního materiálu, TOO a svarového kovu, obr. 65. Rozteč vtisků byla zvolena podle normy ČSN EN ISO 9015-2, která pro HV 0,1 je 0,2 mm. Aby měření obsáhlo celou hodnocenou oblast bylo potřeba 80 vtisků v řadě. Průběh měření je na obr. 64.

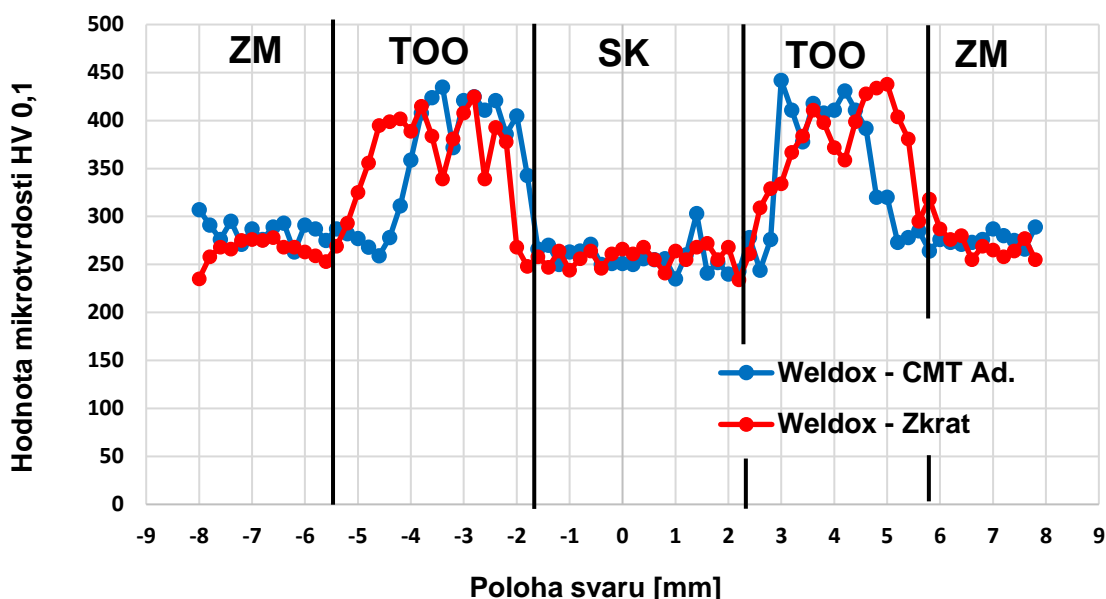


Obr. 65 Oblast měření.

Výsledky měření pro materiál Hardox jsou v grafu na obr. 66. Pro materiál Weldox jsou v grafu na obr. 67.



Obr. 66 Průběh tvrdosti svaru pro materiál Hardox.



Obr. 67 Průběh tvrdosti svaru pro materiál Weldox.

U ocelí s vyšší pevností, které jsou tepelně zpracované dochází vlivem svařování ke změně tvrdosti v ovlivněné části materiálu. Materiál Hardox je více popuštěný což potvrzuje jeho tvrdost v TOO, která poklesla na 200 HV. To odpovídá Widmanstättově struktuře. Tvrdost 200 HV odpovídá podle tabulky přepočtu pevnosti okolo 640 MPa. Materiál Weldox je méně popuštěný a projevilo se zvýšení tvrdosti v TOO. Tvrdost zde narostla až na 438 HV, která odpovídá pevnosti 1400 MPa. Tento nárůst pevnosti způsobil, že u příčné tahové zkoušky došlo k lomu v základním materiálu místo v TOO.

5.10 Zhodnocení experimentu

V experimentální části byly srovnávány dvě metody svařování. Výsledky byly podobné pro oba materiály. U materiálu Hardox došlo k velkému tepelnému ovlivnění hlavně kvůli dvouvrstvému svaru. Díky tomu došlo k velkému ovlivnění teplem šířícím se v materiálu a popuštění materiálu. Snížila se tak jeho pevnost i tvrdost. Pokud bychom porovnali výsledky příčné zkoušky s hodnotami, které udává výrobce, došli bychom k závěru, že mez pevnosti se snížila v průměru o 40 %. K lomu u tohoto materiálu došlo v místech s vadou svaru anebo v TOO. Z výsledků mikrostruktury je patrné, že vlivem tepla došlo ke změnám v základním materiálu z původní martenzitické struktury na strukturu dolního bainitu. Směrem ke svarovému kovu, kde byla vyšší teplota vznikala i struktura sorbit. Tato struktura vzniká popuštěním martenzitu za teplot nad 300 °C – 400 °C. Vzniklé struktury potvrzují i výsledky z měření mikrotvrdosti, které ukazují velký pokles tvrdosti v TOO. Vypočítané hodnoty vneseného tepla se liší hlavně u druhé vrstvy, kde už nestačily svařovací parametry u metody CMT Advanced a pro dokončení experimentu musela být použita metoda čistého CMT. Aby bylo docíleno správného zavaření druhé vrstvy, musel být navíc u této metody použit rozkvyv, který umožnil provaření povrchové vrstvy a současně došlo ke snížení svařovací rychlosti, která ovlivnila vnos tepla. Velikosti TOO je, ale u zkratové metody o trochu větší. To je nejspíše způsobeno principem metody a tím, že metoda CMT Advanced i metoda CMT je studenější proces svařování než konvenční metoda MAG ve zkratovém režimu.

Materiál Weldox byl oběma metodami svařen jednou housenkou, proto nedošlo k tak velkému ovlivnění teplem jak u materiálu Hardox. Navíc materiál Weldox má mnohem vyšší teplotu popuštění. U příčné zkoušky tahem všechny vzorky praskly v základním materiálu. Hodnoty, které byly zkouškou získány popisují základní materiál a odpovídají údajům výrobce. Z makroskopických snímků je vidět, že velikost TOO je pro obě metody stejně velká. Menší rozdíl je v šířce kořene svaru u zkratového režimu, což může způsobovat vyšší svařovací napětí. Mikrostruktura svarového kovu je acikulární ferit, která je stejná jako u materiálu Hardox. V základním materiálu je kombinace bainitu a martenzitu, kde převládá struktura bainitu. V TOO vlivem vysoké teploty vznikla struktura martenzitu a bainitu, kterou potvrzuje nárůst mikrotvrdosti v této oblasti.

6 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Ekonomické hodnocení této práce není postaveno na výrobě konkrétní součásti. Práce zkoumá možnosti aplikace technologie svařování ocelí s vyšší pevností procesem CMT Advanced, který je srovnáván s konvenční metodou MAG se zkratovým přenosem kovu. Srovnávány budou náklady na pořízení a provoz jednotlivých metod svařování. Porovnávána bude svařovací sestava CMT Advanced 4000 tab. 19, která byla použita v experimentální části s odpovídající sestavou TransPulsSynergic 4000 Remote tab.20, kde je použit jiný svařovací zdroj a příslušenství potřebné pro konvenční metodu MAG. Obě sestavy jsou profesionální zařízení od firmy Fronius. Ceny jsou uvedeny bez DPH.

Tab. 19 Svařovací sestava CMT Advanced 4000 [46].

Svařovací sestava:	CMT Advanced 4000
1 - Svařovací zdroj CMT Advanced 4000 Remote	317 090,-
2 - Podavač VR 7000-CMT	98 530,-
3 – Hořák Robacta Drive CMT	93 400,-
4 – Absorbér drátu CMT	25 110,-
Ostatní příslušenství	287 755,-
Cena celkem:	821 885,-

Tab. 20 Svařovací sestava TransPulsSynergic 4000 Remote [46].

Svařovací sestava:	TransPulsSynergic 4000 Remote
1 – Svařovací zdroj TransPuls Synergic 4000 Remote	162 110,-
2 – Podavač VR 1500	49 550,-
3 – Hořák Robacta	20 390,-
Ostatní příslušenství	272 931,-
Cena celkem:	504 981,-

Obě sestavy jsou určeny pro robotizované svařování. V cenové kalkulaci, ale není uvedena cena svařovacího robota, která by pro obě sestavy byla stejná. Náklady na provoz budou vyjádřeny výpočtem nákladů na 1 metr svaru pro obě metody u materiálu Weldom. Výpočet bude pomocí následujících rovnic [47; 48]:

Objem svaru:

$$V_s = \frac{S_s}{l \cdot 10^6} \quad (6.1)$$

kde: V_s - objem svaru [m^3],
 S_s - plocha svaru [mm^2],
 l - délka svaru [m].

Spotřeba přídavného materiálu na 1 metr svaru:

$$S_{pm} = V_s \cdot \rho \quad (6.2)$$

kde: S_{pm} - spotřeba přídavného materiálu [$kg \cdot m^{-1}$],
 ρ - hustota přídavného materiálu [$kg \cdot m^{-3}$].

Náklady na přídavný materiál pro 1 metr svaru:

$$N_{pm} = S_{pm} \cdot C_{pm} \quad (6.3)$$

kde: N_{pm} - náklady na přídavný materiál [$Kč \cdot m^{-1}$],
 C_{pm} - cena přídavného materiálu [$Kč \cdot kg^{-1}$].

Spotřeba ochranného plynu na 1 metr svaru:

$$S_{op} = \frac{q_{op}}{v_s} \quad (6.4)$$

kde: S_{op} - spotřeba ochranného plynu [$l \cdot m^{-1}$],
 q_{op} - průtok ochranného plynu [$l \cdot min^{-1}$],
 v_s - rychlost svařování [$m \cdot min^{-1}$].

Náklady na ochranný plyn na 1 metr svaru:

$$N_{op} = \frac{S_{op} \cdot C_{op}}{1 \cdot 10^3} \quad (6.5)$$

kde: N_{op} - náklady na ochranný plyn [$Kč \cdot m^{-1}$],
 C_{op} - cena ochranného plynu [$Kč \cdot m^{-3}$].

Čas na svaření 1 metru svaru:

$$t_s = \frac{1}{v_s} \quad (6.6)$$

kde: t_s - čas svařování 1 metru svaru [$min \cdot m^{-1}$].

Pracovní náklady na 1 metr svaru:

$$N_{pr} = \frac{t_s \cdot N_h}{60} \quad (6.7)$$

kde: N_{pr} - pracovní náklady [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$],
 N_h - náklady na hodinu práce [$\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$].

Celkové náklady na 1 metr svaru:

$$N = N_{pm} + N_{op} + N_{pr} \quad (6.8)$$

kde: N - celkové náklady na 1 metr svaru [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$].

Vypočítané hodnoty podle výše uvedených vztahů jsou uvedeny v tab. 21. Plocha svaru (S_s) byla získána pomocí Welding calculator (Svařovací kalkulačka), která spočítá plochu svaru po zadání rozměrů svařovaného materiálu a svařové housenky. Cena spotřebního materiálu a ochranného plynu byly zvoleny z ceníku firmy ESAB a Linde. Náklady na hodinovou práci bylo poměrně složité určit, protože nebyla zvolena konkrétní výroba. Hodinová sazba byla zvolena a zahrnuje v sobě mzdové náklady, náklady na pořízení stroje a náklady na energii. Pro sestavu CMT Advanced 4000 byla tato sazba vyšší z důvodu vyšší pořizovací ceny.

Pro výpočet byly použity následující údaje:

Hustota přídavného materiálu (G3Si)	-	7 850 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Cena přídavného materiálu [49]	-	50 $\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$
Cena ochranného plynu [50]	-	365,8 $\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$

Tab. 21 Náklady na 1 metr svaru pro svařování materiálu Weldom.

Svařovací sestava	CMT Advanced 4000	TransPulsSynergic 4000R
Plocha svaru [mm^2]	19,14	20,12
Objem svaru [m^3]	0,00001914	0,00002112
Spotřeba přídavného mat. [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$]	0,1502	0,1658
Náklady na přídavný materiál [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$]	7,51	8,29
Průtok ochranného plynu [$\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$]	16	16
Rychlost svařování [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	0,61	0,61
Spotřeba ochranného plynu [$\text{l} \cdot \text{m}^{-1}$]	26,23	26,23
Náklady na ochranný plyn [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$]	9,59	9,59
Čas svařování [$\text{min} \cdot \text{m}^{-1}$]	1,639	1,639
Náklady na hodinu práce [$\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$]	530	500
Pracovní náklady [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$]	14,48	13,66
Celkové náklady na 1 m svaru [$\text{Kč} \cdot \text{m}^{-1}$]	31,58	31,54

7 ZÁVĚR

V teoretické části se tato práce věnuje problematice svařování ocelí s vyšší pevností, především tvorbě vodíkových trhlin. Popisuje také princip obloukového svařování v ochranné atmosféře metodou CMT Advanced. Dále je zde stručný popis kontroly svarových spojů. V experimentální části byly porovnávány dvě obloukové metody svařování v ochranné atmosféře, v režimu CMT Advanced a ve zkratovém režimu. Svařovány byly dva materiály. První materiál byla otěruvzdorná ocel Hardox 450 o tloušťce 6 mm, která má vysokou pevnost a tvrdost. Druhým materiálem byla pevnostní ocel Weldox 700 E o tloušťce 4 mm. Materiál Weldox změnil v roce 2015 obchodní značku na Strenx 700.

Materiál Weldox o síle 4 mm byl oběma metodami zavařen jednou svarovou housenkou. Silnější materiál Hardox o síle 6 mm byl oběma metodami svařen na dvě vrstvy, ale během svařování bylo zjištěno, že metoda CMT Advanced nedokáže u druhé vrstvy svaru dostatečně provařit materiál, proto pro druhou vrstvu bylo svařovací zařízení přepnuto do režimu čistého CMT. Metoda je tedy spíše vhodná pro tenčí materiály, kde se dokážou uplatnit všechny její výhody.

Porovnávány byly především mechanické vlastnosti svarových spojů, pomocí příčné zkoušky tahem a zkoušky mikrotvrdosti. U materiálu Weldox došlo k porušení v základním materiálu, znamená to tedy, že svarové spoje byly kvalitní. Materiál Hardox byl porušen v části svarového spoje. U obou metod svařování nedošlo mezi sebou k výrazným rozdílům. Zkouška mikrotvrdosti vyšla opět pro obě metody bez velkých rozdílů. Kontrola makrostruktury ukázala trochu větší oblast TOO u svařovací metody ve zkratovém režimu. Jako poslední byla provedena kontrola mikrostruktury, kde se vzniklé mikrostruktury mezi metodami nelišily. V ekonomické části této práce byly zjištěny pořizovací ceny jednotlivých svařovacích sestav. Svařovací sestava se svařovacím zdrojem schopným svařovat v režimu CMT Advanced má o 63 % vyšší pořizovací cenu oproti srovnatelně kvalitnímu zařízení, které svařuje ve zkratovém režimu. Pro materiál Weldox byly také počítané náklady na 1 m svaru, které jsou pro obě metody stejné.

Z výsledků tohoto experimentu se pro svařování ocelí s vyšší pevností více hodí konvenční metoda obloukového svařování v ochranné atmosféře. Metoda má lepší možnosti při svařování větších tlouštěk tohoto typu materiálů a její pořizovací cena je mnohem nižší. Metoda CMT Advanced by měla své opodstatnění, pokud by byla využívána pro tenké materiály, kde by se uplatnily její největší výhody.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PAVLÍČEK, Jaromír. *Svařování speciálních ocelí HARDOX a WELDOX: Studijní opora* [online]. [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <https://www.ssa-krnov.cz/f/00031.pdf>
2. Weldox 1100 a 1300. In: *OEM Off-highway* [online]. 28. května 2008 [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <https://www.oemoffhighway.com/engineering-manufacturing/manufacturing/hardware-materials/steel-and-other-metals/product/10057686/ssab-weldox-1100-and-1300>
3. Hardox Wear Plate. In: *Balistikzirhceligi* [online]. c2012 [cit. 2019-01-10]. Dostupné z: <http://balistikzirhceligi.com/images/products/hardox/hardox-4.jpg>
4. Oceli HARDOX, WELDOX a jejich svařování. *Svarinfo* [online]. 12.08.2008 [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008061801>
5. NOVÁK, Stanislav a Jiří MRÁČEK. Svařování ocelí s vyšší pevností. *Allforpower* [online]. c2007 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/svarovani%20oceli%20vys%20p-evnosti.pdf>
6. Materiály WELDOX a DOMEX nahradil STRENX. *Gamaocel* [online]. c2019 [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <https://www.gamaocel.cz/4862/weldox/>
7. *Weldox*. Ostrava: SSAB Swedish Steel.
8. *General Product Information: Weldox, Hardox, Armox and Toolox*. Oxelösund: SSAB EMEA.
9. *Hardox: univerzální otěruvzdorný plech*. Ostrava: SSAB Swedish Steel.
10. ARMOX: ochranná “neprůstřelná” ocel. *Gamaocel* [online]. c2019 [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <https://www.gamaocel.cz/20362/armox/>
11. FREDERICK, . *Výroba oceli* [chat]. 28. ledna 2019 [cit. 2019-02-14].
12. KOCICH, Radim. *Termomechanické procesy tváření: Studijní opora* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/termomechanicke-procesy-tvareni/Kocich_Termomechanicke-procesy-tvareni.pdf
13. BENEŠOVÁ, Soňa. Termomechanické zpracování. *MMSpektrum* [online]. 3.6.2015 [cit. 2019-02-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/termomechanicke-zpracovani.html>

14. PACKARD, Keith. WELDING HIGH STRENGTH STEELS. *Fabricating and metal working* [online]. 25 June 2008 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2008/06/welding-high-strength-steels/>
15. *Materiály a jejich chování při svařování: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Ostrava, 2016.
16. *Svařování ocelí Hardox a Weldom*. Oxelösund: SSAB.
17. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 9788024820255.
18. HERMAN, Petr. Svařování jemnozrnných, vysokopevnostních ocelí. *Konstrukce* [online]. 30.11.2010 [cit. 2019-03-15]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/svarovani-jemnozrnnych-vysokopevnostnich-oceli/>
19. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
20. *Welding handbook: A guide to better welding of Hardox and Weldom* [pdf]. Oxelösund: SSAB, c2009-2016 [cit. 2019-02-22]. ISBN 978-91-978573-0-7. Pdf dokument poskytnutý firmou SSAB.
21. ČSN EN 1011-2. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2002, 56 s.
22. ČSN EN ISO 13916. *Svařování - Směrnice pro měření teploty předehřevu, teploty interpass a teploty ohřevu*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018, 16 s.
23. OCHODEK, Vladislav. *Stanovení teploty předehřevu* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/stanoveni_teploty_predehrevu_2012.pdf
24. KUBÍČEK, Jaroslav. *TECHNOLOGIE II ČÁST SVAŘOVÁNÍ: Díl 1 Základní metody svařování, sylabus přednášek* [online]. Brno, 2006 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubicek.pdf
25. ZÁKLADY SVAŘOVÁNÍ MIG/MAG. *EWM* [online]. c2017 [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/fachwissen/mig-mag-schweissen-grundlagen.html>

-
26. KOLEKTIV AUTORŮ, . *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 8085771810.
 27. *Svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře MIG/MAG* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=33457&revision=-1&instance=2>
 28. *Výkon díky inovaci a kompetenci: Ochranné plyny pro svařování*. Praha: Linde Gas.
 29. *COLD METAL TRANSFER: Technologie*. Praha: Fronius Česká republika, 2011.
 30. FELIX, Michal. *Cold Metal Transfer (CMT)* [online prezentace]. 2007. Prezentace poskytnuta firmou Fronius.
 31. Nový standard ve svařovací technice Proces CMT (Cold Metal Transfer). *Technický týdeník* [online]. 1. ledna 2006 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/novy-standard-ve-svarovaci-technice-proces-cmt-cold-metal-transfer_10667.html
 32. FRONIUS PŘIDÁVÁ FUNKCI CMT KE ZDROJI TPS / i. In: *Fronius* [online]. 13.12.2016 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/press/fronius-adds-cmt-functionality-131216>
 33. TPS / i CMT: Robacta Drive CMT. In: *Fronius* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.tps-i.com/en/cmt/>
 34. CMT – COLD METAL TRANSFER: STUDENÝ SVAŘOVACÍ PROCES PRO NEJVYŠŠÍ KVALITU. *Fronius* [online]. c2019 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/o-svarovani/svarovaci-procesy/cmt>
 35. EDER, Thomas. Na hranici obloukového svařování – technologické a aplikační inovace s CMT Advanced. *Konstrukce* [online]. 25.11.2010 [cit. 2019-04-2]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/na-hranici-obloukoveho-svarovani-technologicke-a-aplikacni-inovace-s-cmt-advanced/>
 36. MEDUNA, Martin. *Nejnovější trendy ve svařovací technice* [online prezentace]. 2011. Prezentace poskytnutá firmou Fronius.
 37. CMT ADVANCED: VYŠŠÍ ODTAVNÝ VÝKON, LEPŠÍ PŘEMOSTĚNÍ SPÁR A VYŠŠÍ STABILITA. *Fronius* [online]. c2019 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/o-svarovani/svarovaci-procesy/cmt-advanced>

-
38. *Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I: Hodnocení kvality svarového spoje* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/assets/subject/files/105/def-kontrola-sv.pdf>
 39. ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 16 s.
 40. ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 76 s.
 41. ČSN EN ISO 9015-2. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018, 16 s.
 42. ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 12 s.
 43. Weldox High Strength Steel: Weldox 700. SSAB [pdf]. [cit. 2019-04-25].
 44. Hardox Wear Plate: Hardox 450. SSAB [pdf]. [cit. 2019-04-25].
 45. *Katalog přídatných svařovacích materiálů*. Vamberk: ESAB, 2018.
 46. *Ceník 2017: Perfect welding* [pdf]. Praha: Fronius, 1. ledna 2017 [cit. 2019-05-10].
 47. HOJGROVÁ, Diana. *Návrh výpočtů nákladů v procesu svařování*. Ostrava, 2018. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie.
 48. PAJER, Josef. *Ekonomika a jednoduché kalkulace nákladů při svařování* [online prezentace]. 2009.
 49. Svařovací drát OK ARISTOROD 12.50 1.0mm 18kg. *Svařujte* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.svarujte.cz/807-svarovaci-drat-ok-aristorod-12-50-1-0mm-18kg>
 50. *ZÁKLADNÍ CENÍK PRODUKTŮ A SLUŽEB* [doc]. Linde Gas, 1.1.2017 [cit. 2019-05-10].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
A	tažnost	[%]
ARA	anizotermický diagram rozpadu austenitu	
CE	uhlíkový ekvivalent (dle IIW)	[%]
CET	uhlíkový ekvivalent (dle TNI CEN ISO/TR 15608)	[%]
CEV	uhlíkový ekvivalent (dle IIW)	[%]
CMT	cold metal transfer	
C_{op}	cena ochranného plynu	[Kč·m ⁻³]
C_{pm}	cena přídavného materiálu	[Kč·kg ⁻¹]
CT	značka dotykového teploměru	
CTS	controlled thermal severity	
F_e	zatěžující síla na mezi kluzu	[N]
F_m	maximální zatěžující síla	[N]
HAZ	heat affected zone	
HD	obsah difuzního vodíku	[ml·100g ⁻¹]
I	svařovací proud	[A]
L_o	počáteční měřená délka	[mm]
L_u	konečná měřená délka po lomu	[mm]
ΔL	přírůstek počáteční délky v každém okamžiku zkoušky	[mm]
MAG	metal active gas	
MIG	metal inert gas	
MMA	manual metal arc	
N	celkové náklady na 1 metr svaru	[Kč·m ⁻¹]
N_h	náklady na hodinu práce	[Kč·hod ⁻¹]
N_{op}	náklady na ochranný plyn	[Kč·m ⁻¹]
N_{pm}	náklady na přídavný materiál	[Kč·m ⁻¹]
N_{pr}	pracovní náklady na 1 metr svaru	[Kč·m ⁻¹]
Q	vnesené teplo (tepelný příkon)	[kJ·mm ⁻¹]
RD	research department	
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_{eH}	horní mez kluzu	[MPa]
R_{eL}	dolní mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
SAW	submerged arc welding	
SK	svarový kov	
S_o	počáteční průřezová plocha	[mm ²]
S_{op}	spotřeba ochranného plynu	[l·m ⁻¹]
S_{pm}	spotřeba přídavného materiálu	[kg·m ⁻¹]
S_s	plocha svaru	[mm ²]
S_u	minimální průřezová plocha po lomu	[mm ²]
$t_{8/5}$	doba chlazení z 800 °C na 500 °C	[s]
T_{AC3}	teplota úplné transformace feritu na austenit	[°C]
T_{Ar1}	teplota dokončené transformace austenitu na ferit	[°C]
T_{Ar3}	teplota začátku transformace austenitu na ferit	[°C]
TB	značka bezdotykového teploměru (optický, elektrický)	

TE	značka termočlánku	
T_{GC}	teplota hrubnutí zrna	[°C]
TIG	tungsten inert gas	
T_i	teplota interpass	[°C]
TMP	thermomechanical processing	
TMZ	termomechanické zpracování	
T_m	teplota ohřevu	[°C]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
T_p	teplota předehřevu	[°C]
T_{pCET}	vliv chemického složení na teplotu předehřevu	[°C]
T_{pd}	vliv tloušťky svařovaného materiálu na teplotu předehřevu	[°C]
T_{pHD}	vliv obsahu difuzního vodíku na teplotu předehřevu	[°C]
T_{pQ}	vliv tepelného příkonu na teplotu předehřevu	[°C]
T_{rs}	teplota zastavení rekrystalizace	[°C]
TS	značka termo křídly	
U	svařovací napětí	[V]
V_s	objem svaru	[mm ³]
Z	kontrakce	[%]
ZM	základní materiál	
d	tloušťka svařovaného materiálu	[mm]
k	koeficient tepelné účinnosti	[-]
l	délka svaru	[m]
q_{op}	průtok ochranného plynu	[l·min ⁻¹]
t_s	čas svařování 1 metru svaru	[min·m ⁻¹]
v	svařovací rychlost	[mm·min ⁻¹]
v_s	rychlost svařování	[m·min ⁻¹]
ε	poměrné prodloužení	[-]
ρ	hustota přídavného materiálu	[kg·m ⁻³]

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1: Certifikát materiálu Weldox 700 E (Strenx 700)
Příloha č. 2: Certifikát materiálu Hardox 450
Příloha č. 3: Svažený vzorek metodou CMT Advanced (2. vrstva CMT), materiál Hardox 450
Příloha č. 4: Svažený vzorek v režimu zkrat, materiálu Hardox 450
Příloha č. 5: Svažený vzorek metodou CMT Advanced, materiál Weldox 700 E
Příloha č. 6: Svažený vzorek v režimu zkrat, materiál Weldox 700 E
Příloha č. 7: Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN
Příloha č. 8: Makroskopické snímky materiálu Hardox 450 obou metod svařování
Příloha č. 9: Makroskopické snímky materiálu Weldox 700 E obou metod svařování

Příloha č. 1: Certifikát materiálu Weldox 700 E (Strenx 700)



SSAB EMEA AB, SE-613 80 OXELÖSUND, Sweden

Inspection certificate EN 10 204 - 3.1	A52 Inspecting department Quality inspection	A35 Purchaser order no. 10425028	A07 Our order no. 172888-50	A08 Invoice no.	A10 Certificate no and date 15792179 2016-07-28	A03
---	---	-------------------------------------	--------------------------------	-----------------	--	-----

Purchaser SSAB EMEA AB 913 80 Oxelösund Sverige	A11 22233	Product Structural steel	B01	Marking (stamping) Steel grade, Manufacturer, MATERIAL ID	906 OX STREX 700 Staingrade STREX 700 E	902
Quantity 1	Dimensions [mm] T 4 W 2500 L 6000	900-011 Weight [kg] 471	B10	Defns. Code, DOA	Intrnal code 23233	B16
Country SSAB EMEA AB c/o Jerns Osk, s.r.o. Bratislava 4004 6501 Hlohovec Czech Republic	A20 Customer marks 2287					B18

MATERIAL ID: 115203-353-079

Chemical composition

Heat no 115203	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Al	N	B	M	EW	314
	0.15	0.28	1.28	0.11	0.01	0.5	0.5	0.24	0.16	0.10	0.005	0.002	0.002	0.40	313

Testtype Tensile Test	CO4 MILCODE 249195	CO1 Specimen position Til end	CO2 Disc-Pos Transvers	CO3 Treat-ment Delivery condition	CO5 Specimen type Rectangular	CO6 Temp [C] 817	CO7 Temp [F] 1500	CO8 Tensile 817	CO9 Yield 550	CO10 Elongation 16
--------------------------	--------------------------	-------------------------------------	------------------------------	---	-------------------------------------	------------------------	-------------------------	-----------------------	---------------------	--------------------------

EN 10025-6/6890-2L
ALSO MEETS REQUIREMENTS OF WELDOX 700 E

Customer article no: 2237

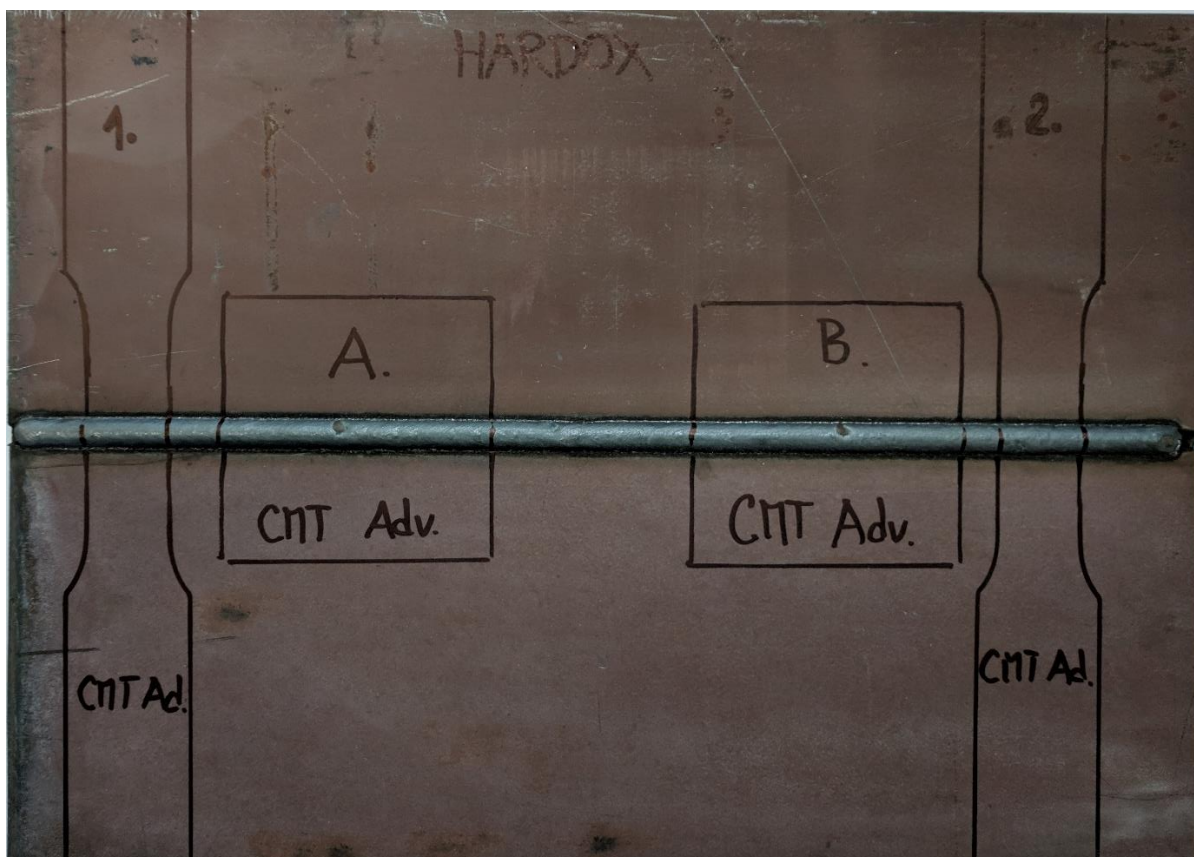
	It is hereby certified that the material described above complies with the requirements of the order.		This certificate is produced with EDP and will not have signature Quality Inspection Department 2 Tjökensgjädd, S.A. Seckmund www.strenx.com	#22	
	B02				

Příloha č. 2: Certifikát materiálu Hardox 450

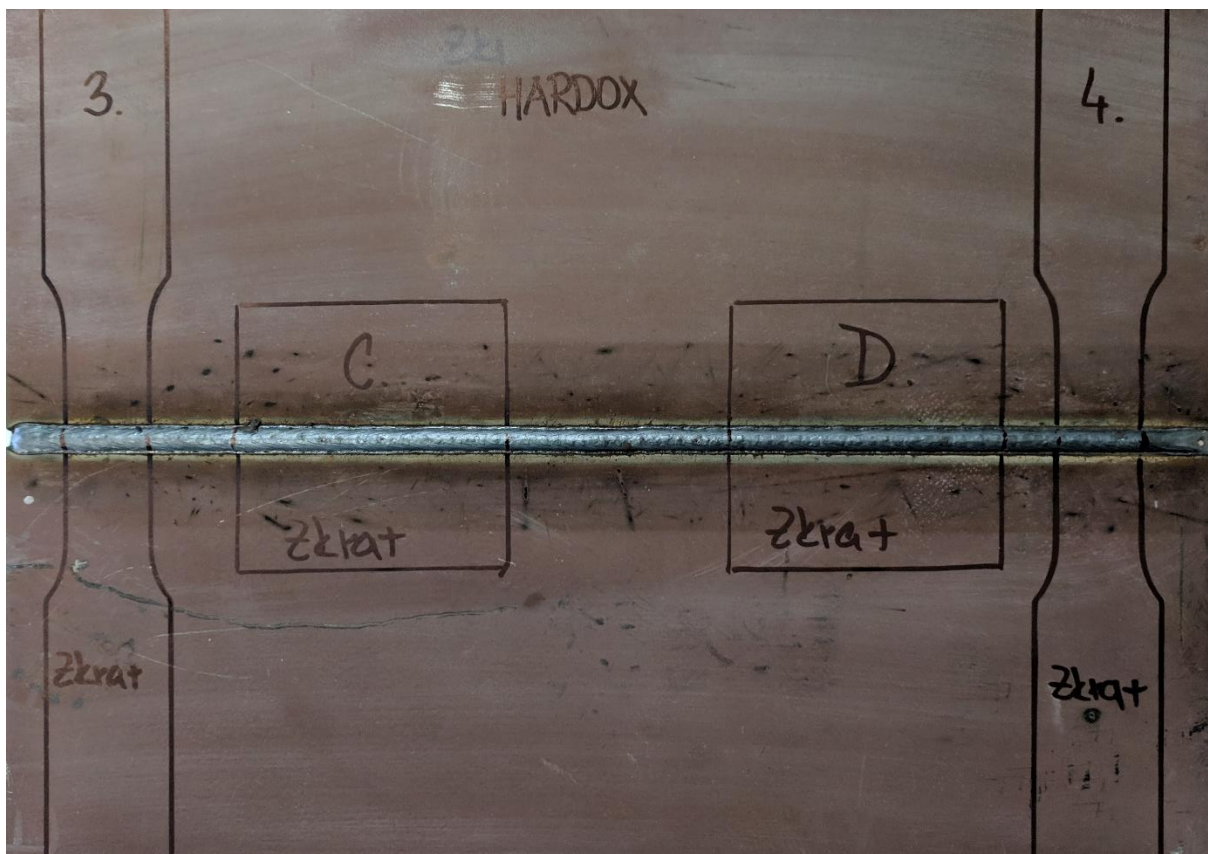


Inspection certificate EN 10 224 - 3.1		A02 Issuing department Quality inspection		A05 Purchaser order no.		A07 Our order no 177975-0		A19 Invoice no 15333573-2015-12-40		SSAB EMEA AB, SE-613 66 OXELÖSKUNG, Sweden A01			
Buyer SSAB EMEA CO SMID, S.R.O. PRUMYSLOVA ZONA, VOŠTICE 031 568 01 VOŠTICE NPTO Czech Republic		A11 Issuing department Quality inspection		Product Abrasion resistant steel plate		E01 Marking (blasting) Steel grade, Manufacturer, MATERIAL ID		B06 Carboner marks 2880		315			
A11 23233		Quantity T 6 W 2500 L 8000		E02 Dimensions (mm)		E03-E11 Weight (kg)		B02 Deliv. Cond.		316			
A08 SSAB EMEA AB c/o Genta Oost, s.r.o. Bratislavská 1004 30501 Heterane Czech Republic		A09 SSAB EMEA AB c/o Genta Oost, s.r.o. Bratislavská 1004 30501 Heterane Czech Republic		A06 Steel grade: H450DX 450		A04 Standard rules OX H450DX 450 Steel grade H450DX 450		B04		302			
MATERIAL ID 311D52-120155		A03 311D52-120155		A08 311D52-120155		A09 311D52-120155		A06 311D52-120155		B07 311D52-120155			
Chemical composition													
Heat no	C	Si	Mn	P	S	Cr	M	Mo	B	Ni	EW	C14	C18-C19
311052	17	50	130	012	003	00	00	001	001	40	40	304	CE(EN) = C + MnS - (Cr+Mo+Ni) + (Ni+Cu) + P C14 = CET = C + (Mn+Mo+Ni) + (Cr+Cu) + Ni + P
Testtype	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16-C17
	Millicode	Specimen position	Direction	Treatment	Specimen type	Form	Meas	Test results					
Hardness test: HBW	727798	Tail end		Delivery condition				C32					
Customer article no: 2830													
OX		This certificate is produced with EDF and valid without signature		Quality Inspection Department / R		Tichonemjick / A Backlund		Z02		Z01		A02	
HARDOX		www.hardox.com											

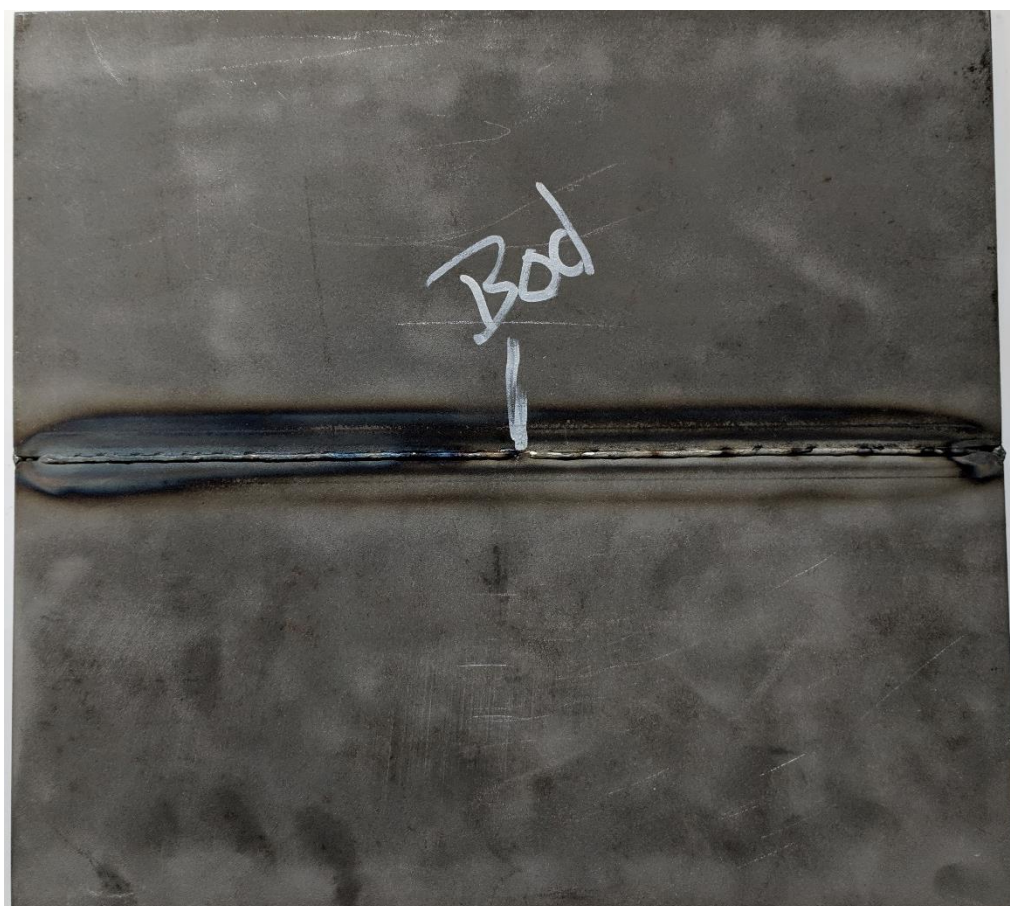
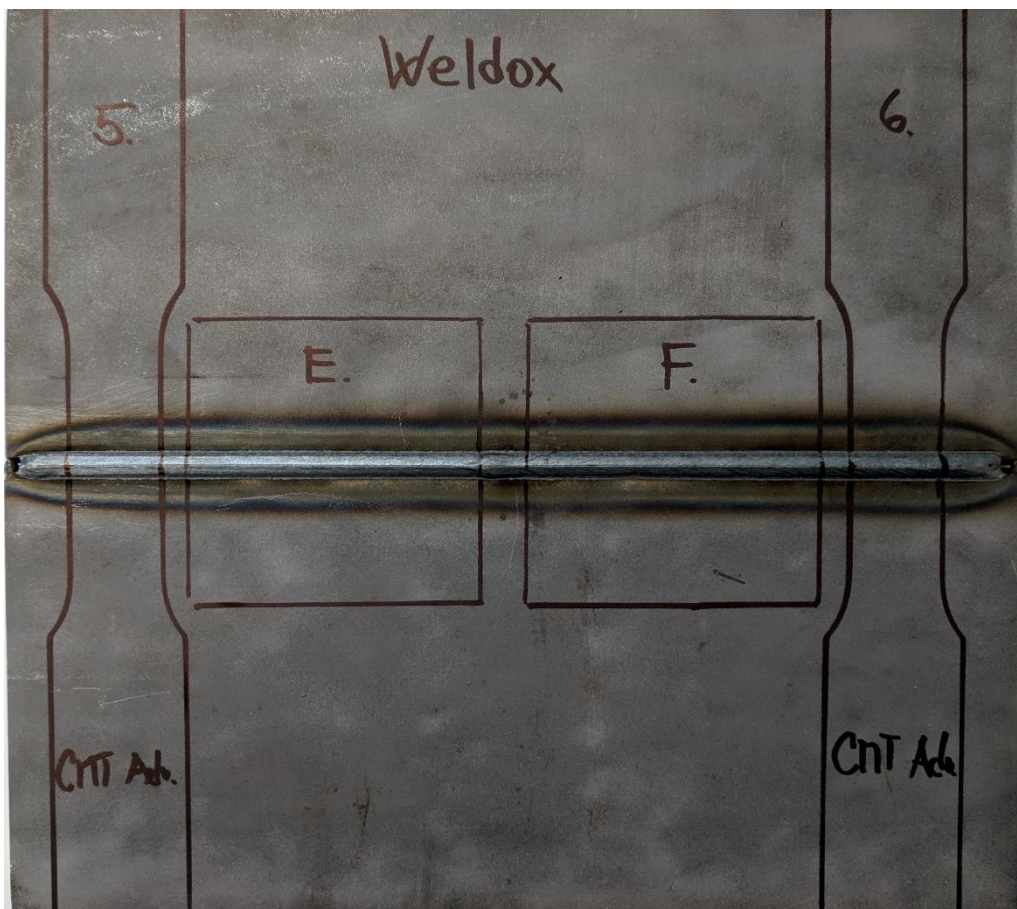
Příloha č. 3: Svařený vzorek metodou CMT Advanced (2. vrstva CMT), materiál Hardox 450



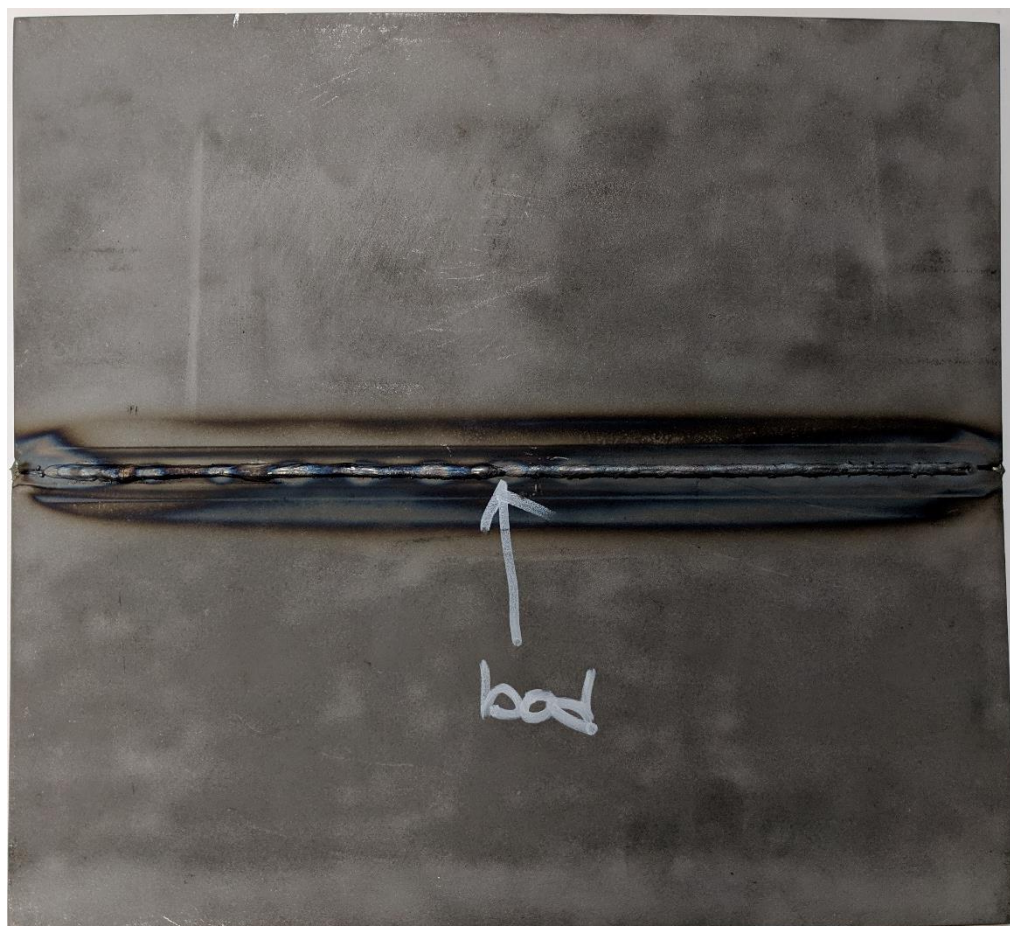
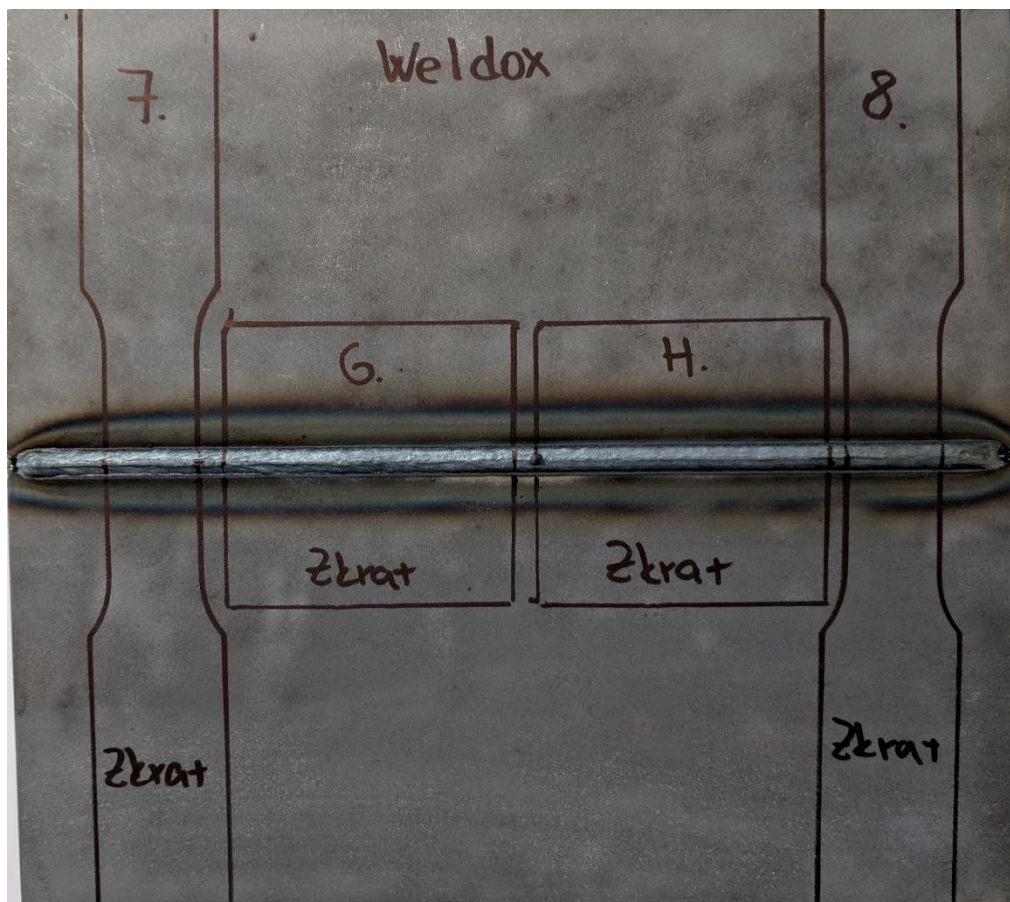
Příloha č. 4: Svařený vzorek v režimu zkrat, materiálu Hardox 450



Příloha č. 5: Svařený vzorek metodou CMT Advanced, materiál Weldom 700 E



Příloha č. 6: Svařený vzorek v režimu zkrat, materiál Weldom 700 E



Příloha č. 7: Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN

Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropské výrobci univerzálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

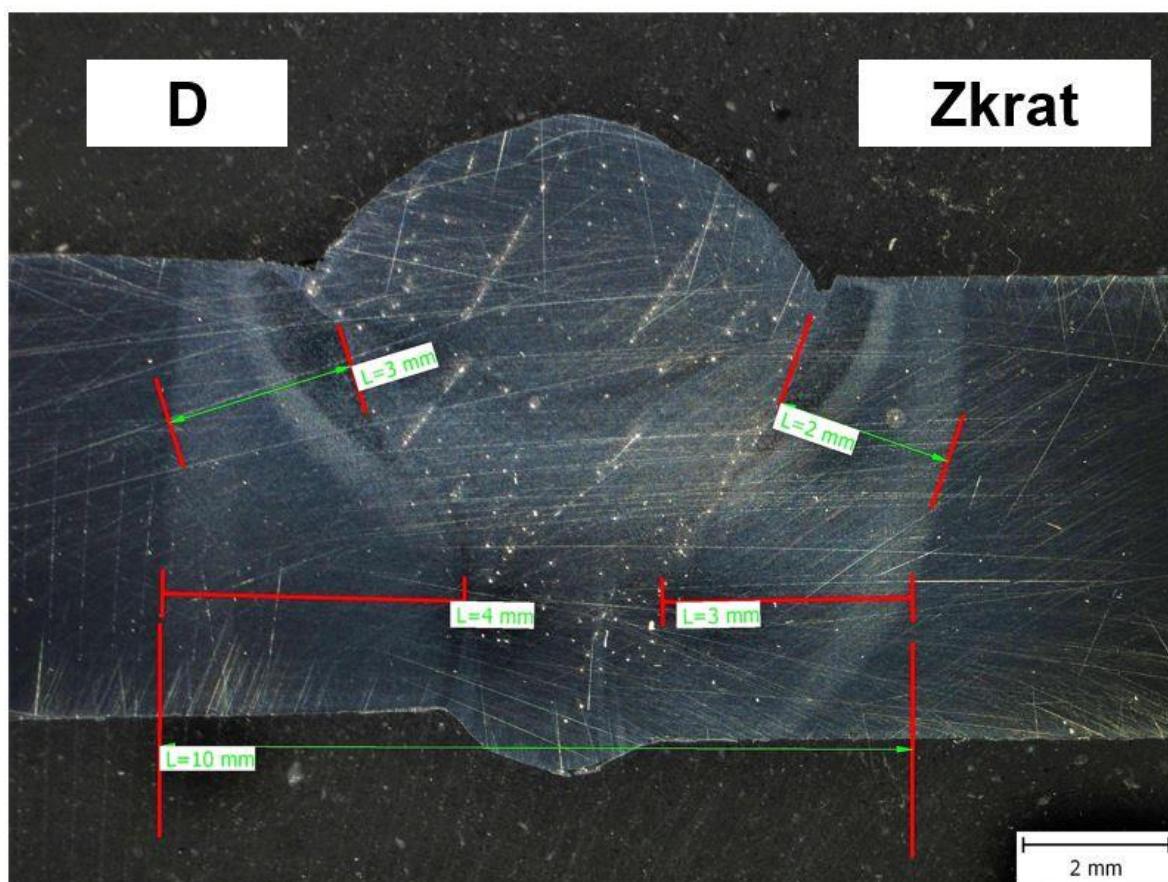
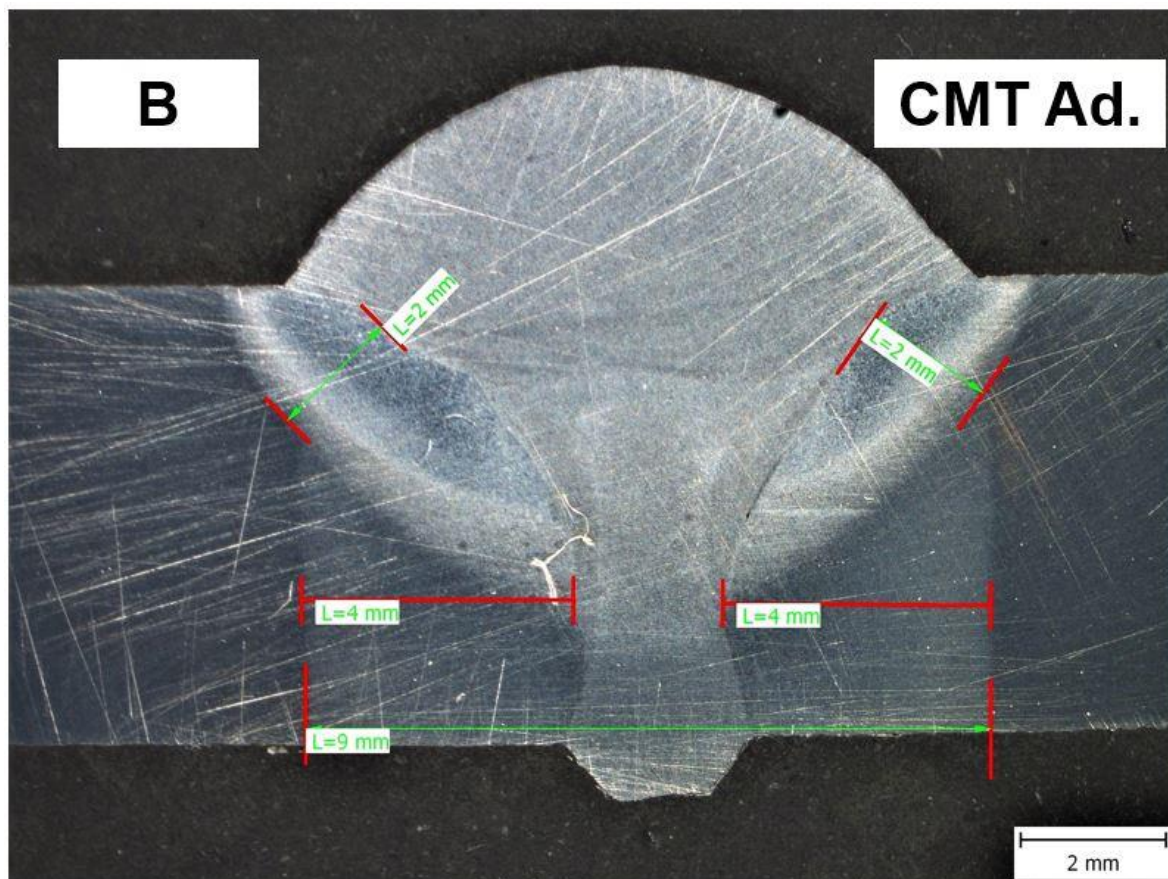
- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

Příloha č. 8: Makroskopické snímky materiálu Hardox 450 obou metod svařování



Příloha č. 9: Makroskopické snímky materiálu Weldox 700 E obou metod svařování

