

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská
metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace svařovacích parametrů technologie GMAW, pro robotické
svařování pozinkovaných oceli v automobilovém průmyslu

Autor: **Bc. Mykhailo Tochylin**

Vedoucí práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**

Akademický rok 2019/2020

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Tochylín	Jméno Mykhailo	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Jméno Antonín	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace svařovacích parametrů technologie GMAW, pro robotické svařování pozinkovaných ocelí v automobilovém průmyslu		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	70	TEXTOVÁ ČÁST	54	GRAFICKÁ ČÁST	16
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje studii použitelného rozsahu svařovacích parametrů rychlosti svařování, rychlosti podávání drátu a pozici drátu vůči základním materiálům. Současně navrhuje optimální hodnoty těchto parametrů pro dva konkrétní svarové spoje. Práce dále obsahuje makro a mikro hodnocení struktury a vyhodnocení tvrdosti svarových spojů v případě použití navržených parametrů.
KLÍČOVÁ SLOVA	GMAW, MAG, robotické svařování, svařování pozinkovaných ocelí, TS, WFS, WTP, TRIM, parametrické rovnice svařování

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surnam Tochylin	Name Mykhailo	
FIELD OF STUDY	3911T016 Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	Příjmení Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Jméno Antonín	
INSTITUTION	University of West Bohemia – Faculty of Mechanical Engineering – Department of Material Science and Technology		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	GMAW technology welding parameter optimization in robotic welding galvanized steel for automotive use		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Department of Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----------------------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 And eg. A4)

TOTAL	70	TEXT PART	54	GRAPHIC PART	16
--------------	----	------------------	----	---------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, AIM, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis includes a case study on an applicable range of welding parameters, namely the Welding speed, Wire feed speed, and Wire target point against the base materials. Additionally, the author of the thesis suggests optimal figures of the above mentioned parameters for the given case study. The thesis also includes a macro, micro and hardness assessment of weld joints in case of implementing the suggested optimal parameters.
KEY WORDS	GMAW, MAG, robotic welding, galvanized steel welding, TS, WFS, WTP, TRIM, parametric welding equations

Seznam použitých zkratk a symbolů

GMAW	Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou (angl. gas etal arc welding)
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
WFS	Rychlost podávání drátu (angl. wire feed speed) [mm/s]
MCW	Trubičkový drát s kovovou náplní (angl. metal cored wire)
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
SCGA	Ocelový plech tvářený za studena, pozinkovaný vyžíhaný (angl. steel plate cold rolled galvanized annealed)
C_e	Uhlíkový ekvivalent
WTP	Pozice drátu vůči základním materiálům (angl. wire target point) [mm]
TS	Rychlost svařování (angl. travel speed) [mm/s]
ZM	Základní materiál

Obsah

Úvod.....	1
1 GMAW a jeho parametry vzhledem ke svařování pozinkovaných základních materiálů ..	2
1.1 Svařovací proud	2
1.2 Svařovací napětí	3
1.3 Rychlost svařování	3
1.4 Pozice drátu	3
1.5 Svařitelnost	4
1.6 Vliv pórů způsobených povrchovou vrstvou zinku na mechanické vlastnosti GMAW spoje	5
1.7 Přídavný materiál a vliv jeho chemického složení na porozitu způsobenou zinkovou vrstvou	7
1.8 Ochranná atmosféra a vliv jejího složení na porozitu způsobenou zinkovou vrstvou	10
1.9 Svařovací úhly a jejich vliv na porozitu způsobenou zinkovou vrstvou	13
2 Základní materiál a jeho specifikace.....	15
2.1 Rozdělení svarů	17
2.2 Povrchová úprava	17
3 Normou definované jakostní požadavky spojů.....	18
4 Volba vstupních svařovacích parametrů	19
4.1 Konstantní svařovací parametry	19
4.1.1 Svařovací zdroj a mód.....	20
4.1.2 Přídavný materiál	20
4.1.3 Ochranný plyn	20
4.1.4 Výlet drátu.....	21
4.1.5 Svařovací pozice a úhel hořáku.....	21
4.2 Proměnné svařovací parametry	21
4.2.1 Rychlost svařování	21
5 Vyhodnocení parametrických rovnic	23
5.1 Přeplátovaný spoj – popis a výsledky měření	23
5.1.1 Vývoj závislosti WFS vs. TS	23
5.1.2 Vývoj závislosti WTP vs. TS	24
5.2 Koutový spoj – popis a výsledky měření.....	25
5.2.1 Vývoj závislosti WFS vs. TS	25
5.2.2 Vývoj závislosti WTP vs. TS	26
5.3 Diskuze	26
6 Metalografické vyhodnocení základních materiálů	27

6.1	Mikrografie	29
6.2	Tvrдост.....	30
7	Vyhodnocení vybraných parametrů	30
7.1	Koutový spoj - nejnižší dovolený příkon	31
7.1.1	Makrografie	32
7.1.2	Mikrografie.....	33
7.1.3	Tvrдост	35
7.2	Přepřátovaný spoj - nejnižší dovolený příkon	36
7.2.1	Makrografie	36
7.2.2	Mikrografie.....	37
7.2.3	Tvrдост	39
7.3	Koutový spoj – nejvyšší dovolený příkon	39
7.3.1	Makrografie	40
7.3.2	Mikrografie.....	41
7.3.3	Tvrдост	43
7.4	Přepřátovaný spoj – nejvyšší dovolený příkon	43
7.4.1	Makrografie	44
7.4.2	Mikrografie.....	45
7.4.3	Tvrдост	46
7.5	Vyhodnocení výsledků	46
8	Ekonomické vyhodnocení.....	48
9	Závěr	49
	Zdroje	50
	Seznam obrázků	51
	Seznam tabulek	53
	Grafická část – seznam příloh	54

Úvod

Jedním z vývojových trendů v automobilovém průmyslu je snižování hmotnosti vozidel, které s sebou nese řadu ekonomických a ekologických výhod. Vývoj materiálů jako např. mikrolegované slitiny železa takovou změnu umožnil. V dnešní době jsou díly karosérií lehčí a zároveň díky lepším mechanickým vlastnostem odpovídají jim předepsaným zatížením. Rychlost korozního působení vnějšího prostředí na ocel však zůstala téměř neměnná. Procentuální podíl úbytku tloušťky materiálu vůči zbytku funkčního průřezu je výraznější u tenčích polotovarů než u polotovarů větších tlouštěk. Aby odlehčená součástka kompenzovala svou provozní životnost, měla by být nějakým technologickým způsobem chráněna proti korozi.

Pozinkování je velmi rozšířený způsob ochrany ocelových výrobků od korozních vlivů okolního agresivního prostředí. Největší výhodou spojení ocel-zinek je vytvoření galvanického článku, kde zinek vystupuje jako obětovaná anoda a chrání základní materiál před elektrochemickou korozní degradací. Pozinkování se ve většině případů provádí na jednotlivých dílech, které se následně spojují, aby vytvořily finální výrobek. To je velkou nevýhodou pro svařovací technologie kvůli nízké teplotě varu zinku.

Zinková vrstva na základních materiálech při obloukovém svařování přináší nevýhody, které mají dopad na kvalitu výrobků: nestabilita hoření oblouku, zvýšené množství svařovacích rozstříků, neřízená porozita, snižující se mez pevnosti a únavy spoje, nedostatečná penetrace nebo velikost svaru. To je jen základní výčet problémů, se kterými se technolog během optimalizace procesu setká.

V teoretické části projektu bude probrán vliv jednotlivých vstupních parametrů se zaměřením na minimalizaci negativních následků pozinkové vrstvy na kvalitu svarového spoje při obloukovém svařování v aktivním nebo inertním ochranném plynu.

Účelem experimentální části je doplnění výzkumu svařování pozinkovaných ocelí konkrétních svařovacích specifik. Jedná se o robustní vyhodnocení chování svařovacího procesu v celém rozsahu třech definovaných proměnných: rychlost podávání drátu, rychlost svařování a pozice hořáku vůči svarovému spoji. Výsledkem experimentu je získání trojrozměrného prostoru parametrů vyhodnocených a odpovídajících kvalitativním požadavkům Toyota technického standardu TSH5603G (Toyota Engineering standard) pro obloukové svařování class C1.

1 GMAW a jeho parametry vzhledem ke svařování pozinkovaných základních materiálů

Na svařování se lze dívat jako na difuzní proces pohybu částic, který je urychlen dodáním tepla v místě vytvářeného spoje. Tepelný účinek má však i svá negativa. V případě nedostatku přívodu tepla může vést ke zvýšení rizika vzniku nadměrné tvrdosti a studeného praskání v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) spoje nebo dokonce i samotného svaru v závislosti na vlastnostech základního a přídavného materiálu, svařovací metodě a vzniklému pnutí. Na druhou stranu velký přívod tepla vede kvůli růstu zrn k lokálnímu zhoršení mechanických vlastností spoje.

Rozlišné podíly mikrostruktur v TOO jsou výsledkem ochlazovacích mechanismů v závislosti na chemickém složení a velikosti původních austenitických zrn. Mikrostruktura svaru může být tvořena horním, spodním nebo granulárním bainitem, lamelárním perlitem, martenzitem nebo dokonce i s podílem zbytkového austenitu. Je to díky tomu, že většina tvářených polotovarů obsahují přísadu C a Mn. Mn je silným austenitizačním prvkem, snižujícím fázové přeměny až o 40 °C směrem k nižším teplotám. Pokud ochlazování probíhá s podchlazením, je pravděpodobné, že v takových případech bude dosažena dominantně bainiticko-martenzitická struktura. Zároveň velké ochlazovací rychlosti redukuje čas, který je podstatný pro difuzní procesy rozpadu austenitu. Výsledkem toho je výsledná martenzitická a spodně bainitická mikrostruktura.

V této kapitole bude probrán chemický a fyzikální pohled na klíčové faktory, kterými lze ovlivnit průběh změn v materiálech a dosáhnout požadovaných optimálních výsledků svařování.

1.1 Svařovací proud

Hodnota svařovacího proudu používaného v GMAW svařování má největší vliv na depoziční poměr přenášení kovu, rozměr housenky, tvar a průvar spoje. Běžné je svařování stejnosměrným proudem s pozitivní polarizací elektrody – přídavného drátu, protože poskytuje větší příkon a díky tomu lze dosahovat větších hloubek průvarů základního materiálu. Pokud ostatní svařovací parametry zůstanou konstantní a postupně bude zvyšován svařovací proud, bude zvětšován i rozměr svarové housenky a hlavně hloubka jeho průvaru [10].

Některé svařovací zdroje neumožňují napřímo nastavovat hodnotu svařovacího proudu, ale přes parametr zvaný WFS (angl. wire feed speed). Hodnota proudu se odvozuje od nastaveného WFS a svařovací proud nelze nastavit jinak než změnou WFS. Ve výsledku je proměnná svařovacího proudu vázaná na hodnotu WFS, a tím usnadňuje celkovou práci se zařízením.

Každá konkrétní rychlost svařování má z kvalitativního pohledu na provedený svar svoje rozlišné WFS limity. V horní limitě se bude jednat o nadměrnou penetraci spojenou s vysokým tepelným příkonem a případně i o propálení základního materiálu. Ve spodní limitě nebude základní materiál dostatečně provařen, popř. bude disponovat defekty z důvodu malého tepelného příkonu a následky tím způsobených. Pokud se budeme bavit o svařování pozinkovaných základních materiálů, spodní hranice WFS musí být vyšší než u nepozinkovaného základního materiálu, protože část tepla se odnese následkem rozstříku a musí se tedy svarovému spoji dodat dostatečné teplo, aby se odpařovaná zinková vrstva

dokázala uvolnit do okolní atmosféry a nezůstala uzavřená ve svaru. Horní hranice se posune k vyšším hodnotám pouze o hodnotu tepla ztracenou rozstříkem. Rozsah optimálních parametrů WFS je tak v případě svařování pozinkovaných materiálů značně ovlivněn.

1.2 Svařovací napětí

Další důležitou proměnnou, která musí být pod kontrolou je svařovací napětí určující délku oblouku. Pokud ostatní svařovací parametry zachováme konstantní, délka hořícího oblouku je přímo úměrná nastavované hodnotě napětí. Vysoké hodnoty svařovacího napětí mohou pomoci redukovat množství rozstříků. Svar provedený při vyšších napětích má konvexní tvar. Nevýhodou používání větších hodnot napětí je to, že svařovací oblouk taví hrany základního materiálu a nemá dostatečné množství přídavného materiálu na jejich vyplnění svarovým kovem. Tímto vzniká defekt zvaný zápal (angl. undercut). Kromě toho se zvýšením napětí snižuje hloubka průvaru základního materiálu z toho důvodu, že teplo se dodává na větší plochu. Pokud se používá malé napětí, zvyšuje se množství rozstříků a svar disponuje konkávním tvarem a větší hloubkou průvaru [10].

Nastavení některých svařovacích zdrojů umožňuje automaticky přiřazovat hodnotu svařovacího napětí v závislosti na WFS. Jsou to tzv. Synergické svařovací zdroje. Hodnota napětí se automaticky volí dle WFS hodnoty a rovnou optimalizuje hoření oblouku požadovanému druhu přenosu kovu. Závislost je pak vyjádřena synergickou křivkou, která je přednastavená od výrobce svařovacího zařízení. Hodnoty napětí se mohou měnit v závislosti na druhu přídavného materiálu, tloušťce základních materiálů a složení ochranné atmosféry dle příslušné synergické křivky.

1.3 Rychlost svařování

Rychlost svařování je definována rychlostí pohybu oblouku vůči základním materiálům a vyjadřuje se v uražené vzdálenosti za časovou jednotku. Parametr se dá precizně nastavovat, pokud se jedná o svařování automatické nebo robotické a tím regulovat množství vneseného tepla na jednotku délky. Při stálém proudu, pomalejší pohyb hořáku znamená větší vnesené teplo, což odpovídá větší svarové housence a větším hodnotám penetrace. Rychlejší pohyb naopak může způsobit nízké hodnoty průvaru, porozitu, nečistoty a nerovnoměrný profil housenky.

1.4 Pozice drátu

Pozice drátu je parametr určující vzdálenost odchýlení osy přídavného materiálu od kořene svaru. Stejně jako parametr *rychlost svařování* se dá pozice drátu kontrolovat, pokud se jedná o robotické svařování. Pozice drátu ve své podstatě neovlivňuje nic jiného než poměr průvaru prvního a druhého základního materiálu. K problému dochází, pokud se u dílů vstupujících do automatizované linky sleduje rozměrová odchylka a kořen sesazení se tak nestabilně pohybuje vůči ose souřadnic robotického centra. V návaznosti na problematiku je možné přizpůsobovat svařovací parametry tak, aby velikost housenky pokryla maximální odchylku vstupních dílů. Pomáhá tomu zejména nižší svařovací rychlost a nižší WFS hodnota, kdy je výsledná housenka dostatečně široká, ale stále odpovídá požadovaným hodnotám průvaru.

1.5 Svařitelnost

Svařitelnost oceli reprezentuje především zájem dosáhnout takových mikrostruktur, které naplní často vysoké výkonnostní a kvalitativní požadavky na spoje. Jedná se o důležitou technologickou vlastnost běžně používanou v materiálovém inženýrství, která je velmi komplexní, aby byla definována a kvantifikována v přesné podobě. Americký svářečský institut definuje svařitelnost jako nástroj pro určení technické vhodnosti vstupního materiálu k vytvoření svarových spojů o předepsané jakosti za konkrétních svařovacích podmínek. V souladu s první částí technické normy DIN 8528 svařitelnost vnímá jako výstup vzájemného působení tří hlavních faktorů:

1. Materiál. Přesněji jeho charakteristika, kterou lze chápat jako chemické složení, fyzikální a metalurgické vlastnosti, náchylnost k vytvrzování, k zakalení a praskání, segregace, rozměr zrn, anizotropie, bod tání atd.
2. Výrobní technologie. Spočívá zejména v přípravě a provedení spoje. Lze sem zařadit předehřev, tepelné zpracování, svařovací pozice, penetrace, tvar svarové lázně, případné úpravy povrchu.
3. Konstrukce. Sem lze zařadit tloušťku materiálu, koncentrátoři napětí, korozi, druhy a velikost namáhání, tvar svarového spoje.

Svařitelnost se běžně určuje pomocí uhlíkového ekvivalentu nebo maxima tvrdosti TOO, nebo náchylnosti k praskání v TOO kv vytvrzovacímu efektu. Ve výsledku je platnost každé navržené metody omezena, protože ignoruje další důležité okolnosti, které mají razantní vliv na svařitelnost.

Technickou univerzitou v Kluži byl vypracován a matematickou rovnicí popsán alternativní postup vůči konvenčním metodám a model určení svařitelnosti „5PL“. Bere v úvahu zároveň 5 klíčových faktorů na svařitelnost: čas ochlazování t_{8-5} , uhlíkový ekvivalent, tloušťku materiálu, tvrdost základního materiálu a střední velikost zrna [1].

$$WN = a + \frac{d - a}{\left[1 + \left(\frac{C_{eq}}{c}\right)^b\right]^e}$$

kde:

WN Stupeň svařitelnosti (angl. weldability number) vyjádřen číslem od 0 do 1.

- a** Spodní asymptota grafu závislosti tvrdost – čas ochlazování t_{8-5} . Minimální teoretická svařitelnost.
- b** Popisuje změnu svařitelnosti v okolí inflexního bodu z grafu závislosti ochlazovací křivky t_{8-5} .
- c** doba dosažení inflexního bodu tvrdosti z grafu závislosti stupně svařitelnosti a uhlíkového ekvivalentu a času ochlazování t_{8-5} . Parametr je upřesněn velikostí zrna a optimální ochlazovací rychlosti t_{8-5} .
- d** horní asymptota grafu závislosti tvrdost – čas ochlazování t_{8-5} . Maximální teoretická svařitelnost.
- e** faktor asymetrie křivky z grafu závislosti stupně svařitelnosti a uhlíkového ekvivalentu.

WN hodnoty určené 5PL metodikou, jejich posouzení a vztah ke konvenční klasifikaci svařitelnosti podle uhlíkového koeficientu je uvedeno v *Tab. 1*.

Tab. 1 Porovnání C_{eq} a 5PL svařitelnostních klasifikačních systémů

Svařitelnost	C_{eq} ekvivalent	Posouzení založené na 5PL metodě	
Zaručená	$C_{eq} < 0,40 \%$	$0,8 < WN < 1,0$	Je možné rychlejší ochlazování pro docílení dobrého poměru pevnost : houževnatost
Podmínečně zaručená	$0,40\% < C_{eq} < 0,50\%$	$0,6 < WN < 0,8$	Pro $WN > 0,7$ předehřátí není zapotřebí. Rozsah optimálních svařovacích parametrů j zúžen
Dobrá	$0,50\% < C_{eq} < 0,60\%$	$0,4 < WN < 0,6$	Je nutno předepsat předehřátí v souvislosti s DIN EN 1011-2:2001
Obtížná	$0,60\% < C_{eq} < 0,80\%$	$0,2 < WN < 0,4$	Zvolením vhodných svařovacích parametrů a teplotě předehřátí je svařování stále možné
Žádná	$0,80\% < C_{eq}$	$WN < 0,2$	Svařitelnost slabá nebo nulová

S ohledem na směr řešení problematiky této diplomové práce (viz níže), je základní materiál brán jako konstanta. Tudiž parametry chemického složení základních materiálů nemohou být měněny, ale mohou se vypočítat pro porovnání.

1.6 Vliv pórů způsobených povrchovou vrstvou zinku na mechanické vlastnosti GMAW spoje

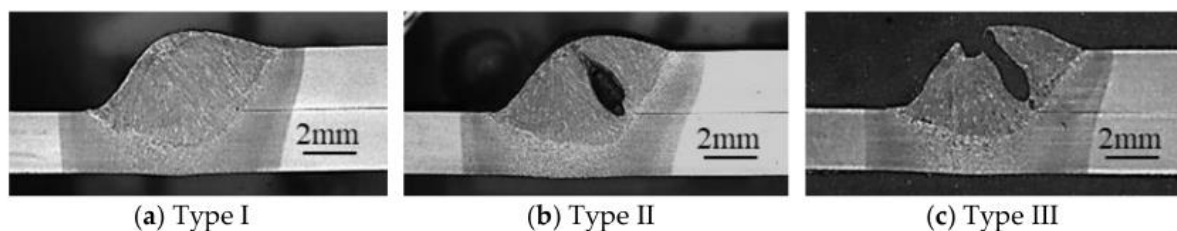
Více zdrojů uvádí to, že přítomnost zinkové vrstvy na základních materiálech nemá výrazný kvantifikovatelný vliv na mechanické vlastnosti výsledného svarového spoje [8], [9]. Avšak vzhledem k následkům spojeným s nižší teplotou varu zinku, než je teplota tavení slitin železa, zinek neprospívá kvalitě spojů. Tlak výparů zinku má exponenciální a při prudkém zvýšení teploty i explozivní průběh [2]. Vyprodukovaná energie na vytvoření kvalitního spoje se plýtvá na nadměrný svarový rozstřík. Navíc pokud je ztuhnutí svarové lázně dokončeno dříve, než ze slitiny uniknou výpary zinku, vzniká ve svarových spojích nežádoucí porozita. Snížená mez pevnosti, mez únavy, nedostatečná hloubka penetrace, trhliny – to všechno jsou zhoršené charakteristiky kvůli necelistvosti profilu spoje [3].

Výzkumným týmem pod vedením Dong-Yoon Kima, byla vypracována studie za účelem pochopení vlivu vzniklé porozity na mechanické vlastnosti svarového přeplátovaného spoje vytvořeného metodou GMAW. Základním materiálem posloužila ocel GA 590 FB s mezí pevnosti v tahu R_m 583 MPa a jako přídatný materiál drát ER70S-3 s mezí pevnosti v tahu R_m 560 MPa. Detailnější svařovací podmínky lze najít v *Tab. 2* [4].

Tab. 2 Svařovací parametry použité ve studii vlivu porozity na vlastnosti svarových spojů

Parametr	Hodnota
Welding process	Direct Current
Rychlost podávání drátu (WFS)	7,0 [m/min] = 116,66 [mm/sec]
Rychlost svařování (TS)	80 [cm/min] = 13,33 [mm/sec]
Proud / napětí	237 [A] / 22,7 [V]
Pracovní úhel	45°
Základní materiál / Tloušťka	GA 590 FB / 2,3 [mm]
Zinková vrstva	43,8 [g/m ²]
Přídavný materiál / průměr	AWS A5,18 ER70S-3 / Ø1.2 [mm]
Ochranný plyn / průtok	90% Ar + 10 % CO ₂ / 20 [l/min]
Svařovací pozice	PB (přepřátovaný svar, svislé základní materiály)

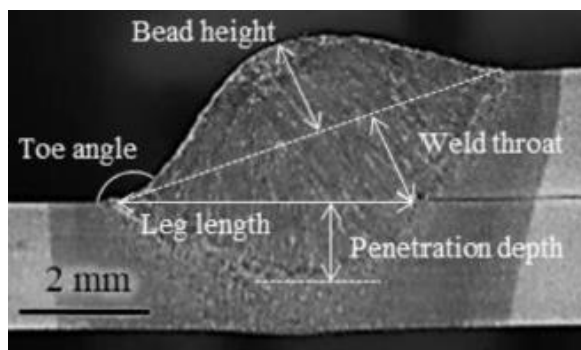
Podle umístění defektu ve svaru byly vzorky rozříděné do 3 skupin (viz *Obr. 1*). Skupina 1 – nulová porozita. Skupina 2 – skrytá porozita o velikosti 1-3 mm² svaru. Skupina 3 – povrchová porozita o velikosti 1-3 mm².



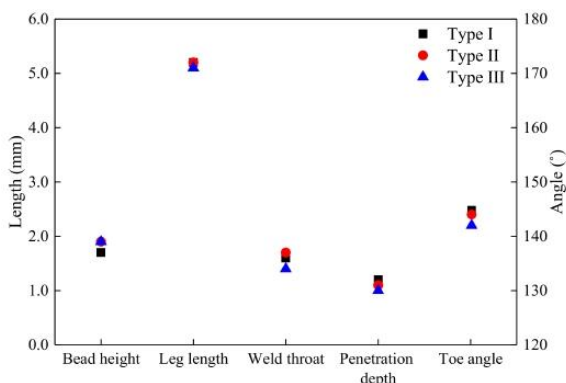
Obr. 1 Rozřídění svarů podle umístění porozity

Na základě porovnání výsledků rozměrových charakteristik svarových spojů bylo zjištěno, že napříč všemi třídami jsou si tyto charakteristiky podobné (Viz *Obr. 2* a *Obr. 3*), tudíž vzorky lze podrobit pevnostním zkouškám, aniž bychom se museli obávat, že dojde k výrazným a nezanedbatelným rozdílům ve výsledcích.

Zkouškou tahem byl zjištěn pokles pevnosti druhé skupiny vzorků cca o 25 % vůči první skupině, a pokles pevnosti třetí skupiny cca o 40 % vůči první skupině (Viz. *Obr. 4*). Zároveň šíření trhliny základním materiálem proběhlo pouze u první skupiny vzorků. U skupiny druhé a třetí trhlina se šířila svarem.

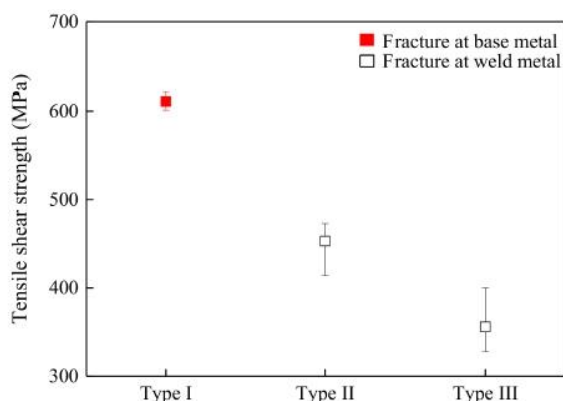


Obr. 2 Legenda rozměrových parametrů svarů

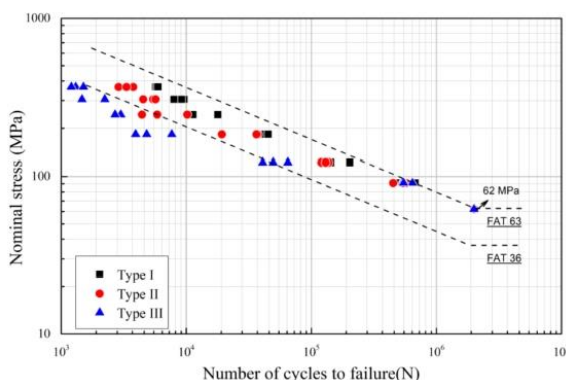


Obr. 3 Záznam rozměrových parametrů vzorků

Zkouška únavy ukázala, že mez únavy pro všechny skupiny vzorků je totožná při nominálním napětí 62 MPa a rovná se 2×10^6 cyklů. IIW 2008 specifikace FAT 63 je splněná pro vzorky s iniciací trhliny na rozhraní svaru a základního materiálu při nominální hodnotě napětí 92 MPa. Při větších napětích iniciace a šíření trhlin probíhalo přes kořen svaru. (Viz. Obr. 5)



Obr. 4 Porovnání pevnosti v tahu vzorků



Obr. 5 Wöhlerův diagram poruch vzorků v závislosti na nominálním napětí

Prospěchem vypracovaného článku je kvantifikace mechanických vlastností dosažených destruktivními zkouškami a jejich vztahem na velikost defektů. Konkrétní výsledek může být porovnán s kvalitativními požadavky na spoje a na základě toho může být rozhodnuto, jestli jsou defekty takového druhu přijatelné vzhledem k provozní specifikaci.

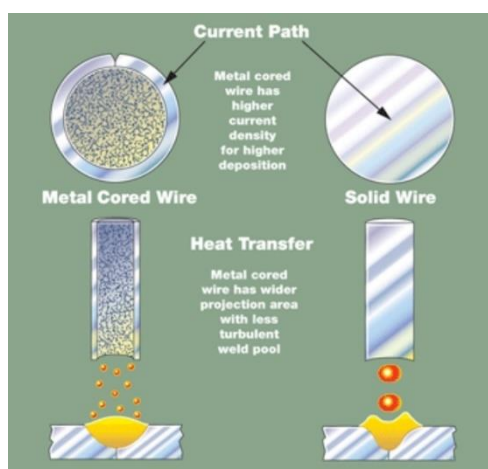
1.7 Přídavný materiál a vliv jeho chemického složení na porozitu způsobenou zinkovou vrstvou

Po dobu mnoha let je plný drát standardem v GMAW svařování. Při správné volbě parametrů může plný drát splnit potřebné požadavky na kvalitu svařového spoje. I přes zdánlivě optimální nastavení svařovacího procesu s plným drátem se musí z určitých důvodů stále redukovat následující: množství svařovacích rozstříků, nadměrná penetrace při vyšších rychlostech svařování či jiné defekty způsobené odpařováním povrchové vrstvy zinku ze

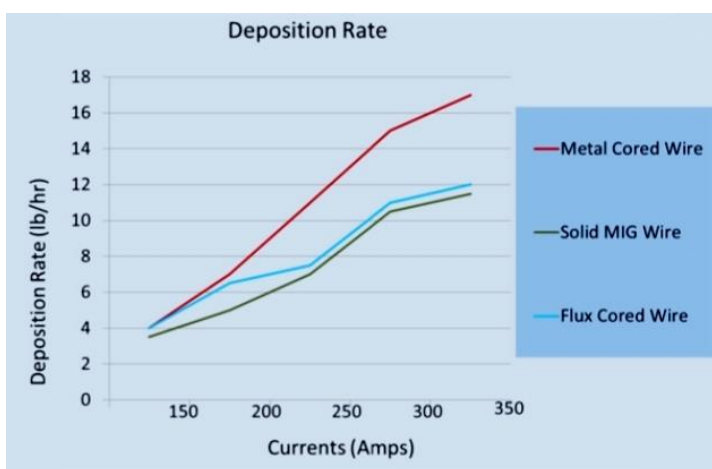
základního materiálu. Jednou z možností zlepšení může být náhrada plného drátu za plněný [5].

Drát s kovovou náplní neboli MCW (Metal Cored Wire) ale nedokáže ve všem konkurovat jiným druhům svařovacího drátu. Ekonomické výhody MCW, vzhledem k jeho jednotkovým nákladům a kalkulovaným úsporám, nemohou být posouzeny jako rentabilní ve spoustě aplikací.

MCW, na rozdíl od homogenního plného ocelového drátu se skládá z: obalové trubkové elektrody – vnějšího vodivého pláště a kovových práškových elementů v jádru. Na rozdíl od plného drátu, kde elektrický proud teče celým průřezem, u MCW proud teče pouze jeho pláštěm. Tím se dosahuje větší hustoty elektrického proudu a benefitní specifikum hoření oblouku od povrchu k práškové kovové náplni drátu. Nákres průběhu tavení MCW a plné elektrody lze vidět na *Obr. 6*.



Obr. 6 Tavicí charakteristika MCW a plného drátu.[6]



Obr. 7 Depoziční poměr přídavných GMAW elektrod. 10 [lb/hr] je cca 1,26 [g/sec]. [5]

Díky existenci dobře vodivého pláště plněné elektrody se dosahuje lepší hustoty elektrického proudu než u plného drátu. Proto je i depoziční poměr lepší než u jiných elektrod (viz. *Obr. 7*) a jeho efektivita dosahuje 92-98 %.

Týmem výzkumných pracovníků Jiyoung Yu a Seung Mk Cho byla vypracovaná studie vlivu přísad C, Mn a Si v tavicím se drátu na množství porozity ve svarovém kovu. Autory byl zkoumán vznik a chování výparů zinku pomocí vysokorychlostního záznamového zařízení. Pro posouzení množství porozity bylo použito rentgenové zařízení.

Tab. 3 Svařovací parametry použité ve studii vlivu chemického složení drátu na porozitu svarových spojů

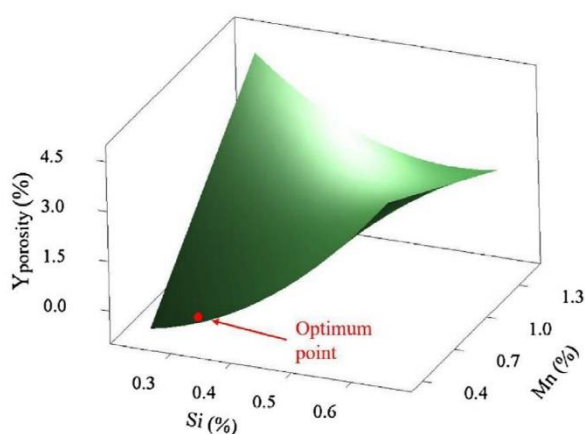
Parametr	Hodnota
Welding process	Fronius TPS5000-CMT
Proud	180 [A]
Rychlost svařování (TS)	60 [cm/min] = 10.00 [mm/sec]
Výlet drátu	15 [mm]
Úhel tlačení	10°

Pracovní úhel	50°
Základní materiál / Tloušťka	GA 590 FB / 2,0 [mm]
Zinková vrstva	140 [g/m ²]
Ochranný plyn / průtok	90% Ar + 10 % CO ₂ / 20 [l/min]
Svařovací pozice	PB (Přeplátovaný svar, vodorovné základní materiály)
Přídavný materiál / průměr	Proměnná / Ø1.2 [mm]

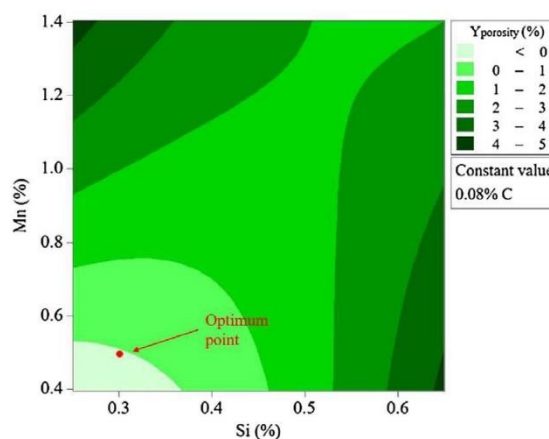
Póry byly změřeny a přepočteny na procentuální podíl celkové plochy svarového kovu. Pro práci s daty byl použit statistický nástroj RSM (od angl. response surface methodology), který dokáže posuzovat vztahy optimálních hodnot mezi několika vstupními proměnnými poměrně nenáročným a rychlým způsobem [7].

Na základě provedené analýzy bylo zjištěno, že interakce Si a Mn má největší vliv na tvoření porozity ve svarech. S menším obsahem Si a Mn se snižuje viskozita svarové lázně a výpary zinku pak mají více času uniknout z taveniny. Podíl uhlíku sotva ovlivňuje průběh emisí Zn, avšak působí na tvrdost svařovaných spojů. Zajímavým poznatkem také je, že odpor MCW drátu se snižuje, pokud je v něm snižován obsah Mn. Vliv přísad C a Si vůči odporu je zanedbatelný.

Optimální chemické složení slitiny pro výrobu MCW drátu je tehdy 0,08 hm.% C, 0,03 hm.% Si a 0,51 hm.% Mn. Ve svém optimálním bodě bylo dosaženo 0% podílu porozity. Kompletní záznam výsledných hodnot lze vidět na *Obr. 8* a *Obr. 9*. Frekvence emisních výparů zinku ze svarového kovu byla vypočtena na 21 Hz.

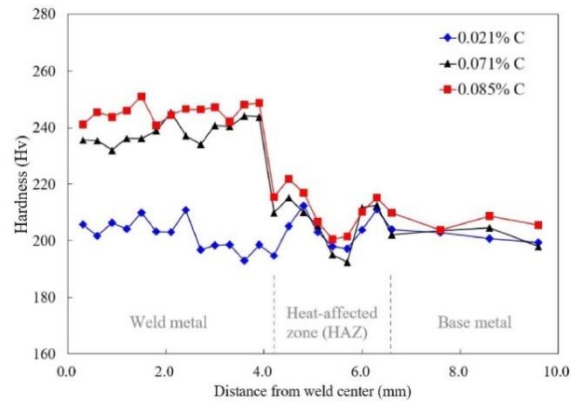


Obr. 8 3D zobrazení vlivu Si a Mn na množství porozity



Obr. 9 2D zobrazení vlivu Si a Mn na množství porozity

Co se týče mechanických vlastností spoje, bylo zjištěno, že tvrdost svarového kovu o vyšším obsahu uhlíku výrazně převyšuje hodnoty tvrdosti základního kovu. U všech spojů je ale oslabená TOO. Naměřené hodnoty tvrdosti v ní jsou o něco menší než tvrdost základního materiálu (viz *Obr. 10*). Vyvinutý svařovací drát dostal označení E70T15-M20AZ-G.



Obr. 10 Tvrdost svarového spoje optimálního chemického složení MCW v závislosti na množství C

1.8 Ochranná atmosféra a vliv jejího složení na porozitu způsobenou zinkovou vrstvou

Oxid uhličitý. CO₂ je aktivní plyn. 100% složení ochranné atmosféry z CO₂ je široce používané při svařování oceli. Umožňuje svařování při velkých rychlostech, poskytuje větší hodnoty průvaru, dobré mechanické vlastnosti spoje a menší provozní náklady než svařování v inertní ochranné atmosféře. Hlavní nevýhodou používání čistého CO₂ je horší stabilita hoření oblouku a zvýšený svařovací rozstřík. Rozstřík lze však redukovat pomocí zkrácení délky hoření oblouku, což způsobí jeho rovnoměrnější rozložení anebo přidávkou dalších prvků do směsi plynu [11].

Argon. Inertní plyn, který nereaguje s roztaveným kovem. Argon má větší hustotu než vzduch, tím pádem při svařování v pozicích PA a PB dokonale vytlačuje vzduch od roztavené lázně a chrání lázeň před účinky vzduchu. Argon se poměrně jednoduše ionizuje a díky tomu dokáže zvětšit délku oblouku při nižším napětí. Ochranná atmosféra složená čistým argonem se používá pro svařování mědi, hliníku, niklu a dalších kovů či jejich slitin, ale zřídka u slitin železa. 100% ochranný plyn složený z argonu vyvolává tzv. katodické čištění oceli. Oxidy železa na povrchu kovu jsou dobrými zdroji elektronů a kvůli nerovnoměrnému rozložení způsobují vychýlení oblouku a ve výsledku nerovnoměrné rozložení svarového kovu na základních materiálech. Tento problém se dá řešit pomocí přidání menšího podílu **oxidu uhličitého** do složení ochranného plynu např. 90 % Ar + 10 % CO₂.

Kyslík. Reakcí kyslíku je vytvoření rovnoměrného filmu oxidů svarové lázně a tím stabilnější hoření oblouku. Tento objev umožnil svařovat slitiny železa a rozšířit oblast použití GMAW technologie. Obecně 2% přídavek O₂ je dostačující pro svařování uhlíkových a mikrolegovaných slitin železa, ale může se lišit v závislosti na slitině. Kyslík se nejčastěji používá při svařování ve směsi s argonem a oxidem uhličitým.

Helium je inertní plyn, který pro svoji ionizaci vyžaduje větší napětí, čímž je způsobena vyšší teplota hoření oblouku. Základní materiál pak dostává větší svařovací příkon. Helium stejně jako O₂ se přidává v menších poměrech a bez ohledu na poměr zachovává své pozitivní účinky na svařování.

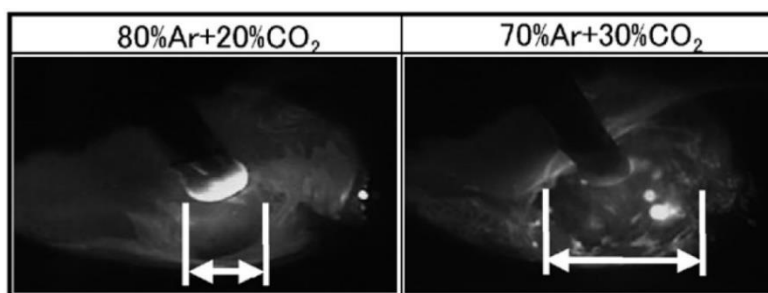
Článek *New welding process, "J-Solution™ Zn"* [13] se detailně zabývá problematikou optimálního svařování pozinkovaných základních materiálů. Autoři nabízí celkově zajímavá řešení v oblasti polohy základních materiálů během svařování, návrhu optimálního

chemického složení drátu a vhodné směsi plynů ochranné atmosféry. Postupně je řešen parametr po parametru a na konci studie je dokonce navržen vlastní tvar vlny pulzního svařování pojmenovaný „Metoda J-Solution Zn“. Výsledky celého článku jsou kompletně založené na experimentálně získaných hodnotách. Pro účely této kapitoly bude probrán jenom výsledek studie vlivu dvou směsí plynů 70% Ar + 30% CO₂ a 80% Ar + 20% CO₂. Detailní svařovací podmínky lze najít v *Tab. 4*.

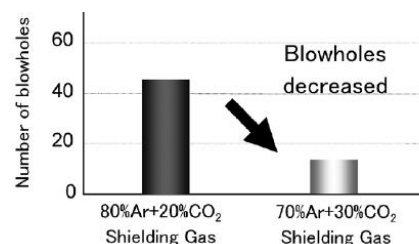
Tab. 4 Svařovací parametry použité ve studii vlivu dvou ochranných atmosfér na porozitu svarových spojů

Parametr	Hodnota
Svařovací proces	GMAW-P
Rychlost svařování (TS)	100 [cm/min] = 16,66 [mm/sec]
Rychlost podávání drátu	7,3 [m/min] = 121,66 [mm/sec]
Základní materiál / Tloušťka	Ocel (nespecifikováno) / 2,3 [mm]
Výlet drátu	15 [mm]
Zinková vrstva	45 [g/m ²]
Přídavný materiál / průměr	JIS Z 3312 YGW15 / Ø1,2 [mm]
Svařovací pozice	PB (Přeplátovaný svar, vodorovné základní materiály)
Ochranný plyn / průtok	Proměnná [l/min]

Svařování v ochranné atmosféře obou směsí bylo zdokumentováno vysokorychlostní kamerou a z pořízených záznamů je patrné, že větší podíl CO₂ ve směsi vytváří větší průměr kráteru v roztavené lázni (Viz *Obr. 11*). Výsledkem toho je redukce porosity o 75% vůči ochranné směsi plynů 80% Ar + 20% CO₂ (Viz *Obr. 12*) Nevýhodou ochranné atmosféry 70% Ar + 30% CO₂ bylo uvedeno zvýšené množství svařovacího rozstříku, které nebylo nijak jinak definováno než „extrémní“.



Obr. 11 Závislost mezi složením ochranné atmosféry a velikostí kráteru v roztavené lázni



Obr. 12 Počet poréznych defektů ve svaru dlouhém 200 mm, v závislosti na ochranné atmosféře

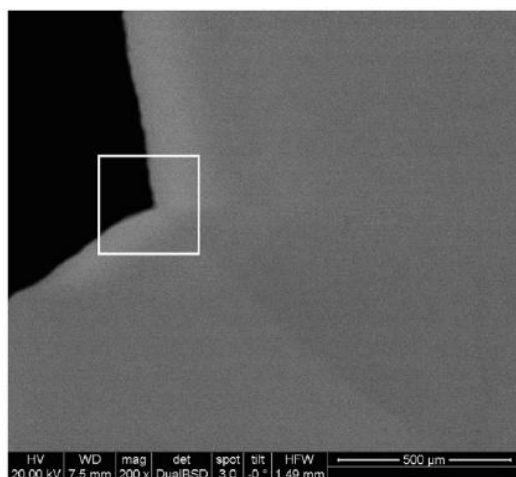
Přidáním helia do směsi ochranné atmosféry a jeho vlivu na vlastnosti svarových spojů pozinkovaných základních materiálů se zabýval P. Shreyas. Ve spolupráci s dalšími kolegy byla vypracována studie mechanických vlastností bezdefektních svarových spojů pozinkovaných základních materiálů ve dvou různých ochranných atmosférách (98%Ar + 2%O₂ a 96%Ar + 2%He + 2%O₂) za účelem jejich porovnání se svarovými spoji stejných

základních materiálů bez povrchové úpravy. Svařovací podmínky a další specifika pro vytvoření svarových spojů jsou uvedena v *Tab. 5* [8].

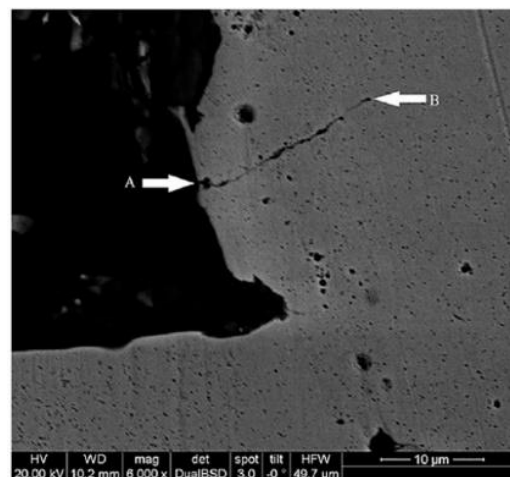
Tab. 5 Specifikace svarových spojů pro studium vlivů přítomnosti zinkové vrstvy na jejich vlastnosti

Vzorek	Ocel, tloušťka 2,5 [mm]	Ochranná atmosféra, průtok 20 [l/min]	Stav povrchové úpravy Ø [µm]	Tepelný příkon [J/mm]
1	316L	98% Ar + 2% O ₂	8,1	720,0
3	316L	98% Ar + 2% O ₂	0,0	720,0
5	316L	96% Ar + 2% He + 2% O ₂	8,1	672,7
7	316L	96% Ar + 2% He + 2% O ₂	0,0	672,7

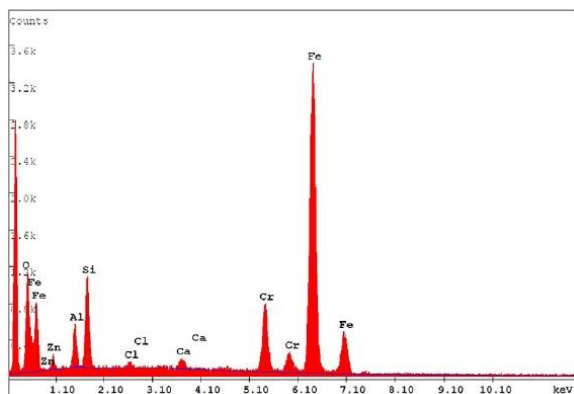
Vzorky byly podrobeny snímání SEM. U vzorku č. 1 v blízkosti hrany svarového kovu byla nalezena 20 µm dlouhá trhlina (viz. *Obr. 13* a *Obr. 14*). V místě iniciace trhliny byla nalezena v menším podílu přítomnost Zn a další větší podíl přísad Al, Cr, Si, Ca a O₂ (Viz. *Obr. 15*). V konci trhliny je materiál složen z přísad Mn a Cr (Viz. *Obr. 16*).



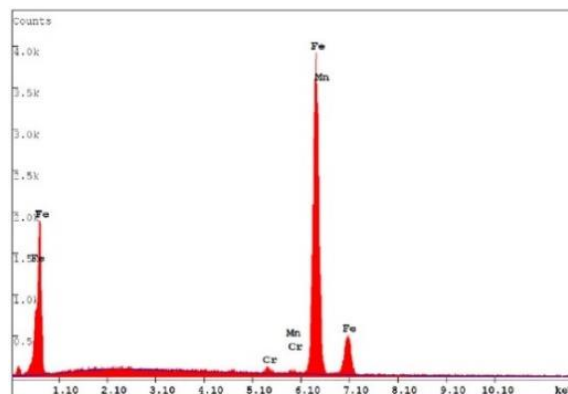
Obr. 13 SEM mikrosnímek vzorku č. 1 místo nalezené trhliny



Obr. 14 SEM mikrosnímek vzorku č. 1 trhlina

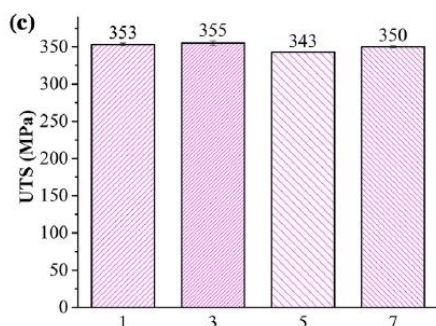


Obr. 15 EDX bodu iniciace trhliny

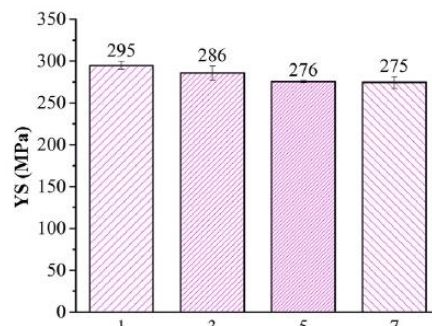


Obr. 16 EDX bodu konce trhliny

Následně byly vzorky podrobeny zkoušce tahem. Díky tomu byly zjištěny hodnoty, meze kluzu *Obr. 18* a pevnosti *Obr. 17*. Závěrem je, že výsledné hodnoty byly stejné napříč vzorky nezávisle na daném druhu povrchové úpravy, tudíž přidání He do ochranné atmosféry nemá jednoznačný výsledek na pevnostní charakteristiku svarových spojů.



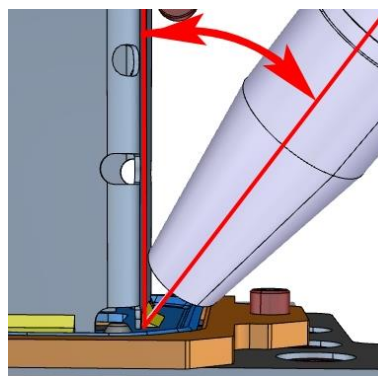
Obr. 17 Závislost meze pevnosti na druhu vzorku



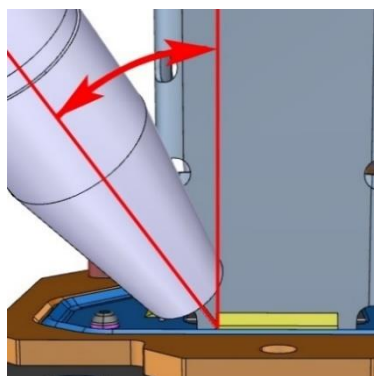
Obr. 18 Závislost meze kluzu na druhu vzorku

1.9 Svařovací úhly a jejich vliv na porozitu způsobenou zinkovou vrstvou

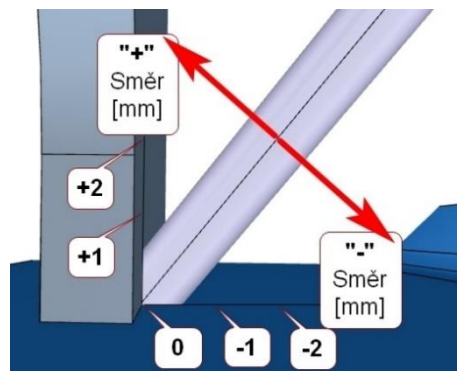
Pracovní a postupový úhly jsou takové úhly, kterými lze popsat pozici hořáku vůči svařenci. Pojmy jsou vysvětleny na *Obr. 19* a *Obr. 20*. Změnou postupového úhlu hořáku se mění úhel tlačení / tažení oblouku ve směru svařování, a tím se mění vektor penetrace hořícího oblouku v roztavené lázni. Malé úhly postupového úhlu hořáku se nastavují zejména při svařování tenkých plechů za účelem eliminace rizika jejich propálení. Nastavování pracovního úhlu hořáku může přicházet v úvahu při svařování plechů rozličných tloušťek. Směřováním oblouku do tlustšího plechu lze docílit rozličného poměru pohlcené energie oběma plechy, a tím snížit riziko propálení tenčího.



Obr. 19 Ukázka pracovního úhlu hořáku



Obr. 20 Ukázka postupového úhlu hořáku



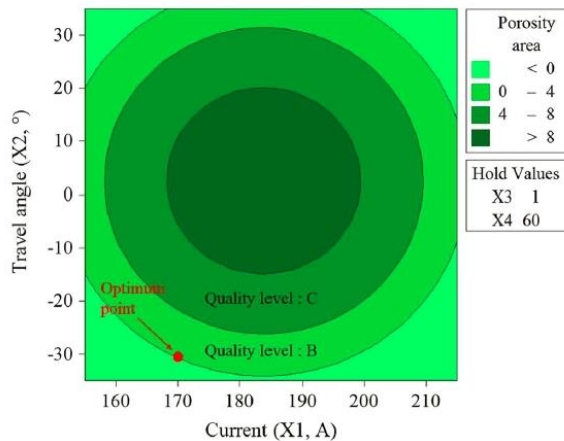
Obr. 21 Ukázka pozičního umístění drátu vůči základním materiálům

V návaznosti na kapitulu 1.3 této kvalifikační práce, kde byla výzkumným pracovníkem Jiyoung Yu vypracována studie vlivu přísad C, Mn a Si v tavicím se drátu na množství porozity ve svarovém kovu, byla vypracována alternativní studie vlivu svařovacích úhlu na stejnou problematiku. Studie se zabývá hledáním 4 proměnných. Jejich optimálním nastavením se lze zbavit výskytu porozity ve svarových spojích. Hledanými proměnnými jsou: svařovací proud, pozice drátu vůči základním materiálům (viz. *Obr. 21*), pracovní a postupový úhly hořáku. Ostatní konstantní parametry použité pro vypracování vzorků jsou uvedené v *Tab. 6* [12].

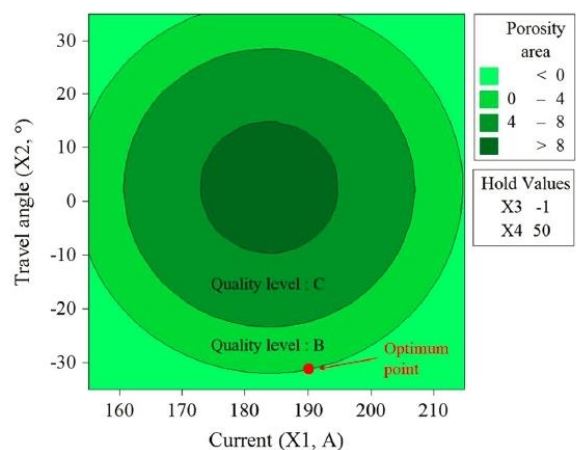
Tab. 6 Svařovací parametry použité ve studii vlivu úhlu hořáku na porozitu svarových spojů

Parametr	Hodnota
Svařovací proces	Fronius TPS5000-CMT
Rychlost svařování (TS)	60 [cm/min] = 10.00 [mm/sec]
Výlet drátu	15 [mm]
1. Základní materiál / Tloušťka	SGAPH 440 / 2,0 [mm]
2. Základní materiál / Tloušťka	SGAPH 590 / 2,3 [mm]
Zinková vrstva	140 [g/m ²]
Přídavný materiál / průměr	AWS ER70S-3 / Ø1,2 [mm]
Ochranný plyn / průtok	90% Ar + 10 % CO ₂ / 20 [l/min]
Svařovací pozice	PB (Přeplátovaný spoj, svislé základní materiály)
Mezera mezi plechy	0 [mm]
Proud	Proměnná
Pracovní úhel	Proměnná
Postupový úhel	Proměnná

Výsledkem celé studie je poznatek, že nastavením postupového úhlu hořáku lze docílit bezporézních svarových spojů a řešenou závislost formulovat matematickými křivkami. Z grafů představených na obr. *Obr. 22* a *Obr. 23* lze vyčíslit, jaký přesně musí být postupový úhel hořáku a svařovací proud pro podíl porozity ve svarech od 0 do >8% při dvou konkrétních postupových úhlech hořáku a pozic drátu vůči základním materiálům.



Obr. 22 Podíl množství porozity v závislosti na postupovém hořáku a proudu při pracovním úhlu hořáku 60° a pozici drátu +1 mm

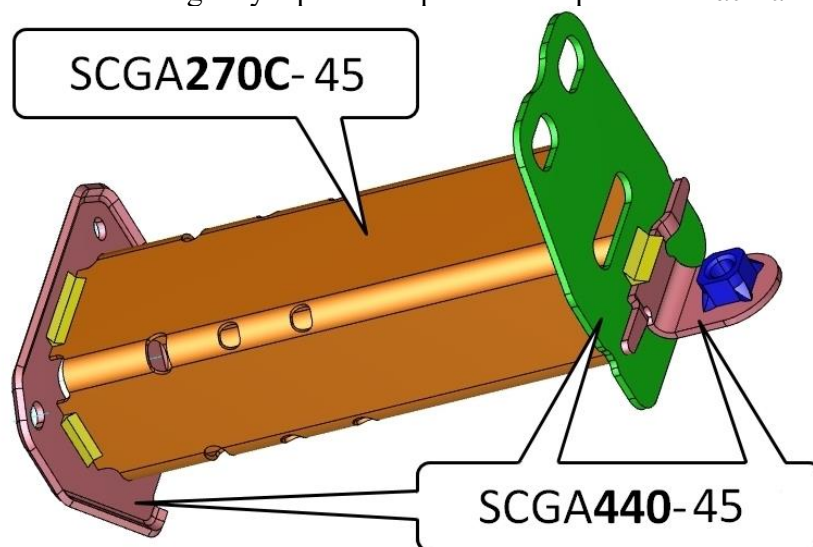


Obr. 23 Podíl množství porozity v závislosti na postupovém úhlu hořáku a proudu při pracovním úhlu hořáku 50° a pozici drátu -1 mm

2 Základní materiál a jeho specifikace

S ohledem na množství okolních parametrů ovlivňujících GMAW svařování a na studie uvedené v teoretické části kvalifikační práce je zřejmé, že negativní následky svařování pozinkovaných ocelí lze redukovat úpravou určitých vstupních charakteristik.

Optimalizace svařovacího procesu byla prováděna na dílu zobrazeném na *Obr. 24*. Ve své podstatě není samotný výrobek nijak zatížen statickými silami a slouží jako absorpční těleso dynamických nárazů v rámci automobilové karoserie lehkého osobního automobilu. Jedním z účelů svarů je zajistit správný (nárazovým podmínkám nasimulovaný) deformační průběh, aby značná část nárazové energie byla pohlcena právě tímto pasivním záchranným prvkem.



Obr. 24 Ukázka svařence řešeného v této kvalifikační práci

Díl se skládá ze čtyř vstupních komponent a dvou typů materiálů. SCGA zkratkou se rozumí za studena tvářený, pozinkovaný a žíhaný plech (angl. Steel plate Cold rolled Galvanized Annealed). Detailnější charakteristika základního materiálu je uvedena v *Tab. 7*.

Tab. 7 Specifikace základních materiálů [14] [15]

Parametr základního materiálu	SCGA270C	SCGA440
Tloušťka základního materiálu [mm]	1,1	2,0
Minimální mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	270	440
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	170	320
Poměrné prodloužení [%]	42	42
C [hm. %]	0.0600	0.1000
Si [hm. %]	0.2500	0.2500
Mn [hm. %]	0.5000	1.000
P [hm. %]	0.0500	0.0150
S [hm. %]	0.0225	0.0125
Cu [hm. %]	0.0250	-
Nb [hm. %]	0.0450	0.025
Ti [hm. %]	0.1500	-
Fe [hm. %]	98.8975	98.2875
Uhlíkový ekvivalent C_e	0.145	0.267
Parametr povrchové vrstvy	Žarově nanesená vrstva vyžihaná	
Min. množství povlaku [g/m^2]	45	
Tloušťka [μm]	7.6	
Pb [hm. %]	0.005	
Cd [hm. %]	0.0005	
Al [hm. %]	0.5	
Fe [hm. %]	10.5	
Zn [hm. %]	88.9945	

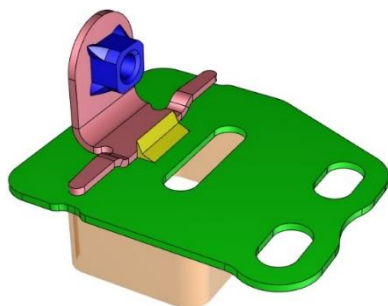
Obsah uhlíku obou základních materiálů nepřevyšuje 0,24 hm. % ani 1,5 hm. % manganu a plechy jsou tenčí než 25 mm. Jedná se o nelegovanou ocel s uhlíkovým ekvivalentem dle rovnice (0). Podle hodnot chemického složení uvedeného v Tab. 7 pro svařování daných základních materiálů nejsou potřebná žádná zvláštní opatření, neboť $C_e \leq 0,45$ hm. %.

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (0)$$

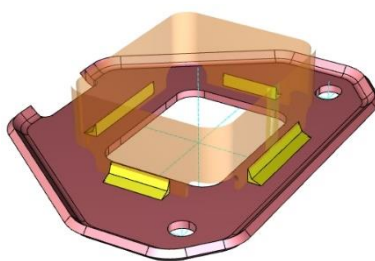
2.1 Rozdělení svarů

Všech devět svarů (metoda svařování GMAW) lze vzhledem k identickým podmínkám svařování (tloušťka plechů, svařovací pozice, druh spoje atd.) rozdělit do dvou hlavních skupin, na kterých byl prováděn experiment:

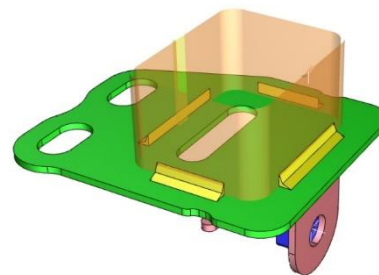
- **Přeplátovaný spoj** (viz. *Obr. 25*), jediný na celém výrobku, je specifický identičností obou základních materiálů. Jedná se o svařování dvou plechů stejného základního materiálu SCGA440 o stejné tloušťce obou plechů 2 mm. Při svařování jsou plechy umístěné ve vodorovné poloze. Nominální délka svaru je rovna 17,2 mm.
- **Koutové spoje** (viz. *Obr. 26* a *Obr. 27*) spojují nosnou trubku SCGA270C-45 o tloušťce stěny 1,1 mm se dvěma SCGA440-45 plechy o tloušťce 2 mm. Při svařování jsou 2mm plechy umístěné ve vodorovné poloze s nosnou trubkou umístěnou vertikálně. Nominální délky svaru jsou 2×15 mm, 2×20mm, 2×25 mm, 2×30 mm.



Obr. 25 Druhá svařovací pozice, přeplátovaný spoj



Obr. 26 Druhá svařovací pozice, identické koutové spoje



Obr. 27 První svařovací pozice, koutové spoje

Jistým zjednodušením pro vytvoření vzorků druhé skupiny je simulace svařovacích podmínek pouze jednoho svarového spoje z osmi. Jediný rozdíl mezi svary druhé skupiny je odlišná délka svarů, což je zanedbatelné vzhledem ke stejnému množství vnesené energie na délkovou jednotku svaru. Vyvinuté optimální parametry jednoho svaru po dokončení experimentu bude tedy možné aplikovat na zbytek.

2.2 Povrchová úprava

Stupeň legování pozinkové vrstvy na zkoumaném materiálu podle normy TSG3109G musí být v rozsahu koncentrace železa 7 až 15 % v železo-zinkové slitině, což převážně odpovídá fázi δ - (FeZn7). Fáze delta je intermetalická fáze, krystalizující v hexagonální mřížce s obsahem železa 7 — 11,5 %, teplota tavení je v intervalu teplot 530 — 672 °C; tato fáze je podstatně silnější než fáze γ a je tvořena tvrdými sloupkovými krystaly kolnými k povrchu. Minimální množství pozinkové vrstvy je určeno 45 g/m². Zároveň průměrná velikost měřené vrstvy nesmí být vyšší než 65 g/m².

Je důležité také zmínit (patrně z *Tab. 7*), že všechny základní materiály disponují identickou zinkovou vrstvou v angličtině nazývané „galvannealed“. Jedná se o relativně nový postup pozinkování. Komponenty se nejprve pozinkují žárově v roztavené zinkové tavenině. Pro odstranění nadbytečného množství zinku, prochází polotovary systémem dmýchajících pneumatických trysek. Následně polotovar postupuje do žíhací pece za účelem urychlení difúze povrchové vrstvy zinku s železem, výsledkem které je vytvoření vícesložkového povlaku intermetalických fází železa a zinku. Výhodou takto vyrobených povlaků jsou jak

lepší svařitelnost (v porovnání s galvanicky vytvořenými povlaky) tak i lepší adhezni vlastností barvicích povlaků.

3 Normou definované jakostní požadavky spojů

Kompletní jakostní požadavky na svařování jsou určeny technickou normou TSH5603G. Norma se vztahuje na obloukové svařování celé řady základních materiálů, zejména slitin používaných v automobilovém odvětví.

Svarové spoje musí vyhovět nejnižší jakostní kategorii „C“, kterou zákaznická norma uvádí, v devíti zmíněných klasifikacích geometrických vad. Vyhodnocení kvality svarových spojů je založeno na požadavcích detailně rozebraných v *Tab. 8*. Ve většině bodů se jedná o destruktivní zkoušení svarových spojů, kdy je svarem proveden řez a pomocí software obrazové analýzy jsou zkoumány potřebné geometrické rozměry svarových spojů za účelem zhodnocení vlivu proměnných svařovacích parametrů na kvalitu spojů.

Tab. 8 Předepsané jakostní požadavky svarových spojů [14, 16, 17]

Označení, druh a popis vady dle ČSN EN ISO 6520	Povolený rozsah vady pro jakostní kategorii D dle normy ČSN EN ISO 5817	Povolený rozsah vady pro jakostní kategorii C dle normy TSH5603G
402, Neprůvar (nedostatečný průvar) – rozdíl mezi skutečným a předepsaným průvarem.	Minimální přípustná hodnota průvaru se velikostně rovna 20% jmenovité velikosti svaru. Délka vady nesmí překročit 2 mm.	Délka odvěsny nesmí být kratší než 80 % tloušťky tenčího materiálu, a to v hloubce 0,1 mm od povrchu základního materiálu.
5213, Podkročení velikosti koutového svaru – skutečna tloušťka koutového svaru je příliš malá.	Maximální přípustná hodnota podkročení se velikostně rovna 10% jmenovité velikosti svaru plus 0,2 mm	Jmenovitá velikost svaru nesmí být menší než 70% tloušťky tenčího materiálu.
501, Zápal – nepravidelný vrub na přechodu svarové housenky do základního materiálu	Maximální přípustná hloubka zápalu je rovná 20 % tloušťky plechu	Délka zápalu, jehož hloubka se v maximálním případě rovná 20 % tloušťky tenčího materiálu, nesmí překročit 30 % délky svaru.
2017, Povrchový pór – pór, který vystupuje na povrch svaru	Maximální rozměr jednotlivého póru nesmí velikostně překročit 30%	Počet póru o velikosti 1 mm a více, však méně než 2 mm, nesmí být větší než 1 na 5 mm délky svaru.

velikosti jmenovité
velikosti svaru.

510, Díra – propadnutí tavné lázně způsobující průchozí otvor ve svaru	Nepřípustná vada	Pro svarové spoje kratší než 30 mm není povolena přítomnost propalů o velikosti 2 mm a větší. Pro svarové spoje delší než 30 mm je povolena přítomnost jedné díry o velikosti 2 mm, avšak ne větší než 5 mm
513, Nepravidelná šířka – nadměrná proměnlivost šířky svaru	-	Délka svaru o šířce menší než 120% tenčího základního materiálu nesmí překročit 30 % délky svaru.
617, Špatné sestavení – nadměrně velká nebo nedostatečná mezera mezi svařovanými díly	Maximální hodnota mezery mezi spojovanými částmi se velikostně rovna 10% jmenovité velikosti svaru plus 0,5 mm	Maximální hodnota mezery mezi spojovanými částmi je rovná průměru přídavného materiálu. Pro řešenou problematiku nesmí být překročena hodnota 1 mm.

Při vyhodnocení jakosti jednotlivých svarů jsou použity software NIS-Elements. Jednotlivé výsledky měření poslouží jako osnova pro aproximaci matematických zákonitostí chování jednotlivě zadávaných svařovacích parametrů. Kompletní výsledky měření budou představeny v dalších kapitolách.

4 Volba vstupních svařovacích parametrů

4.1 Konstantní svařovací parametry

Podrobná specifikace vstupních GMAW parametrů, při jakých se budou provádět zkoušky svařování, je uvedena v *Tab. 9*, která definuje konstantní hodnoty vybraných svařovacích parametrů. Ty budou po celou dobu provádění zkoušek zachovány. Zaručit opakovatelnost pomůže robotické svařování. Výsledkem takových omezení je detailní a maximálně přesné zaměření na zkoumané proměnné parametry, kterými budou: rychlost svařování – dále TS (angl. Travel Speed), rychlost podávání drátu – dále WFS (angl. Wire Feed Speed) a pozice drátu vůči základním materiálům – dále WTP (angl. Wire Target Point).

Tab. 9 Specifikace vstupujících parametrů GMAW

Parametr	Hodnota
Welding process	Lincoln Electric, GMAW-P, Rapid Arc®
Přídavný materiál / průměr	ESAB G3Si1 / Ø1,0 [mm]
Ochranný plyn / průtok	90% Ar + 10 % CO ₂ / 16 [l/min]
Výlet drátu	15 [mm]
TRIM	1,0
Svařovací pozice	PB
Pracovní úhel hořáku	45°
Postupový úhel hořáku	30°
Rychlost svařování (TS)	Proměnná [mm/sec]
Rychlost podávání drátu (WFS)	Proměnná [mm/sec]
Pozice drátu (WTP)	Proměnná [mm]

V podkapitolách níže je probrán pohled a důvody zvolení konkrétních hodnot svařovacích parametrů pro provedení zkoušek.

4.1.1 Svařovací zdroj a mód

Zkoušky byly prováděny pomocí svařovací procedury RapidArc®. V porovnání s tradičními pulzními módy, se RapidArc prezentuje jako propracovaný pulzní proces s důrazem na větší svařovací rychlosti, které jsou u automobilek často zásadní. RapidArc stabilizuje oblouk pomocí zásahu do svařovacího napětí. Výsledkem je tak řízený krátký oblouk, který lépe vyhovuje větším svařovacím rychlostem. Plusem použitého módu není jenom větší svařovací rychlost, ale i nižší náchylnost k zápalům základního materiálu.

4.1.2 Přídavný materiál

Jako přídavný materiál byl zvolen drát OK Aristorod 12,50 Ø 1 mm. Jedná se o plný drát detailněji specifikovaným normou EN ISO 14341-A: G3Si1. Chemické složení drátu a některé mechanické vlastnosti jsou uvedeny v *Tab. 10*.

Tab. 10 Charakteristika zvoleného přídavného materiálu

Přídavný materiál	Mn hm. %	C hm. %	Si hm. %	R _m MPa	R _e MPa	A %
OK Aristorod 12,50	1,46	0,08	0,85	560*	470*	26*

* Hodnoty jsou specifické pro svařování v ochranném plynu EN 80Ar/20CO₂ (M21) [18]

4.1.3 Ochranný plyn

Použitý ochranný plyn je 90% Ar + 10 % CO₂ s průtokem 16 l/min.

4.1.4 Výlet drátu

Vzdálenost konce svařovací špičky od místa dotyku drátu se základním materiálem je nastavena na 15 mm na základě doporučení výrobce svařovacích zdrojů a zkušeností.

4.1.5 Svařovací pozice a úhel hořáku

Z důvodu konstrukce svařovacího přípravku je pracovní úhel hořáku 45°. Postupový úhel na základě studie provedené v teoretické části diplomové práce byl přizpůsoben na tlačení 30°. Dané nastavení zajistí menší porozitu svarových spojů, ale na úkor rozstříku.

4.2 Proměnné svařovací parametry

4.2.1 Rychlost svařování

Rychlost svařování dále TS (angl. Travel speed) je definována rychlostí pohybu oblouku vůči základním materiálům a vyjadřuje se v uražené vzdálenosti za časovou jednotku. Díky robotickému svařování zaručujícímu přesnost dodržení nastavené hodnoty rychlosti svařování, se na vzorcích dá zkoumat vliv tohoto parametru na kvalitu svarového spoje. Běžnou rychlostí svařování tenkých pozinkovaných základních materiálů podle zdrojů uvedených v teoretické části této diplomové práce je 10 až 13 mm/sec. Nebyla však nalezena žádná studie zabývající se hledáním optimálního rozsahu WFS při větších i menších TS.

4.2.2 Rychlost podávání drátu

Při svařování pozinkovaných základních materiálů znamená vyšší hodnota WFS nejenom větší průvar a širší housenku, ale i delší čas tuhnutí lázně, díky čemuž stíhá plynný zinek opustit svarovou lázeň a nezůstat v jeho objemu. Problematika se stává závažnější v případě GMAW svařování pozinkovaných a zároveň tenkých (do 1,2 mm) plechů. Výsledkem hledání optimálního rozsahu WFS je pak zjištění, že se rozsah vady *studený spoj* se překrývá s vadou *propal*. WFS parametr ještě stále není tak vysoký, aby beze stopy nechal vypařit 15 μm tlustou vrstvu zinkového povlaku, ale už dostatečně vysoký na to, aby zcela protavil stěnu základního materiálu.

Vlastností procedury RapidArc je nemožnost přímého zadávání hodnoty elektrického proudu. Jeho hodnota se odvozuje ze zadávané WFS hodnoty pomocí v zařízení přednastavené parametrické rovnice. Autentická parametrická rovnice (1) byla zjištěna pomocí aproximace matematické křivky vybudované na skutečných měřených hodnotách. Jedná se o polynom druhého stupně s koeficientem determinace $R^2=0,9976$ (viz. *Obr. 28*). Zprůměrované množství svařovacího proudu uvolněného při svařování tak může být přesně dopočteno z nastavované WFS hodnoty, například pro použití konkrétních a univerzálních parametrů na jiných svařovacích zdrojích.

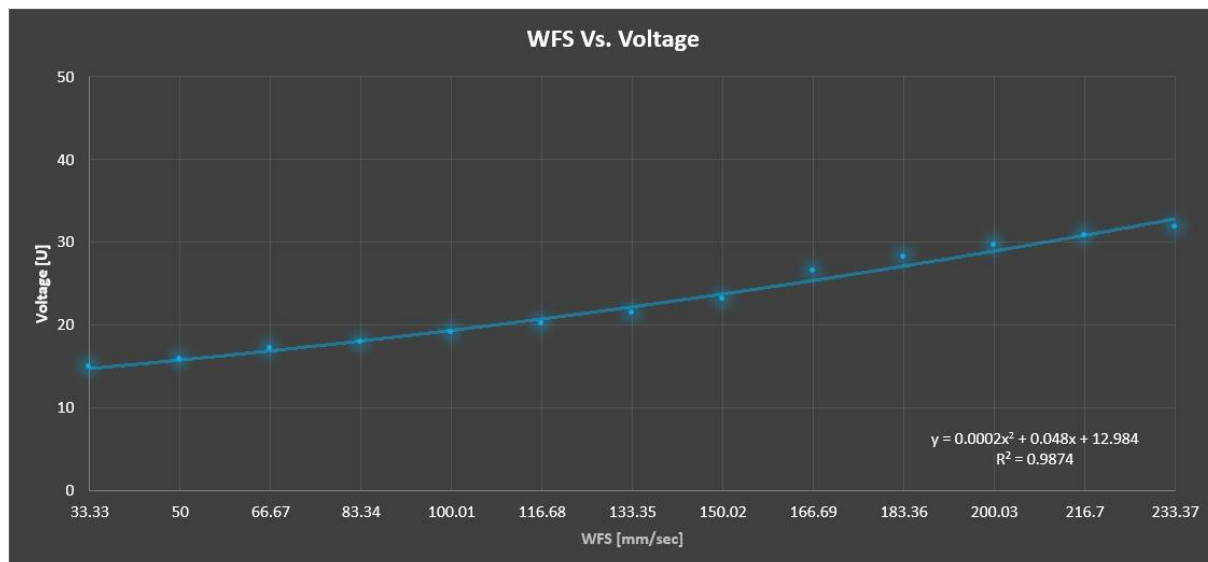
$$I = -0,002 \times WFS^2 + 1,7656 \times WFS - 3,8981 \quad (1)$$



Obr. 28 Závislost WFS – elektrický proud (RapidArc, 90%Ar 10%CO₂, výlet drátu 15 mm)

Obdobně pak funguje i nastavení svařovacího napětí. Hodnota elektrického napětí se taktéž odvozuje ze zadávané WFS hodnoty pomocí v zařízení přednastavené parametrické rovnice. Kromě toho, že generované elektrické napětí je závislé na hodnotě WFS, elektrické napětí se dá korigovat pomocí proměnné zvané TRIM. Jedná se o násobící koeficient s možností zadání hodnoty v rozsahu 0,5 až 1,5. Během provedení experimentu byl koeficient TRIM nastaven na konstantní hodnotu 1,0. Parametrická rovnice byla vytvořena i pro tento případ (2). Jedná se o polynom druhého stupně s koeficientem determinace $R^2=0,9874$ (viz Obr. 29). Zprůměrované množství elektrického napětí uvolněného při svařování taktéž může být přesně dopočteno z nastavované WFS hodnoty.

$$U = TRIM \times (0,0002 \times WFS^2 + 0,048 \times WFS + 12,984) \quad (2)$$



Obr. 29 Závislost WFS – elektrické napětí pro TRIM 1.0 (RapidArc, 90%Ar 10%CO₂, výlet drátu 15 mm)

4.2.3 Pozice drátu

Pro svařovací technologii je nezbytně nutné být informován o stavu rozměrové stability vstupujících základních materiálů. Pak bude možné přizpůsobit svařovací proces této

podmínce. Rozměrová odchylka může být zásadní kořenovou příčinou nestability celého procesu, která často zůstane nepovšimnuta.

Problematika variability vstupních komponent v místě svarů se dá zlepšit nejenom optimalizováním svařovacích parametrů, ale i vhodným návrhem svařovacích přípravků. Mělo by se ale počítat s tím, že rozměrová odchylka dílů se po svaření projeví v místech nejvzdálenějších od svarů.

5 Vyhodnocení parametrických rovnic

Díky provedeným vyhodnocením svarů podle normy TSH5603G byl získán detailní přehled vlivů proměnných parametrů WFS, TS a WTP na jakostní stav dvou druhů svarových spojů. Celkové množství vzorků převyšuje 400 měření.

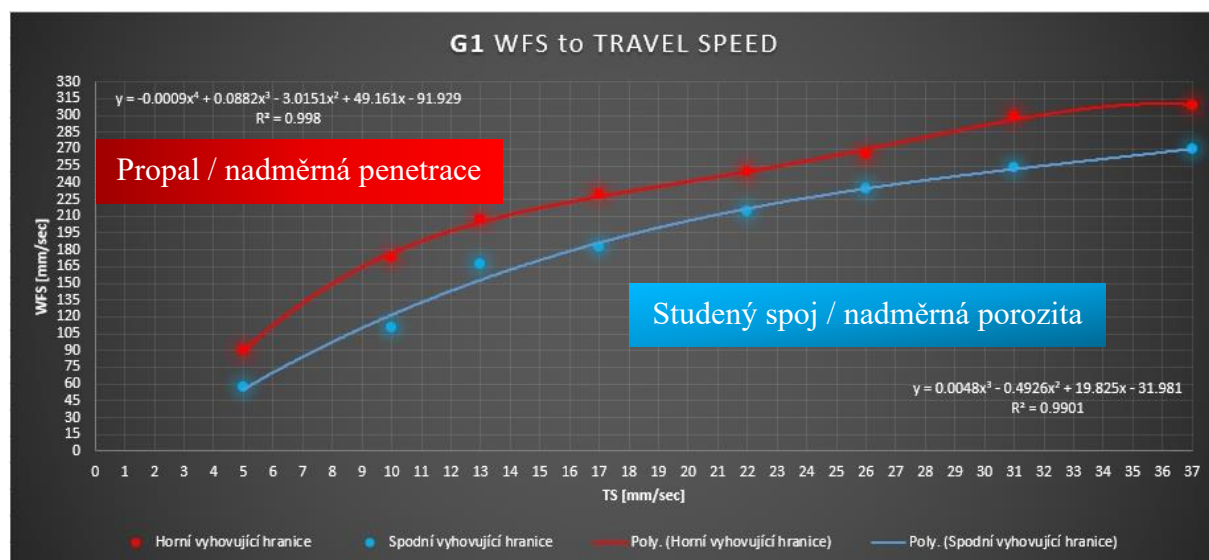
5.1 Přepřátovaný spoj – popis a výsledky měření

U přepřátovaného spoje byly vyvinuty dva grafy. V prvním je povolený rozsah WFS v závislosti na TS při dodržení konstantní hodnoty WTP 0,5 mm. V druhém grafu byla vyvinuta závislost WTP na TS při dodržení optimální hodnoty WFS z prvního grafu.

5.1.1 Vývoj závislosti WFS vs. TS

Pro získání přehledu o vyhovujícím rozsahu WFS v závislosti na TS, byl WTP parametr nastaven na konstantní hodnotu 0,5 mm pro svařovací rychlosti: 5, 10, 13, 17, 22, 26, 31 a 37 mm/sec.

Z výsledků laboratorních měření byly získány dvě limitní křivky WFS v závislosti na TS (viz. *Obr. 30*). Červenou křivkou je znázorněn horní vyhovující limit WFS, při jehož překročení následoval vznik vady typu *zápal* či *nadměrná penetrace*. Modrá křivka znázorňuje spodní vyhovující limit WFS, při jehož překročení následoval vznik vad typu *studený spoj* či *nadměrná porozita*.



Obr. 30 Přepřátovaný spoj: závislost vyhovujícího WFS rozsahu na TS (WTP=0.5 mm)

Díky získaným hraničním bodům se daly sestrojít následující parametrické rovnice:

- Horní limit WFS vyjádřený polynomem 4. stupně s koef. determinace $R^2=0,998$:

$$WFS_h = -0,0009 \times TS^4 + 0,0882 \times TS^3 - 3,0151 \times TS^2 + 49,161 \times TS - 91,939 \quad (3)$$

- Spodní limit WFS vyjádřený polynomem 3. stupně s koef. determinace $R^2=0,9901$:

$$WFS_s = 0,0048 \times TS^3 - 0,4926 \times TS^2 + 19,825 \times TS - 31,981 \quad (4)$$

- Optimální WFS vycházející ze středních hodnot rovnic (3) a (4) vyjádřený polynomem 4. stupně s koef. determinace $R^2=0,9957$:

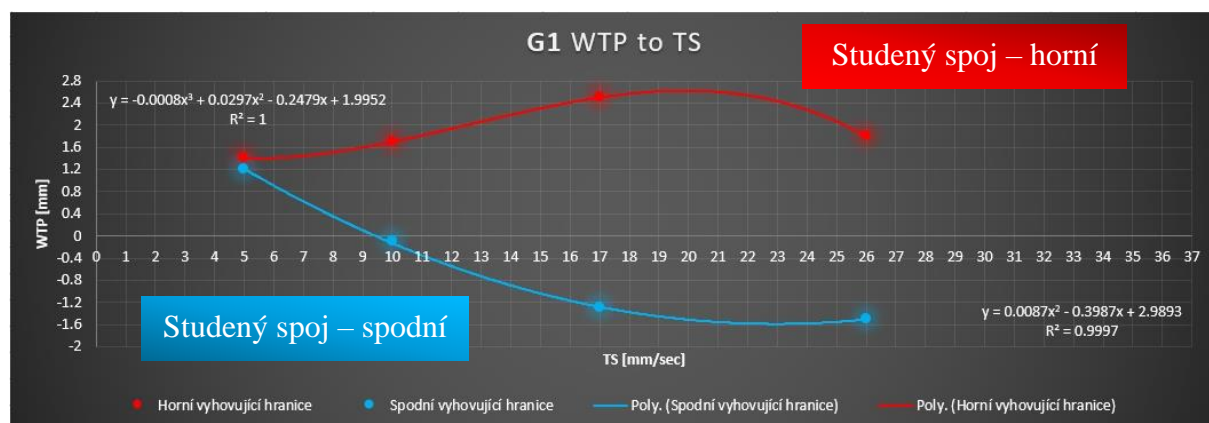
$$WFS_o = -0,0004 \times TS^4 + 0,0445 \times TS^3 - 1,6979 \times TS^2 + 33,896 \times TS - 60,026 \quad (5)$$

Optimální WFS křivka posloužila jako konstanta pro vývoj dalšího grafu představeného v další podkapitole.

5.1.2 Vývoj závislosti WTP vs. TS

Pro získání přehledu o vyhovujícím rozsahu WTP v závislosti na TS, byl WFS parametr nastaven dle optimální parametrické rovnice (5) na konstantní hodnotu pro jednotlivé svařovací rychlosti: 5, 10, 17 a 26 mm/sec.

Na základě výsledků laboratorních měření byly získány dvě limitní křivky WTP v závislosti na TS (viz. Obr. 31). Červená křivka představuje horní vyhovující limit WTP, jehož překročení zapříčinilo vznik vady typu *studený spoj* horního základního materiálu. Modrou křivkou je znázorněn spodní vyhovující limit WTP, při jehož překročení vznikaly taktéž vady typu *studený spoj*, ovšem na spodním základním materiálu.



Obr. 31 Přeplátovaný spoj: závislost vyhovujícího WTP rozsahu na TS (WFS_o dle 5. rovnice)

Díky získaným hraničním bodům mohly být sestrojeny následující parametrické rovnice:

- Horní limit WTP vyjádřený polynomem 3. stupně s koef. determinace $R^2=1$:

$$WTP_h = -0,0008 \times TS^3 + 0,0297 \times TS^2 + 0,2479 \times TS - 1,9952 \quad (6)$$

- Spodní limit WTP vyjádřený polynomem 2. stupně s koef. determinace $R^2=0,9997$:

$$WTP_s = 0,0087 \times TS^2 - 0,3987 \times TS + 2,9893 \quad (7)$$

- Optimální WTP vycházející ze středních hodnot rovnic (6) a (7) vyjádřený polynomem 3. stupně s koef. determinace $R^2=1$:

$$WTP_o = -0,0003 \times TS^3 + 0,0171 \times TS^2 - 0,2952 \times TS + 2,3928 \quad (8)$$

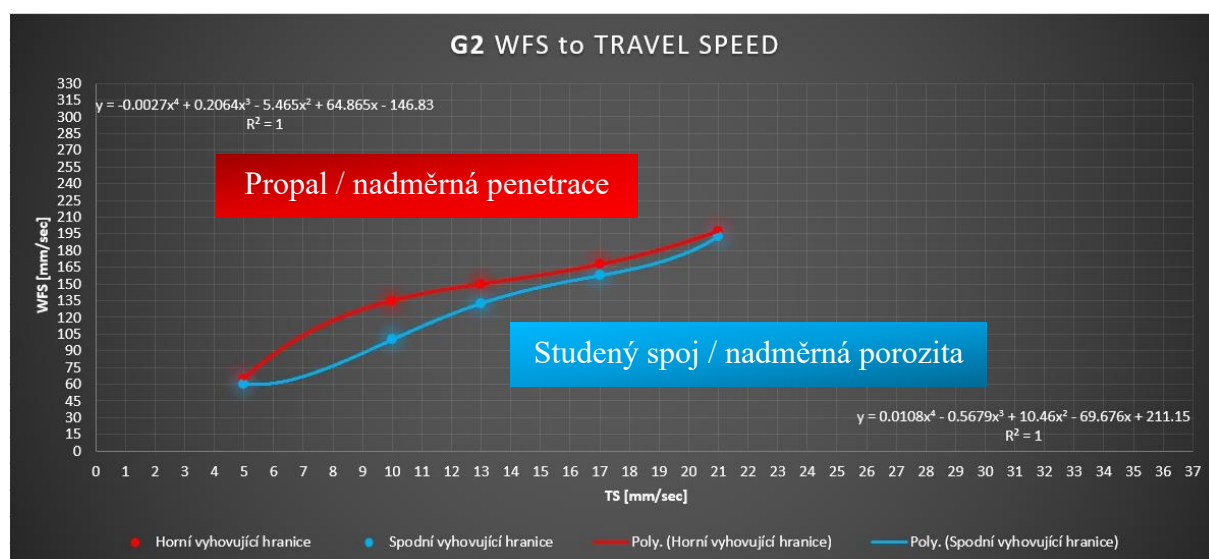
5.2 Koutový spoj – popis a výsledky měření

U koutového spoje byly také vyvinuty dva grafy. V prvním povolený rozsah WFS v závislosti na TS při dodržení konstantní hodnoty WTP 1 mm. V druhém grafu byla vyvinuta závislost WTP na TS při dodržení optimální hodnoty WFS z prvního grafu.

5.2.1 Vývoj závislosti WFS vs. TS

Pro získání přehledu o vyhovujícím rozsahu WFS v závislosti na TS, byl WTP parametr nastaven na konstantní hodnotu 1,0 mm pro svařovací rychlosti: 5, 10, 13, 17 a 21 mm/sec.

Na základě výsledků laboratorních měření byly získány dvě limitní křivky WFS v závislosti na TS (viz. Obr. 32). Červená křivka demonstruje horní vyhovující limit WFS, po jehož překročení vznikaly vady typu *propal* či *nadměrná penetrace*. Modrá křivka představuje spodní vyhovující limit WFS, následovaný vadami typu *studený spoj* či *nadměrná porozita*.



Obr. 32 Koutový spoj: závislost vyhovujícího WFS rozsahu na TS (WTP=1 mm)

Díky získaným hraničním bodům byly sestrojeny následující parametrické rovnice:

- Horní limit WFS vyjádřený polynomem 4. stupně s koef. determinace $R^2=1$:

$$WFS_h = -0,0027 \times TS^4 + 0,2064 \times TS^3 - 5,465 \times TS^2 + 64,865 \times TS - 146,83 \quad (9)$$

- Spodní limit WFS vyjádřený polynomem 4. stupně s koef. determinace $R^2=1$:

$$WFS_s = 0,0108 \times TS^4 - 0,5679 \times TS^3 + 10,46 \times TS^2 - 69,676 \times TS + 211,15 \quad (10)$$

- Optimální WFS vycházející ze středních hodnot rovnic (9) a (10) vyjádřený polynomem 4. stupně s koef. determinace $R^2=1$:

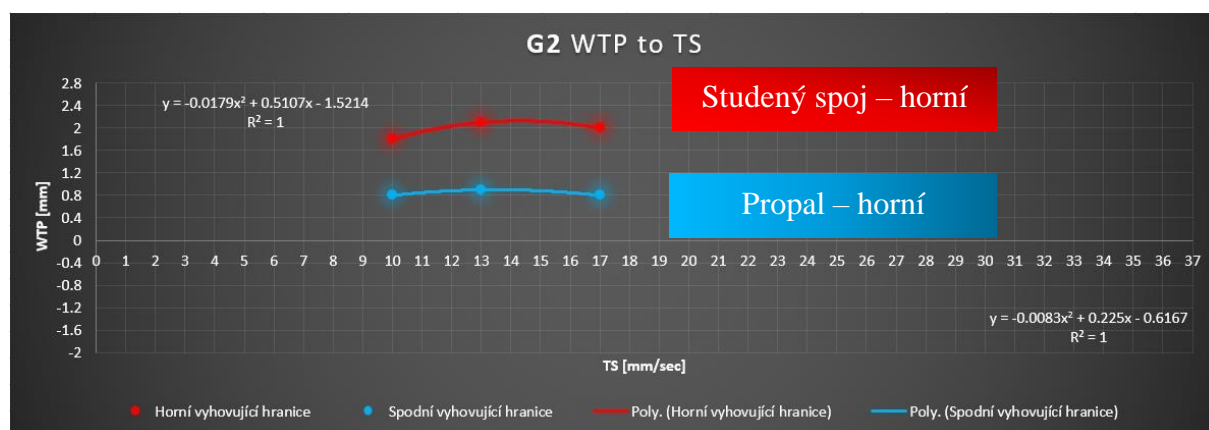
$$WFS_o = 0,004 \times TS^4 - 0,1808 \times TS^3 + 2,4973 \times TS^2 - 2,4053 \times TS + 32,163 \quad (11)$$

Optimální WFS křivka posloužila jako konstanta pro vývoj grafu představeného v další podkapitole.

5.2.2 Vývoj závislosti WTP vs. TS

Pro získání přehledu o vyhovujícím rozsahu WTP v závislosti na TS, byl WFS parametr nastaven dle optimální WFS parametrické rovnice (11) na konstantní hodnotu pro jednotlivé svařovací rychlosti: 10, 13 a 17 mm/sec.

Z laboratorních měření byly získány dvě limitní křivky WFS v závislosti na TS (viz. Obr. 33). Červená křivka znázorňuje horní vyhovující limit WTP, po němž opět následuje *studený spoj* horního základního materiálu. Modrou křivkou je demonstrován spodní vyhovující limit WTP, při jehož překročení dochází k vadám typu *propal* na horním základním materiálu.



Obr. 33 Koutový spoj: závislost vyhovujícího WTP rozsahu na TS (WFS_o)

Opět byly na základě získaných hraničních bodů definovány následující parametrické rovnice:

- Horní limit WTP vyjádřený polynomem 2. stupně s koef. determinace $R^2=1$:

$$WTP_h = -0,0179 \times TS^2 + 0,5107 \times TS - 1,5214 \quad (12)$$

- Spodní limit WTP vyjádřený polynomem 2. stupně s koef. determinace $R^2=1$:

$$WTP_s = -0,0083 \times TS^2 + 0,225 \times TS - 0,6167 \quad (13)$$

- Optimální WTP vycházející ze středních hodnot rovnic (12) a (13) vyjádřený polynomem 2. stupně s koef. determinace $R^2=1$:

$$WTP_o = -0,0131 \times TS^2 + 0,3679 \times TS - 1,069 \quad (14)$$

5.3 Diskuze

Přeplátovaný spoj díky porovnatelně velké tloušťce základních materiálů dokázal pohlit podstatně větší rozsah WFS, než spoj koutový. Tento rozsah se pohybuje v rozmezí 30 až 60 WFS všech zkoumaných svařovacích rychlostí. Zkoušky bylo rozhodnuto neprovádět pro svařovací rychlost vyšší než 37 mm/sec, z důvodu tvoření zápalů na horním základním materiálu a nadměrným hodnotám penetrace spodního základního materiálu. Zajímavým zjištěním je, že při svařovacích rychlostech v rozsahu 19 až 23 mm/sec, disponuje optimální WFS maximálním WTP vyhovujícím normě svařitelným rozsahem cca. ± 2 mm. Po sečtení

všech rozměrových variací ovlivňujících WTP parametr byla zjištěna maximální možná odchylka dílů vůči oblouku $\pm 0,6$ mm. Jedná se o velmi dobrý výsledek. Procesní parametry pokrývají rozměrovou variaci dílů v rozsahu TS 8 až 30 mm/sec. Jako optimální rychlost svařování bylo rozhodnuto zvolit 20 mm/s. V případě větších svařovacích rychlostí se ve spojích začínají objevovat uzavřené póry, které přestože vyhovují jakostním požadavkům, nesvědčí o kvalitním svarovém spoji.

Tab. 11 Návrh optimálních parametrů pro spoj přehlátovaný

Parametr	Hodnota
TS	20 [mm/sec]
WFS (viz rovnice 5)	231 [mm/sec]
WTP (viz rovnice 8)	0.9 [mm]
I (viz rovnice 1)	297 [A]
U (viz rovnice 2)	34.7 [V]

Horní limit WFS koutového spoje je velmi omezen. Svislý tenký plech je náchylný k vadám druhu nadměrná penetrace a propal. Maximální rozsah WFS 35 mm/sec při konstantní WTP 1.0 mm se nachází mezi TS 7 až 10 mm/sec. Od TS 10 a výš, se rozsah vyhovujících WFS postupně začíná zužovat a u TS 17 činí pouhých 10 jednotek. Optimální WFS je schopna pohlít maximální možnou odchylku dílů $\pm 0,6$ mm, a to při TS 10 až 13 mm/sec. Po sečtení všech rozměrových variací ovlivňujících WTP parametr byla zjištěna maximální možná odchylka dílů vůči oblouku $\pm 0,8$ mm. Při zachování vyvinutých parametrů podle statistických výpočtů se dá očekávat, že každý pátý svar nebude odpovídat normě.

Tab. 12 Návrh optimálních parametrů pro spoj koutový

Parametr	Hodnota
TS	13 [mm/sec]
WFS (viz rovnice 11)	140 [mm/sec]
WTP (viz rovnice 14)	1.5 [mm]
I (viz rovnice 1)	204 [A]
U (viz rovnice 2)	23.6 [V]

6 Metalografické vyhodnocení základních materiálů

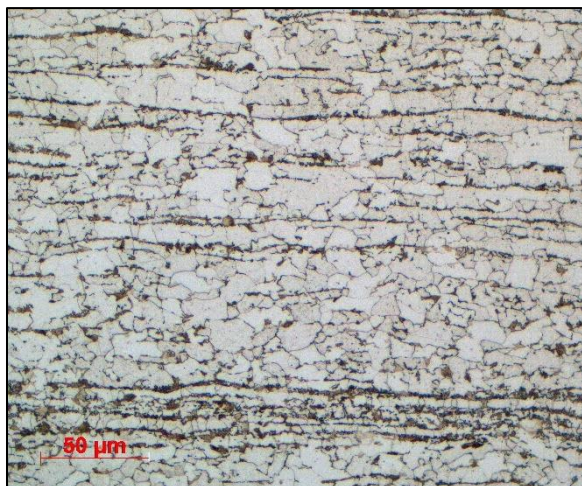
Oba základní materiály jsou nízkouhlíkové podeutektoidní ocele. Výsledná struktura je feriticko-perlitická, tvořenou převážně feritem, perlit je pak přítomen po hranicích zrn. Ve struktuře lze spatřit terciální cementit uzavřený ve feritických zrnech a občas na rozhraní třech feritických zrn. Během chlazení polotovaru z austenitizační teploty nejdříve vznikla feritická zrna a po dosažení eutektoidního složení zbytkový austenit se přeměnil na perlit samostatně umístěný na hranicích zrn.

V případě základního materiálu SCGA440 (viz. *Obr. 34*) mohla být lépe provedená jeho rekrystalizace. Jednotná zrna nejsou rovnoměrně veliké, u původních feritických zrn je částečně zachované předchozí protavení. SEM záznamem mikrostruktury (viz. *Obr. 36*) se potvrdila struktura pomocí analýzy světelnou mikroskopií. Na rozdíl od světelného mikroskopu, tmavší oblastí jsou zrna feritická a světlejší zrna perlitická. Na struktuře lze pozorovat náznaky předchozího tváření. V plechu je výrazně pozorovatelný rozválcovaný segregáčn $\acute{\text{y}}$ pás, nečistoty vzniklé kontinuálním litím při krystalizaci oceli v oblasti teplot tuhnutí. Segregační pás narušuje kohezi v materiálu a při provedení podélné tahové zkoušky by bylo možno pozorovat lamelární štěpení svarového spoje. U koutových spojů, u kterých se počítá s tímto druhem provozního zatížení by segregáčn $\acute{\text{y}}$ pás neměl být přítomen.

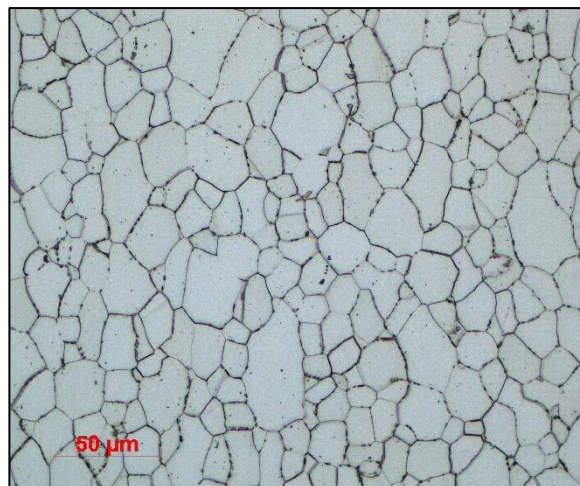
Stav rekrystalizace základního materiálu SCGA270C je podstatně lepší. U zrn nelze pozorovat náznaky předchozího tváření a střední velikost zrn je cca 30 μm (viz. *Obr. 35*). Na leptaném povrchu, uvnitř feritových zrn lze vidět kuličkové útvary (viz. *Obr. 37*), u kterých se předpokládalo, že se jedná o terciální cementit. Kuličky však bylo možné spatřit i na čerstvě leštěném povrchu, tudíž vznikla pochybnost, že v případě všech kuliček se jedná o terciální cementit. Provedením EDX spektroskopie se ukázalo, že se jedná o oxidicko-sulfidické vměstky a hlavně o oxidy Al_2O_3 , které navíc obsahují síru a mangan (viz. *Obr. 38*).

6.1 Mikrografie

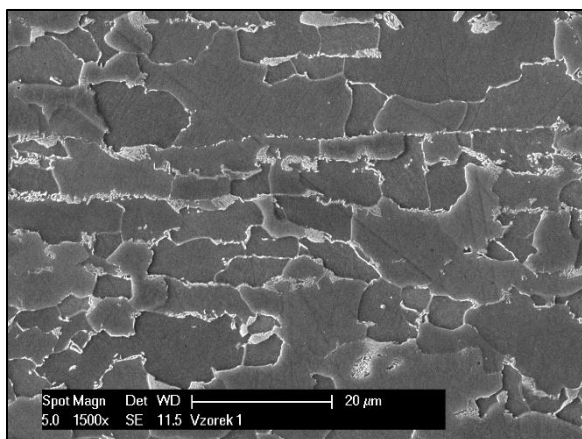
Leptání všech vzorků bylo prováděno roztokem nital 3%, po dobu 10 sekund. Vzhledem k případné porozitě ve svarovém kovu musely být podniknuty určité kroky pro lepší opláchnutí povrchu vzorků od zbytku kyseliny. Po leptání byl vzorek hned opláchnut větším množstvím líhu a umístěn do ultrazvukové čističky.



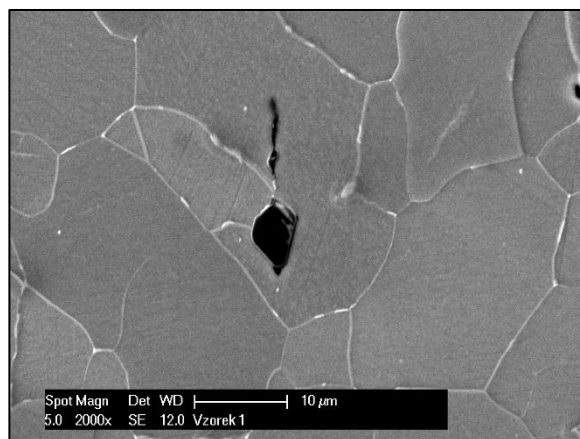
Obr. 34 Mikrostruktura ZM SCGA440 světelná mikroskopie, ×500 (detail 4_1 obrázku 81)



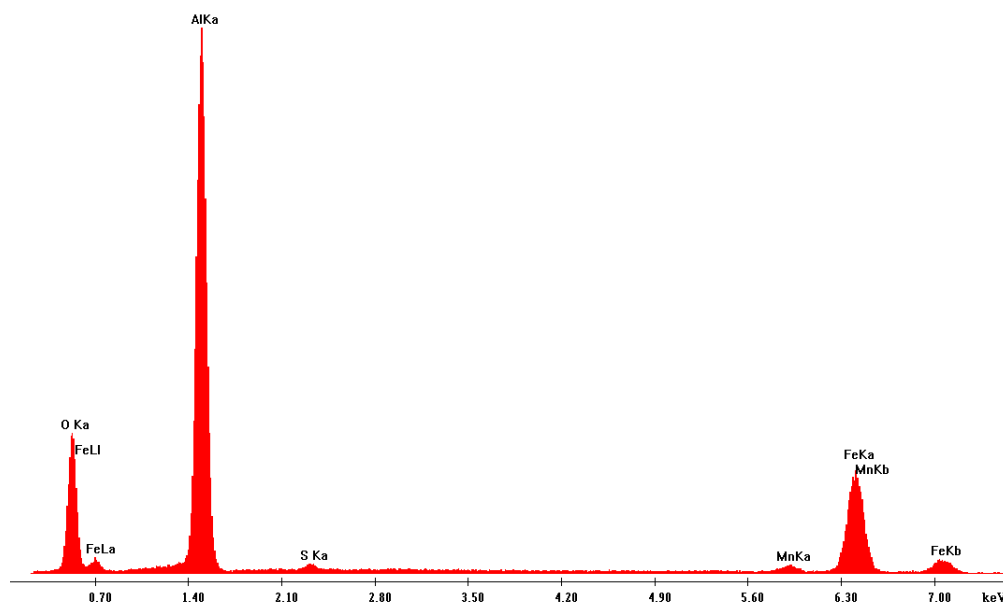
Obr. 35 mikrostruktura ZM SCGA270C světelná mikroskopie, ×500 (detail 1_12 obrázku 41)



Obr. 36 Mikrostruktura ZM SCGA440 skenovací elektronová mikroskopie, ×1500



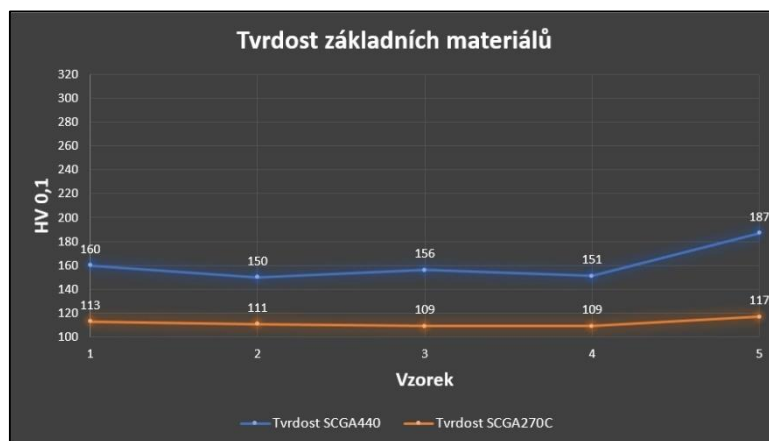
Obr. 37 Mikrostruktura a vměstek v ZM SCGA270C skenovací elektronová mikroskopie, ×2000



Obr. 38 EDX spektrum odhalující chemické složení vmětku z obrázku 37

6.2 Tvrdost

Měření tvrdosti základního materiálu proběhlo na už leptaném povrchu metodou HV0,1. U obou materiálů bylo provedeno 5 vtisků ve svařování tepelně neovlivněné oblasti. Tvrdost materiálu SCGA440 činí $160,8 \pm 13,6$ HV0,1. Tvrdost materiálu SCGA270C činí $111,8 \pm 3,0$ HV0,1. Výsledky měření jsou na Obr. 39, kde modrá čára zastupuje výsledky měření polotovaru SCGA440 a oranžová SCGA270C.

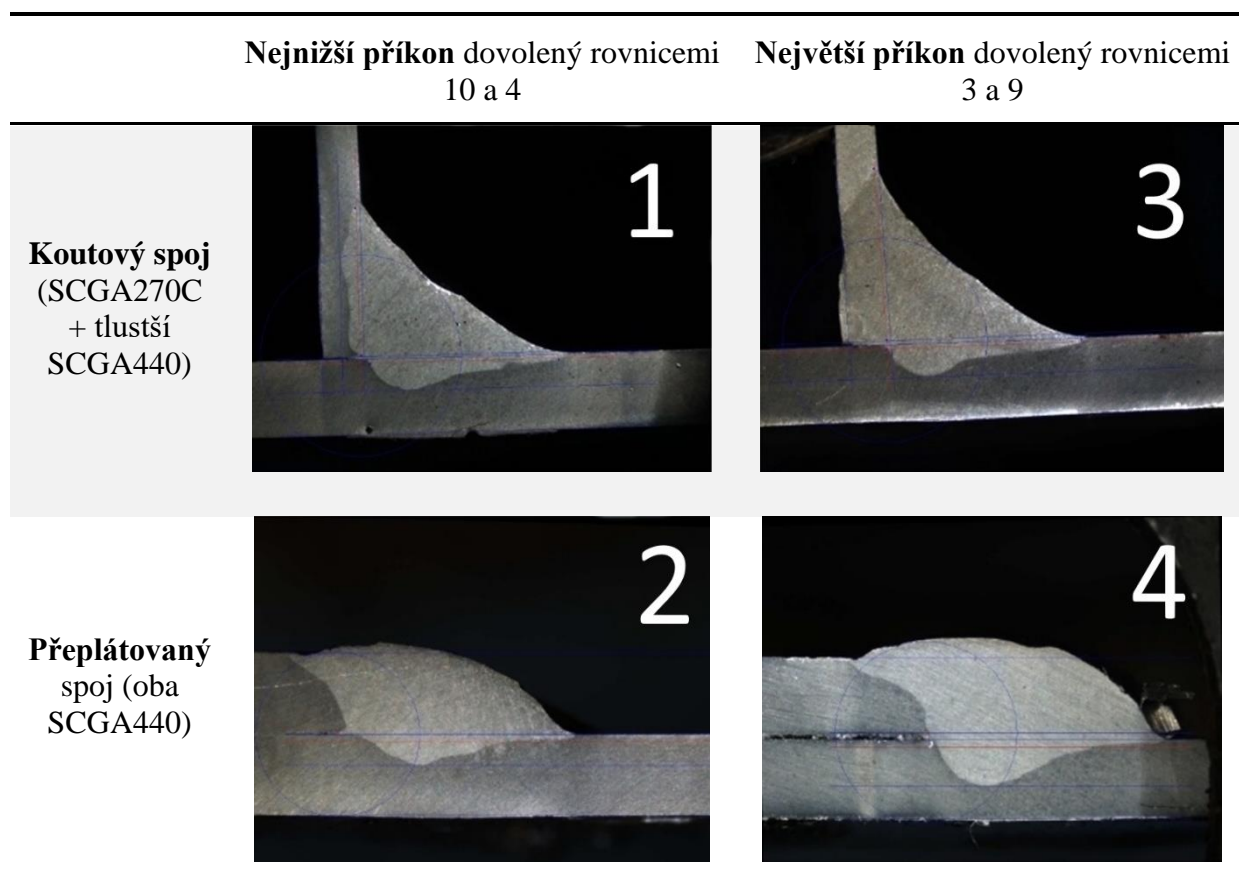


Obr. 39 Tvrdost obou základních materiálů - HV0,1

7 Vyhodnocení vybraných parametrů

Pro zkoumání mikrostruktury a vyhodnocení tvrdostí bylo rozhodnuto vyrobit celkem 4 vzorky, po dvou od každého druhu svařového spoje. Všechny svařovací parametry uvedené v tabulkách Tab. 11 a Tab. 12 jsou konstantní s výjimkou WFS hodnoty nastavené na spodní a horní vyhovující hranici jakostním normám. Přehledné schéma všech vzorků s popisky označení ocelí a dalšími kritérii lze vidět v Tab. 13.

Tab. 13 Schéma vzorků pro následné vyhodnocení



Optické vyhodnocení geometrie svarových spojů a přesně hloubky penetrace, délek odvěsen a jmenovité velikosti svaru v souladu s jakostní normou bylo provedeno v rozhraní platformy NIS-Elements.

Vyhodnocení tvrdostí svarového kovu a TOO probíhalo metodou HV0,1. Na každém ze vzorků byly provedeny 4 řady vtisků: dvě řady s odstupem na spodním ZM ve směru kolmém na hranici ztavení a dvě řady na horním ZM také ve směru kolmém na hranici ztavení. Odstup dvou vtisků je roven 0,1 mm o celkové délce jedné řady 2 mm čili 21 vtisků v řadě. Směr měření tvrdosti v rámci jedné řady vždy proběhnul od svarového kovu. Každý 11. vtisk se nachází na hranici ztavení.

7.1 Koutový spoj - nejnižší dovolený příikon

V případě koutového spoje pro výrobu vzorku „1“ byly použité navržené optimální parametry z Tab. 12 s nastavenou hodnotou WFS na spodní vyhovující hranici (rovnice 10). Výsledkem byl získán svar vyhovující jakostním požadavkům na nejnižší (parametrickými rovnicemi dovolené) hranici příikonu. Přesné parametry svařování lze najít v Tab. 14.

Tab. 14 Svařovací parametry vzorku 1, koutový spoj – nejnižší dovolený příkon

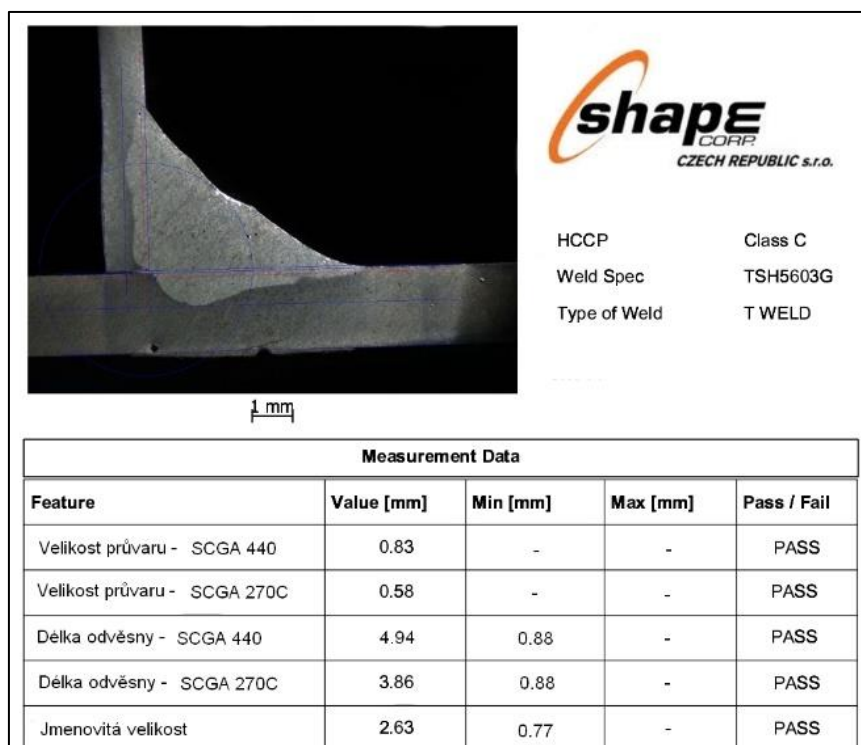
Parametr	Hodnota
TS	13 [mm/sec]
WFS (viz rovnice 10)	134 [mm/sec]
WTP (viz rovnice 14)	1.5 [mm]
I (viz rovnice 1)	197 [A]
U (viz rovnice 2)	23.6 [V]

7.1.1 Makrografie

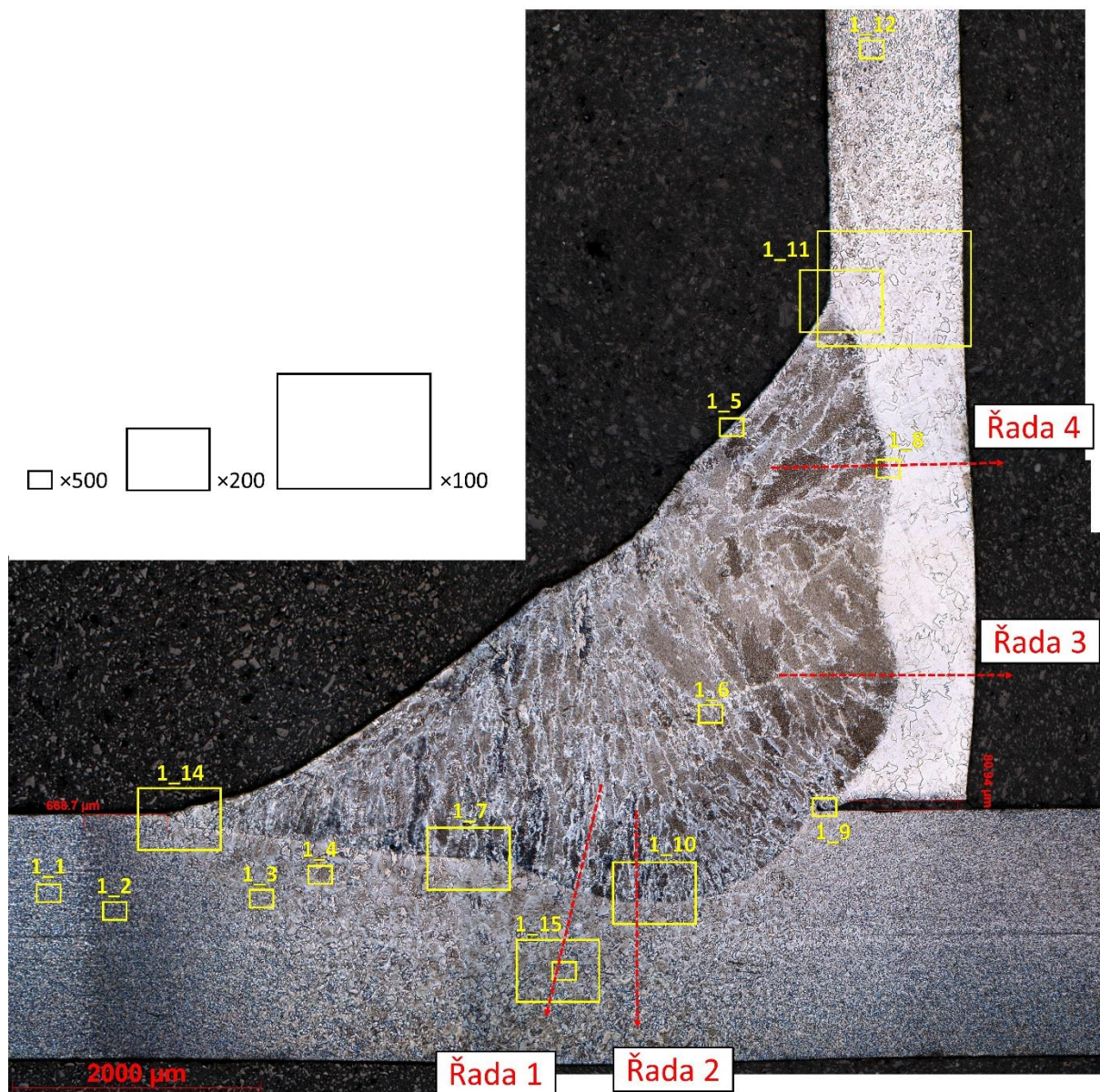
Z výsledků měření geometrie hranice ztavení svarového spoje (viz Obr. 40), je patrný vyhovující jakostním normám výsledek aplikovaných svařovacích parametrů. Délky odvěsen minimálně 4× převyšují danou normovanou hodnotu. Jmenovitá velikost svaru je vyhovující.

Podle skutečného výsledku se dá usoudit, že vzhledem k výborným rozměrům velikosti svarů by se dal spodní WFS rozsah posunout níže, než určuje rovnice 10. Avšak při hodnotách nižších, příkon není dostatečný pro odpaření výparů pozinku svarovým kovem. Ve svarovém spoji se objevuje porozita tím více, čím menší WFS je zadáno. Sice jakostní norma umožňuje přítomnost defektu „uzavřený pór“ jakékoli velikostí, je jenom otázkou pravděpodobností kdy se takový pór stane otevřeným a tím dle normy nevyhovujícím.

Na Obr. 41 lze vidět detailní snímek makrostruktury poskládaný z jednotlivých snímků při zvětšení ×25. Tento obrázek pak odkazuje na mikro detaily a pozice jednotlivých řad HV, uvedené v dalších podkapitolách.



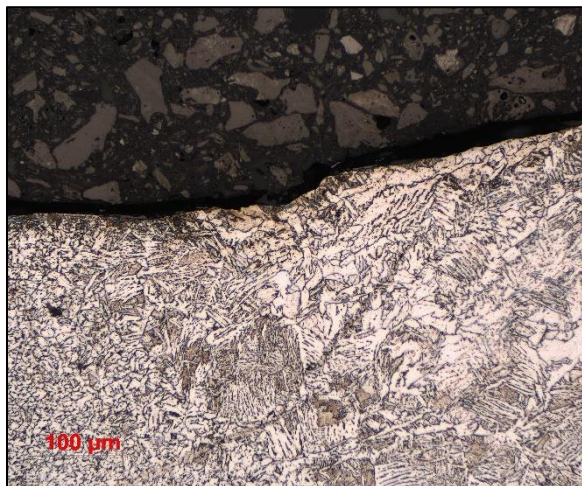
Obr. 40 Report geometrického vyhodnocení svarového spoje – vzorek 1



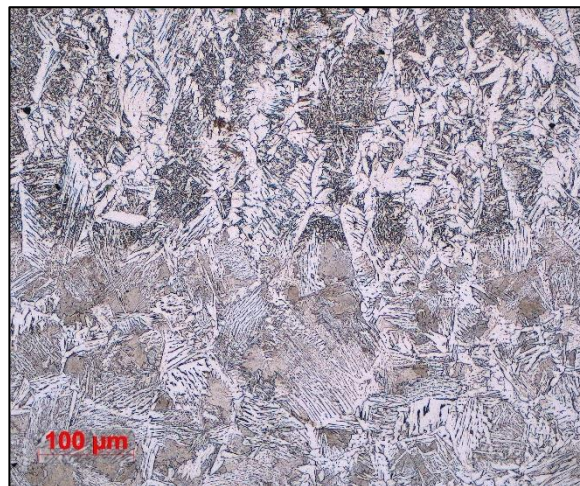
Obr. 41 Mapa mikro snímků a lokace jednotlivých řad HV0,1 vtisků – vzorek 1

7.1.2 Mikrografie

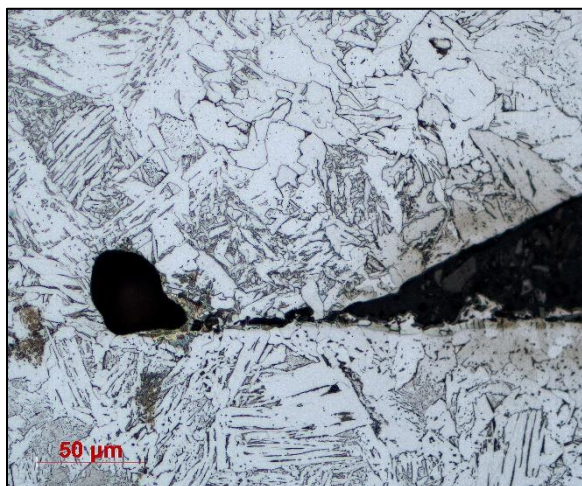
Oblast hranice ztavení z detailů (Obr. 42 až Obr. 46) vykazuje vyhovující charakter. Na povrchovém rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu nejsou přítomny trhliny, které by mohly být kritickým místem iniciace větší trhliny. Kvalitativně horším místem svarového spoje však je jeho kořen (viz. Obr. 44). Se svařovacími parametry nebylo možno dosáhnout jeho lepšímu provaření. A navíc odpařovaný zinek v něm ponechal por o velikosti 30 μm. Na Obr. 43 a Obr. 45 lze pozorovat hranici ztavení v místech největších hloubek penetrace. V TOO ZM SCGA440 Obr. 43 lze pozorovat feritové jehlice s cementitem po jejich hranicích. Hnědé oblasti pak jsou struktury bainitického stavu. Základní materiál u hranice ztavení SCGA270C se zachoval o něco lepe (viz. Obr. 45 a Obr. 48). Struktura ZM není tak jehlicovitá a lze sledovat lepší přechod do svarového kovu. Došlo k okamžitému zhrubnutí zrna, po hranicích feritických zrn se nachází cementit. Samotný svarový kov z oblasti 1_6 (viz. Obr. 47) je tvořen jehlicovitým feritem podobným widmanstättenové struktuře. Za vznik takové struktury může zvýšená rychlost ochlazování.



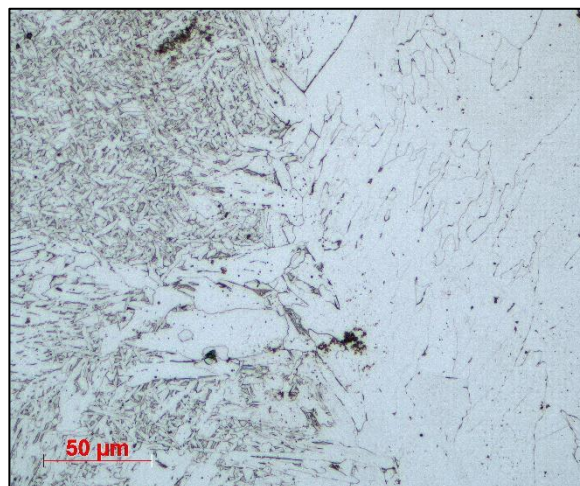
Obr. 42 Detail 1_14, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200



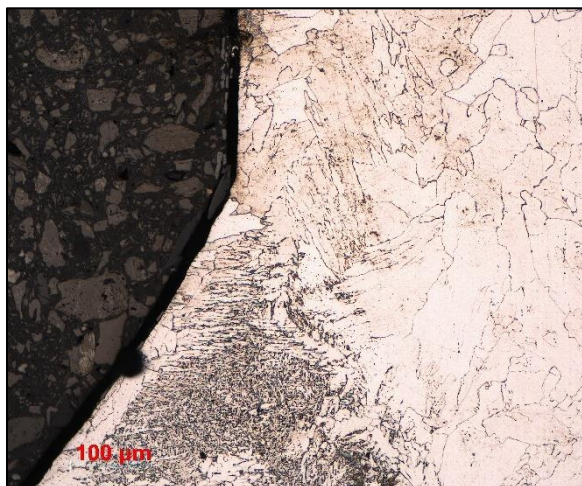
Obr. 43 Detail 1_10, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200



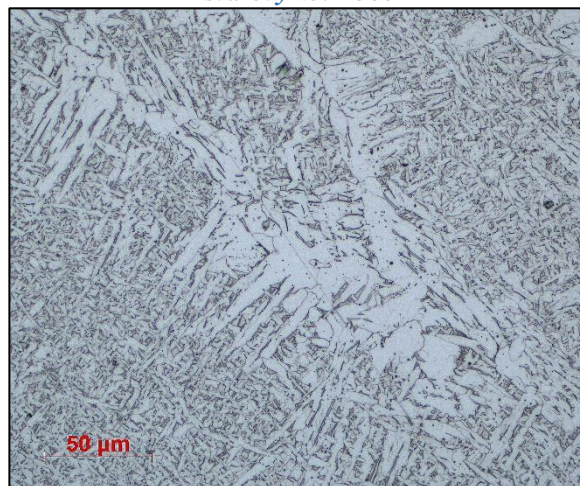
Obr. 44 Detail 1_9, kořen svaru ×500



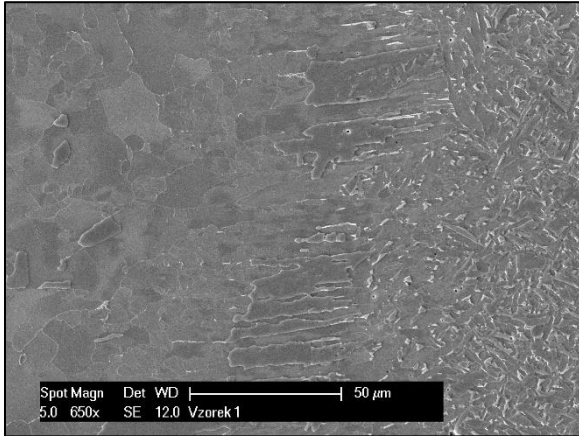
Obr. 45 Detail 1_8, hranice ztavení SCGA270C – svarový kov ×500



Obr. 46 Detail 1_11, hranice ztavení SCGA270C – svarový kov ×200



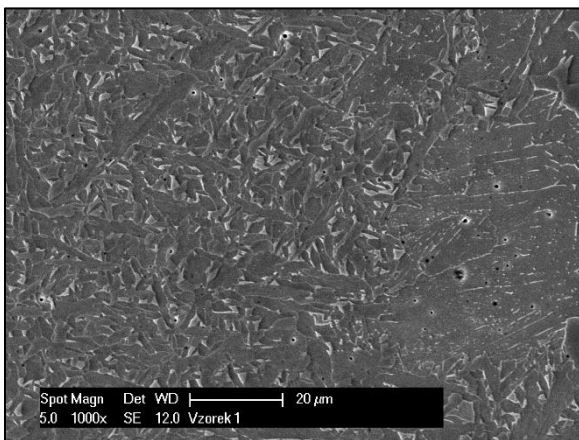
Obr. 47 Detail 1_6, svarový kov ×500



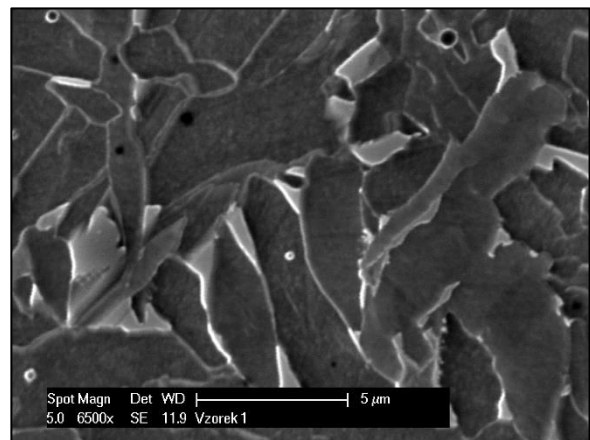
Obr. 48 Detail 1_8, hranice ztavení SCGA270C – svarový kov ×1500



Obr. 49 Detail 1_10, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov ×2000



Obr. 50 Detail 1_6, svarový kov ×1000

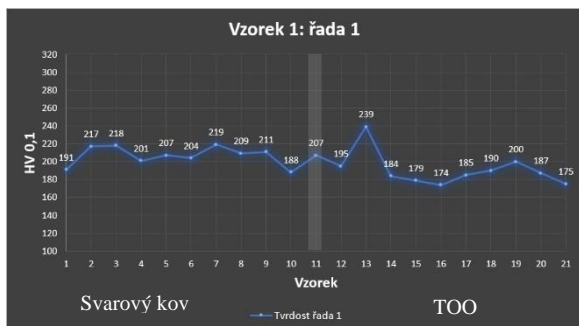


Obr. 51 Detail 1_6, svarový kov ×6500

7.1.3 Tvrdost

Výsledky měření tvrdosti svarový kov – SCGA440 jsou uvedeny na *Obr. 52* a *Obr. 53*. Jednotlivé řady vtisků lze identifikovat pomocí *Obr. 41*. Největší naměřená hodnota tvrdosti se nachází v první řadě vtisků a leží 0,2 mm od hranice ztavení v TOO.

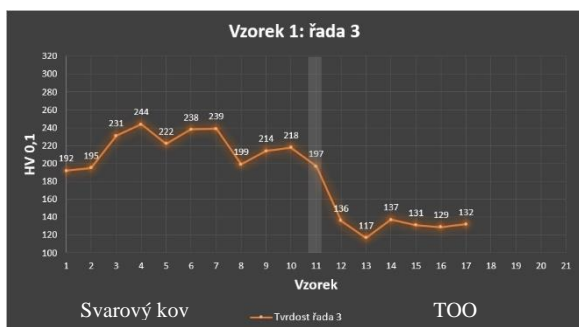
Výsledky měření tvrdosti svarový kov – SCGA270C jsou uvedeny na *Obr. 54* a *Obr. 55*. *Obr. 52*. Jednotlivé řady vtisků lze zase identifikovat pomocí *Obr. 41*. Největší hodnoty tvrdosti má svarový kov, Tvrdost hranice ztavení je o něco měkčí než svarový kov, ale o zhruba 70 HV_{0,1} tvrdší než TOO



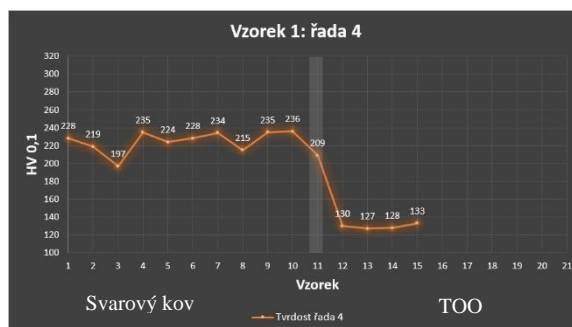
Obr. 52 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 1, řada 1



Obr. 53 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 1, řada 2



Obr. 54 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA270C, vzorek 1, řada 3



Obr. 55 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA270C, vzorek 1, řada 4

7.2 Přepřátovaný spoj - nejnížší dovolený příkon

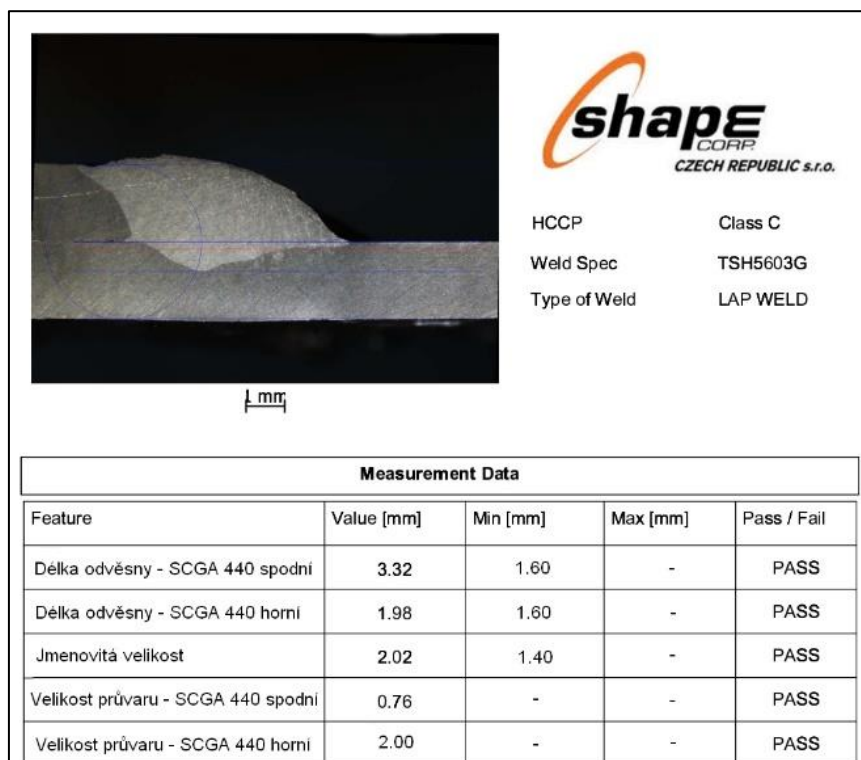
V případě přepřátovaného spoje pro výrobu vzorku „2“ byly použité navržené optimální parametry z Tab. 11 s nastavenou hodnotou WFS na spodní vyhovující hranici (rovnice 4). Výsledkem byl získán vyhovující jakostním požadavkům spoj na nejnížší (parametrickými rovnicemi dovolené) hranici příkonu. Přesné parametry svařování lze najít v Tab. 15 a Tab. 16.

Tab. 15 Svařovací parametry vzorku 2, přepřátovaný spoj – nejnížší dovolený příkon

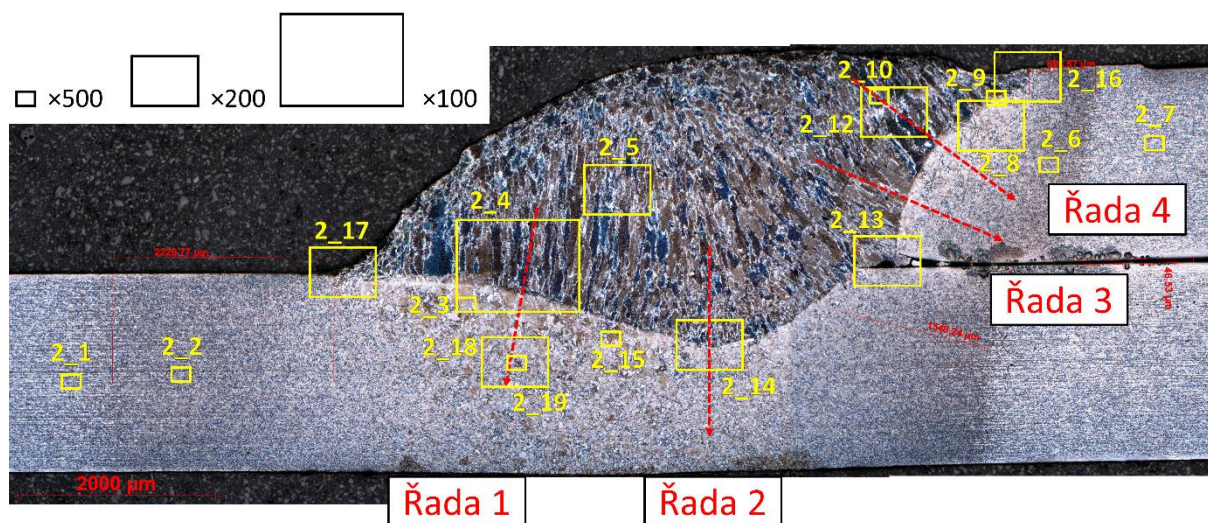
Parametr	Hodnota
TS	20 [mm/sec]
WFS (viz rovnice 4)	206 [mm/sec]
WTP (viz rovnice 8)	0.9 [mm]
I (viz rovnice 1)	275 [A]
U (viz rovnice 2)	31.4 [V]

7.2.1 Makrografie

Z výsledků měření geometrie hranice ztavení svarového spoje (viz Obr. 56 a Obr. 40), je patrný vyhovující jakostním normám výsledek aplikovaných svařovacích parametrů. Délky odvěšen zase převyšují danou normou hodnotu. Jmenovitá velikost svaru je vyhovující.



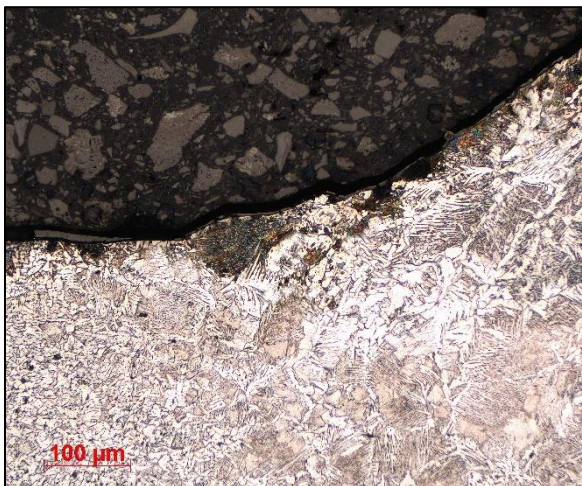
Obr. 56 Report geometrického vyhodnocení svarového spoje – vzorek 2



Obr. 57 Mapa mikro snímků a lokace jednotlivých řad HV0,1 vtisků – vzorek 2

7.2.2 Mikrografie

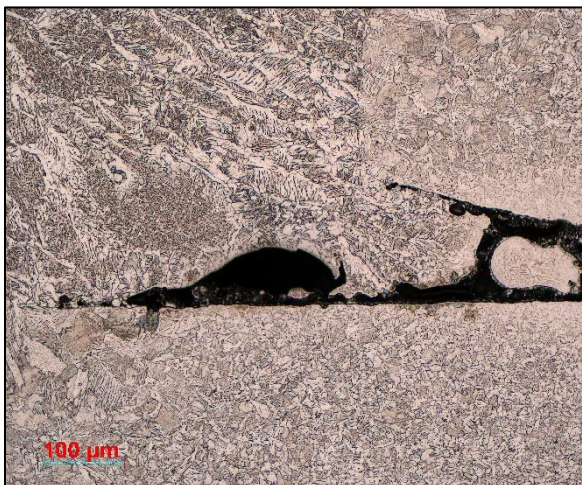
Oblast hranice ztavení z detailů Obr. 58, a Obr. 62 je vyhovující. Na povrchovém rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu také nejsou přítomny trhliny. Kritickým místem svarového spoje je jeho kořen Obr. 60. Pór v kořenu svaru má ostrý tvar. Na Obr. 59 a Obr. 61 lze pozorovat hranici ztavení v místech největších hloubek penetrace. Navíc v blízkosti hranice ztavení detailu 2_14 (viz. Obr. 59) jsou přítomny jednotlivé póry o velikosti 7 µm. V TOO a svarovém kovu lze zase pozorovat feritické jehlice a perliticko-bainitickou strukturu.



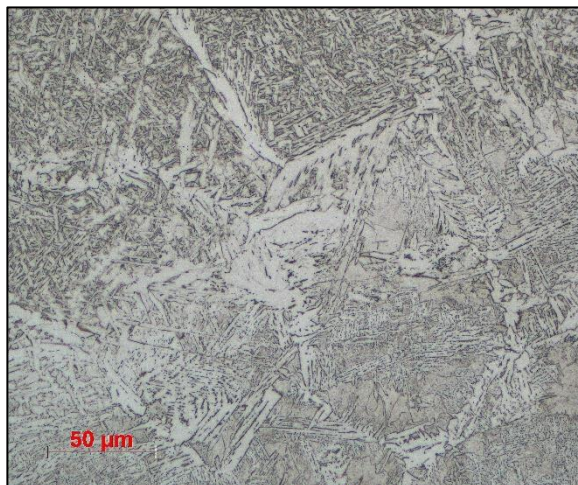
*Obr. 58 Detail 2_17, hranice ztavení SCGA440 –
svarový kov, ×200*



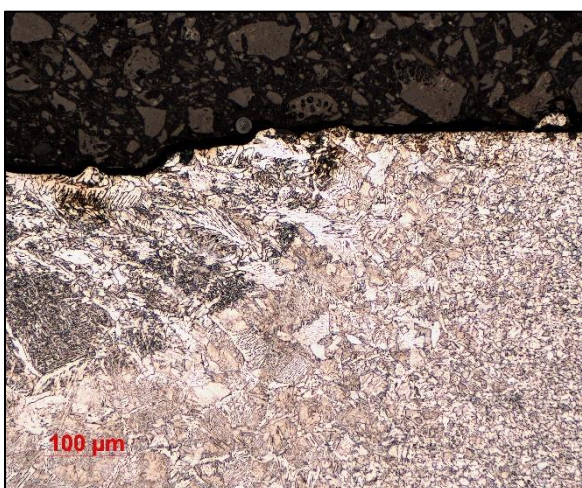
*Obr. 59 Detail 2_14, hranice ztavení SCGA440 –
svarový kov, ×200*



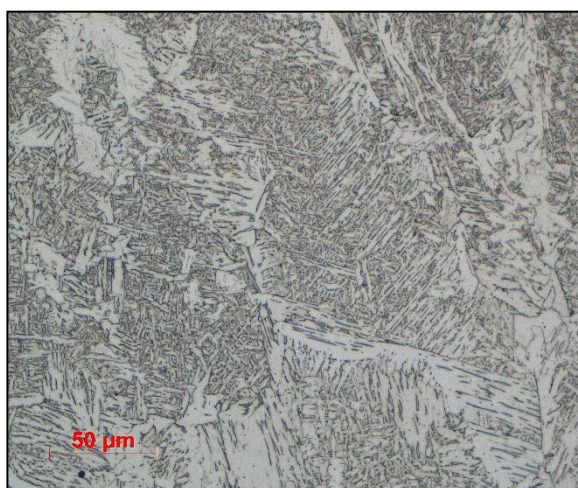
Obr. 60 Detail 2_13, kořen svaru ×200



*Obr. 61 Detail 2_9, hranice ztavení SCGA440 –
svarový kov, ×500*



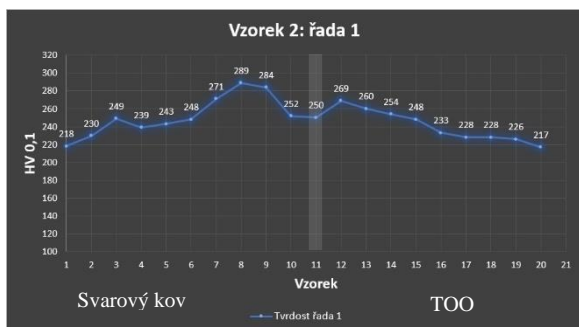
*Obr. 62 Detail 2_16, hranice ztavení SCGA440 –
svarový kov, ×200*



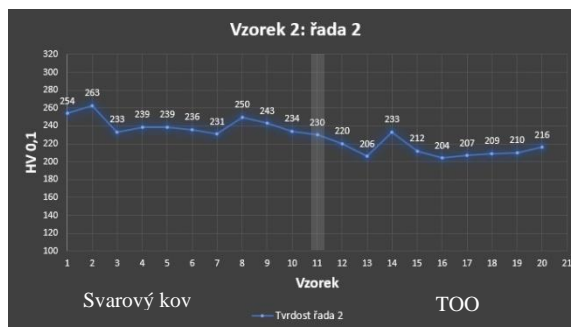
Obr. 63 Detail 2_10, svarový kov ×500

7.2.3 Tvrdost

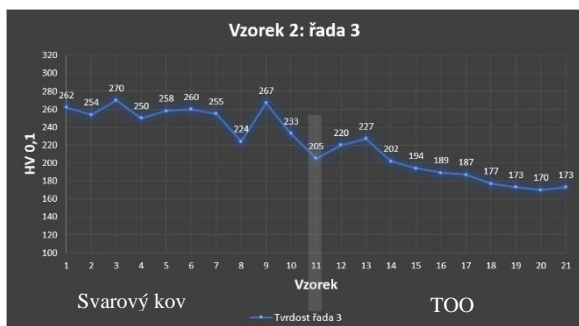
Z výsledku tvrdostí na *Obr. 64* až *Obr. 67* lze pozorovat mírný pokles tvrdostí v TOO základního materiálu SCGA440. Hranice ztavení není nejměkčím místem svarového spoje.



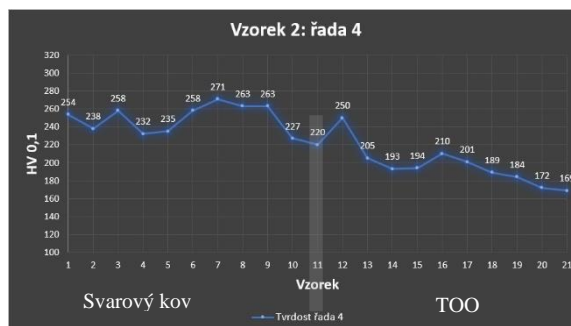
Obr. 64 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 2, řada 1



Obr. 65 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 2, řada 2



Obr. 66 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 2, řada 3



Obr. 67 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 2, řada 4

7.3 Koutový spoj – nejvyšší dovolený příkon

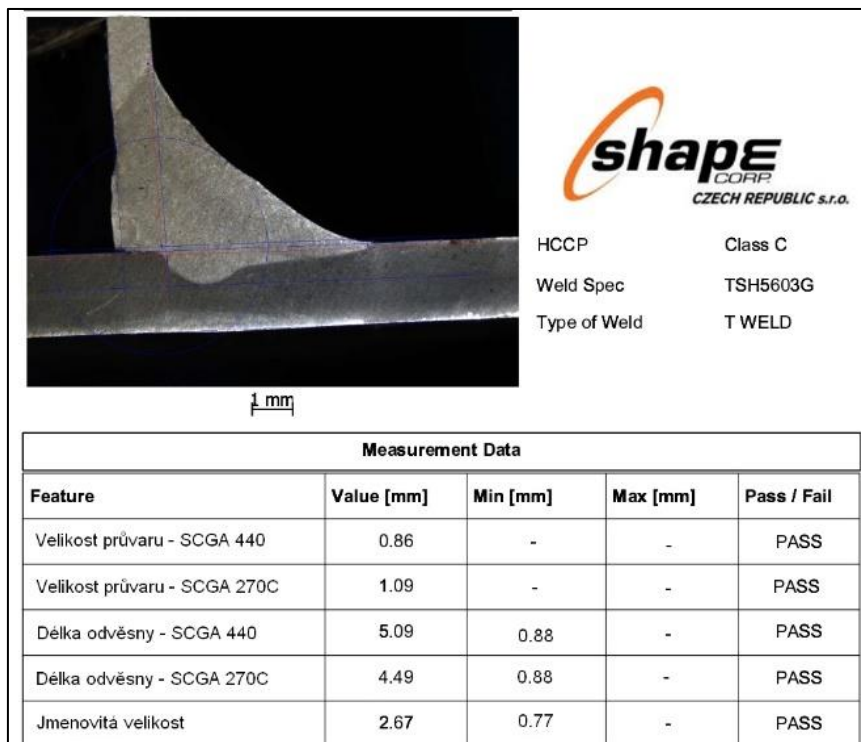
V případě koutového spoje pro výrobu vzorku „3“ byly použité navržené optimální parametry z *Tab. 12* s nastavenou hodnotou WFS na horní vyhovující hranici (rovnice 9). Výsledkem byl získán vyhovující jakostním požadavkům spoj na nejvyšší (parametrickými rovnicemi dovolené) hranici příkonu. Přesné parametry svařování lze najít v *Tab. 16*.

Tab. 16 Svařovací parametry vzorku 3, koutový spoj – nejvyšší dovolený příkon

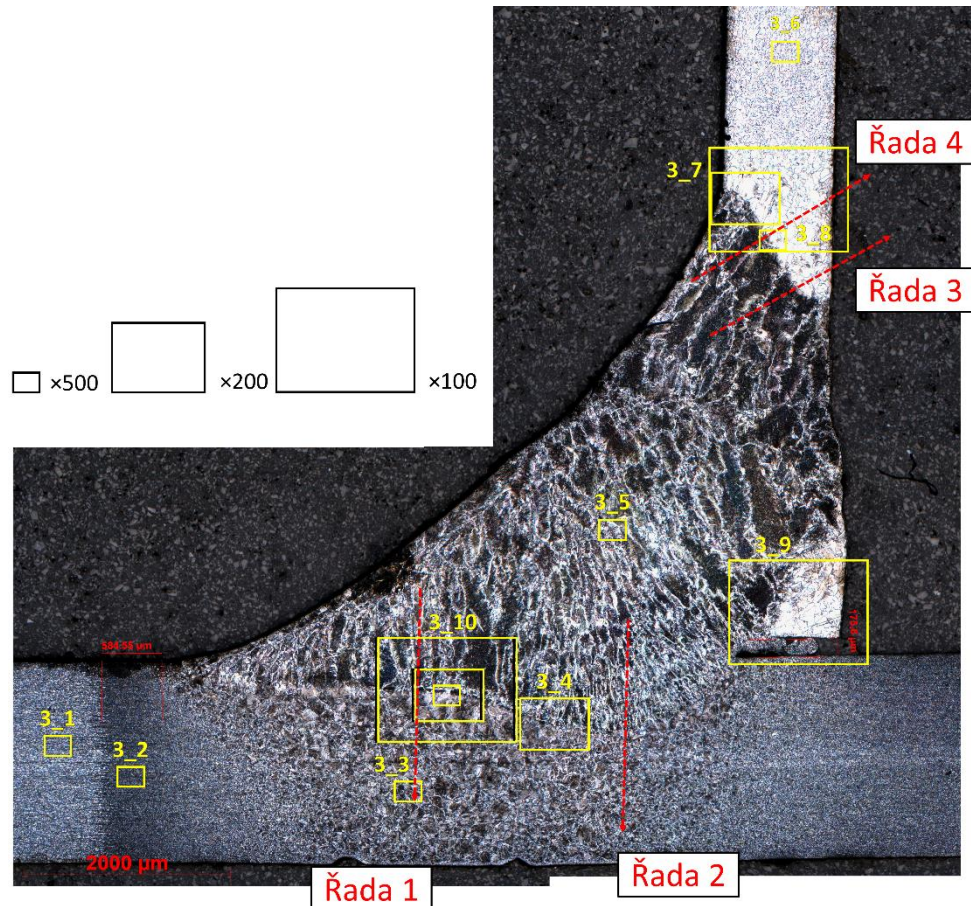
Parametr	Hodnota
TS	13 [mm/sec]
WFS (viz rovnice 9)	149 [mm/sec]
WTP (viz rovnice 14)	1.5 [mm]
I (viz rovnice 1)	215 [A]
U (viz rovnice 2)	24.6 [V]

7.3.1 Makrografie

Z výsledků měření geometrie hranice ztavení svarového spoje (viz. *Obr. 68*), je opět patrné vyhovění jakostním normám. Polotovár SCGA270C je provařený po své celé tloušťce. Svarový spoj je na hranici vyhovění jakostní normě, poněvadž při dalším zvyšování WFS bude následovat vytvoření defektu druhu propal nebo nadměrná penetrace.



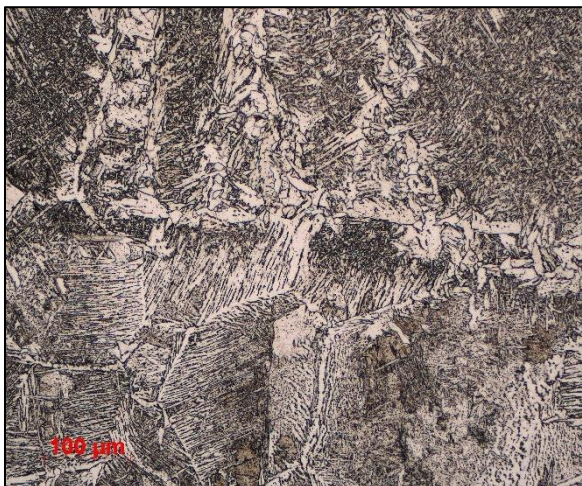
Obr. 68 Report geometrického vyhodnocení svarového spoje – vzorek 3



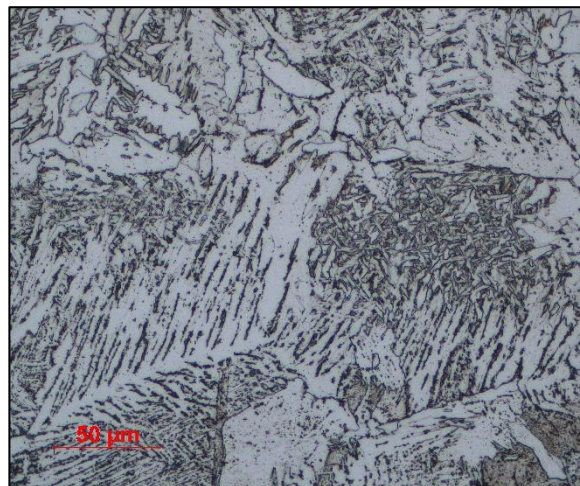
Obr. 69 Mapa mikro snímků a lokace jednotlivých řad HV0,1 vtisků – vzorek 3

7.3.2 Mikrografie

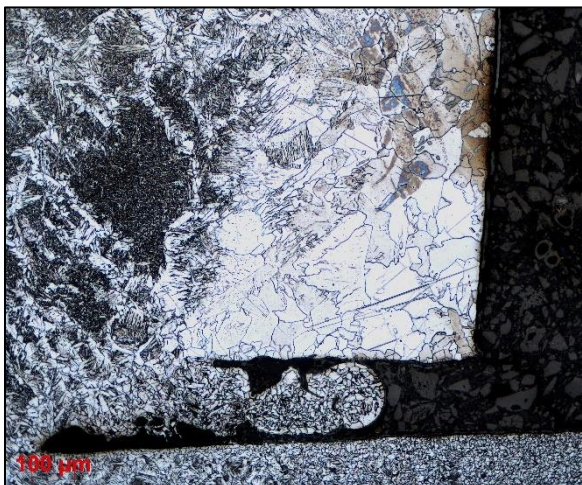
Kritickým místem svarového spoje je jeho kořen (viz. Obr. 72) navíc v detailu lze zase pozorovat plochý pór podél spodního základního materiálu. Ani při WFS nastaveném na horní hranici se nepovedlo provařit kořen základních materiálů. Svůj podíl na tom má vypařující se zinková vrstva. V TOO ZM SCGA440 (viz Obr. 70 a Obr. 43) lze jasně pozorovat velikost původních austenitových zrn a feritové jehlice směřující od hranic těchto zrn s cementitem po jejich hranicích. Svarový kov z oblasti 3_5 (viz. Obr. 75 a Obr. 47) je tvořen jehlicovitým feritem zdánlivě větším než svarový kov vzorku 1 (viz. Obr. 47), pravděpodobně kvůli odlišným teplotám chladnutí spoje.



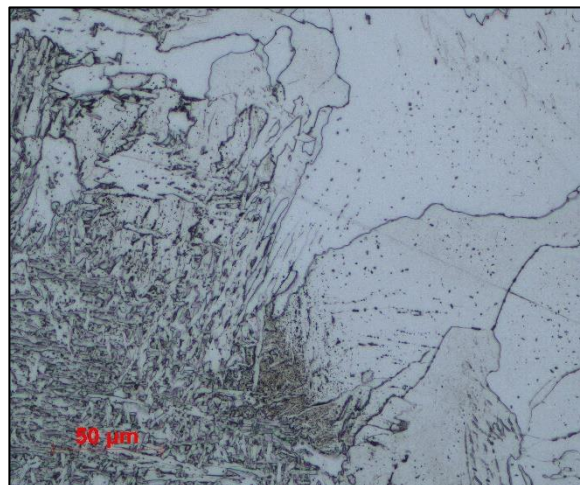
*Obr. 70 Detail 3_10, hranice ztavení SCGA440 –
svarový kov, ×200*



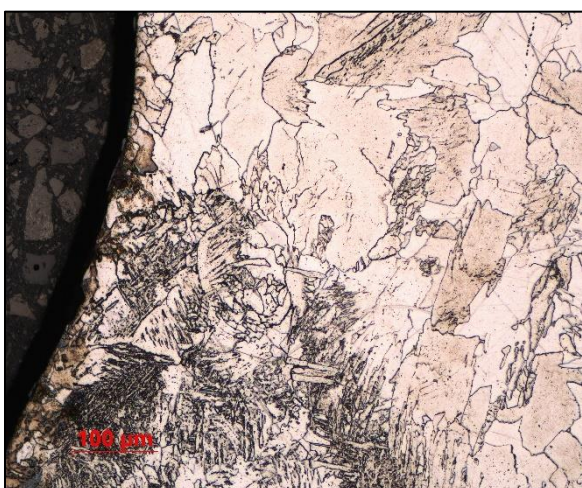
*Obr. 71 Detail 3_10, hranice ztavení SCGA440 –
svarový kov, ×500*



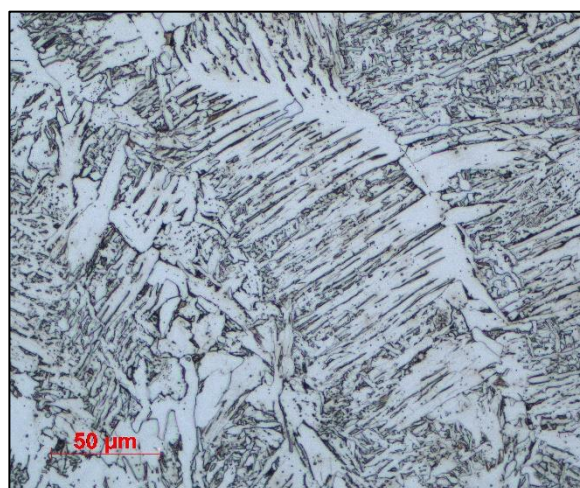
Obr. 72 Detail 3_9, kořen svaru ×100



*Obr. 73 Detail 3_8, hranice ztavení SCGA270C –
svarový kov ×500*



*Obr. 74 Detail 3_7, hranice ztavení SCGA270C –
svarový kov ×200*



Obr. 75 Detail 3_5, svarový kov ×500

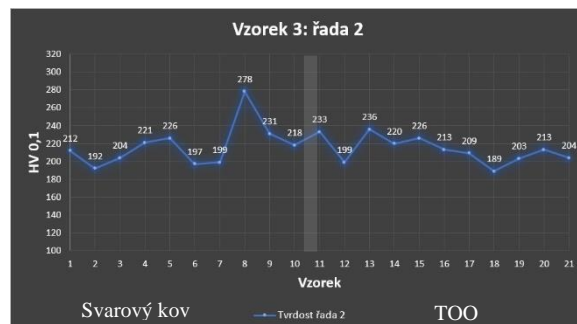
7.3.3 Tvrdost

Výsledky měření tvrdosti svarový kov – SCGA440 jsou uvedeny na *Obr. 76* a *Obr. 77*. Hranice ztavení není nejměkčím místem svarového spoje.

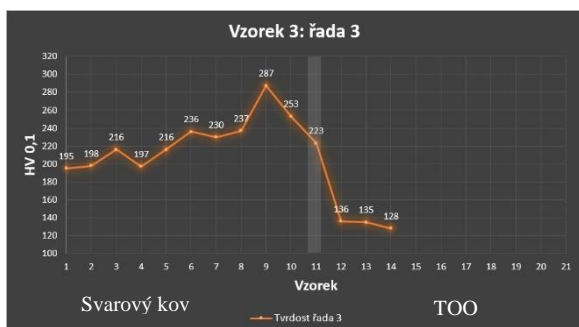
Výsledky měření tvrdosti svarový kov – SCGA270C jsou uvedeny na *Obr. 78* a *Obr. 79*. Největší hodnoty tvrdostí má svarový kov, Tvrdost hranice ztavení je o něco měkčí než svarový kov, ale o zhruba 70 až 100 HV_{0,1} tvrdší než TOO



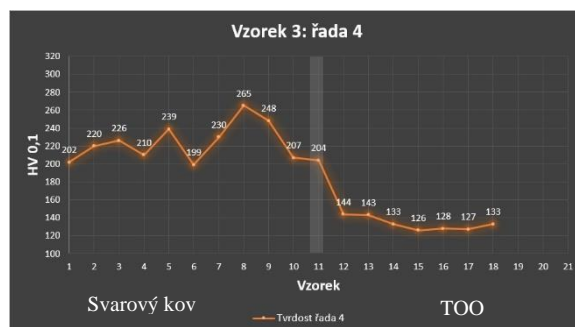
Obr. 76 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 3, řada 1



Obr. 77 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 3, řada 2



Obr. 78 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA270C, vzorek 3, řada 3



Obr. 79 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA270C, vzorek 3, řada 4

7.4 Přeplátovaný spoj – nejvyšší dovolený příkon

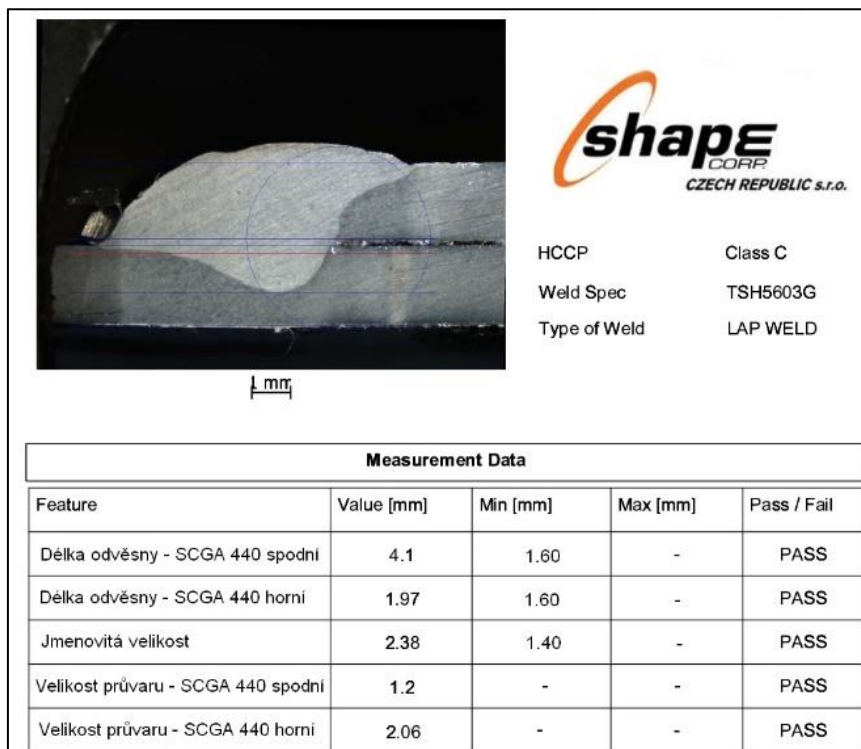
V případě přeplátovaného spoje pro výrobu vzorku „4“ byly použité navržené optimální parametry z *Tab. 11* s nastavenou hodnotou WFS na horní vyhovující hranici (rovnice 3). Výsledkem byl získán vyhovující jakostním požadavkům spoj na nejvyšší (parametrickými rovnicemi dovolené) hranici příkonu. Přesné parametry svařování lze najít v *Tab. 17*.

Tab. 17 Svařovací parametry vzorku 4, přeplátovaný spoj – nejvyšší dovolený příkon

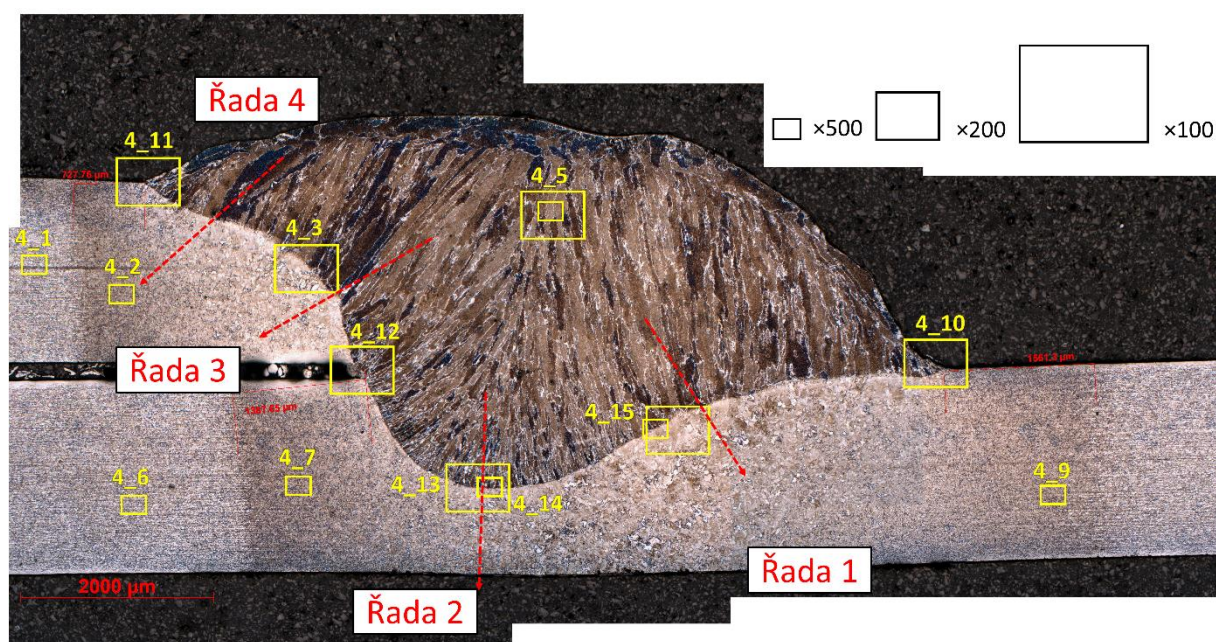
Parametr	Hodnota
TS	20 [mm/sec]
WFS (viz rovnice 3)	247 [mm/sec]
WTP (viz rovnice 8)	0.9 [mm]
I (viz rovnice 1)	310 [A]
U (viz rovnice 2)	37.0 [V]

7.4.1 Makrografie

Z výsledků měření geometrie hranice ztavení svarového spoje (viz. Obr. 80 Obr. 40), je zase patrný vyhovující jakostním normám výsledek aplikovaných svařovacích parametrů. Hodnoty jsou lepší než u vzorku 2.



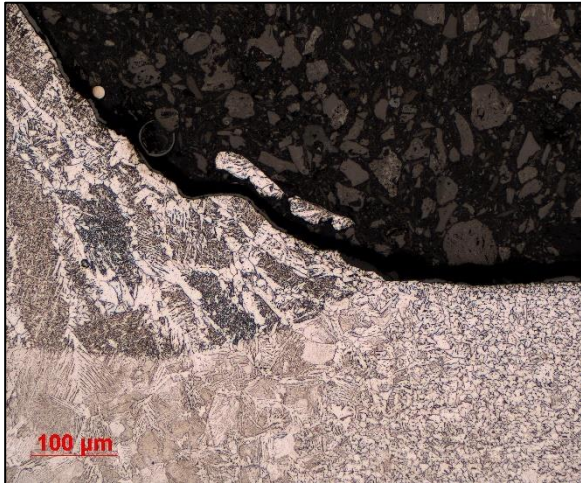
Obr. 80 Report geometrického vyhodnocení svarového spoje – vzorek 4



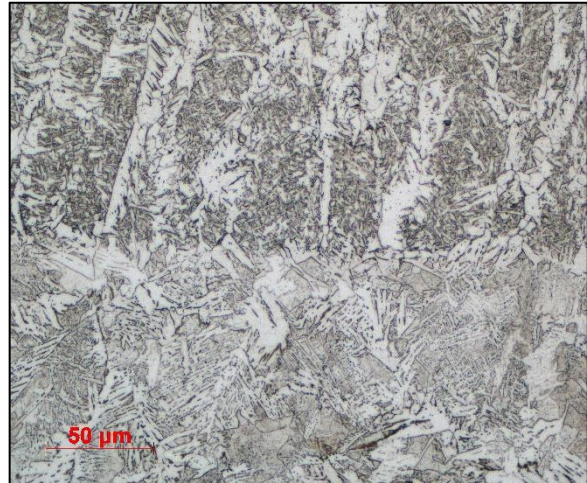
Obr. 81 Mapa mikro snímků a lokace jednotlivých řad HV0,1 vtisků – vzorek 4

7.4.2 Mikrografie

Oblast hranice ztavení z detailů *Obr. 82* a *Obr. 86* je vyhovující. Přejít svarového kovu na základní materiál však není tak plynulý jak u vzorku 2 (viz. *Obr. 83* a *Obr. 85*). Oblast kořenu spoje (viz. *Obr. 84*) je ale lepší než u vzorku 2. Místem svarového spoje je jeho kořen *Obr. 60*. Por v kořenu svaru nemá tak ostrý tvar, pravděpodobně díky větším WFS hodnotám. Ve svarovém kovu *Obr. 87* lze vidět několik uzavřených pórů o velikosti maximální 10 μm .



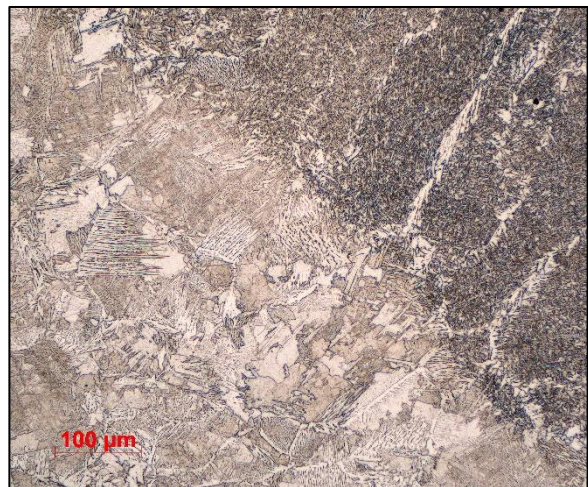
Obr. 82 Detail 4_10, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, $\times 200$



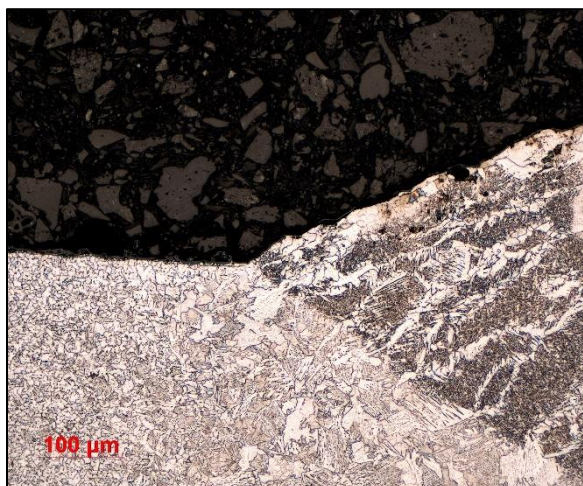
Obr. 83 Detail 4_14, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, $\times 500$



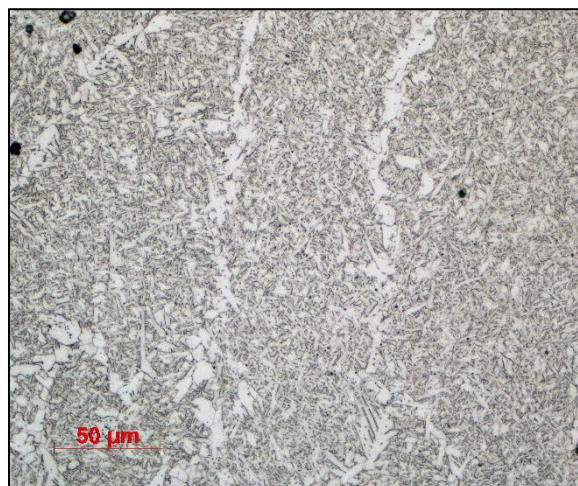
Obr. 84 Detail 4_12, kořen svaru $\times 200$



Obr. 85 Detail 4_3, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, $\times 200$



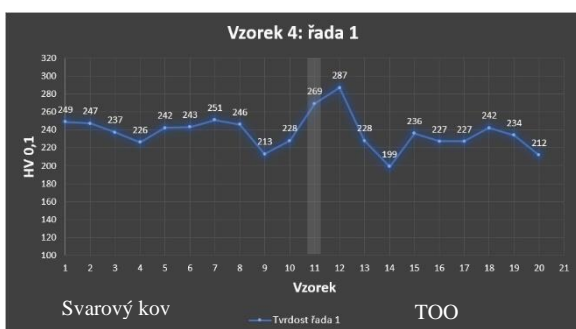
Obr. 86 Detail 4_11, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200



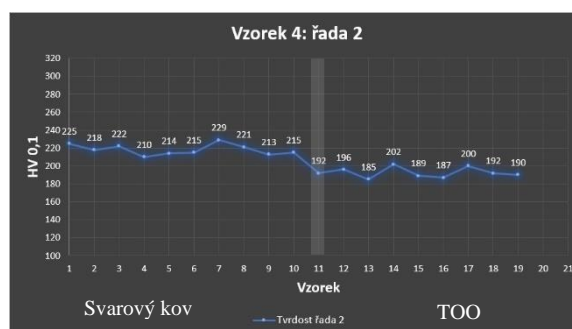
Obr. 87 Detail 4_5, svarový kov ×500

7.4.3 Tvrdost

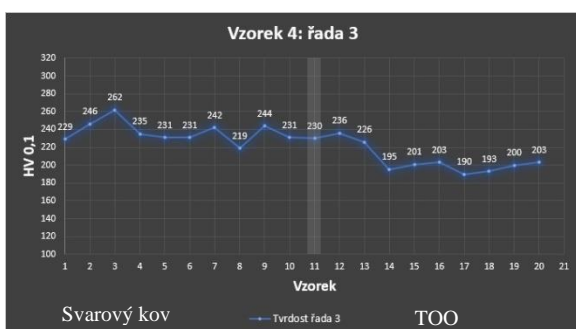
Z výsledku tvrdostí na Obr. 88 až Obr. 91 lze pozorovat mírný pokles tvrdostí v TOO základního materiálu SCGA440. Hranice ztavení není nejměkčím místem svarového spoje.



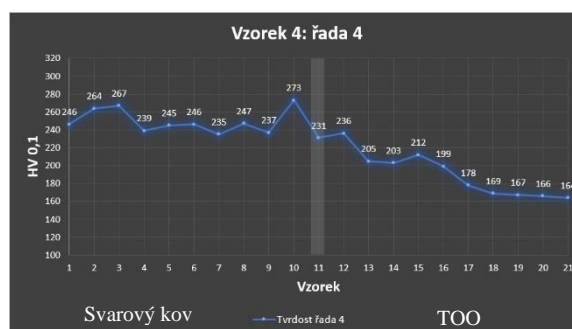
Obr. 88 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 4, řada 1



Obr. 89 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 4, řada 2



Obr. 90 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 4, řada 3



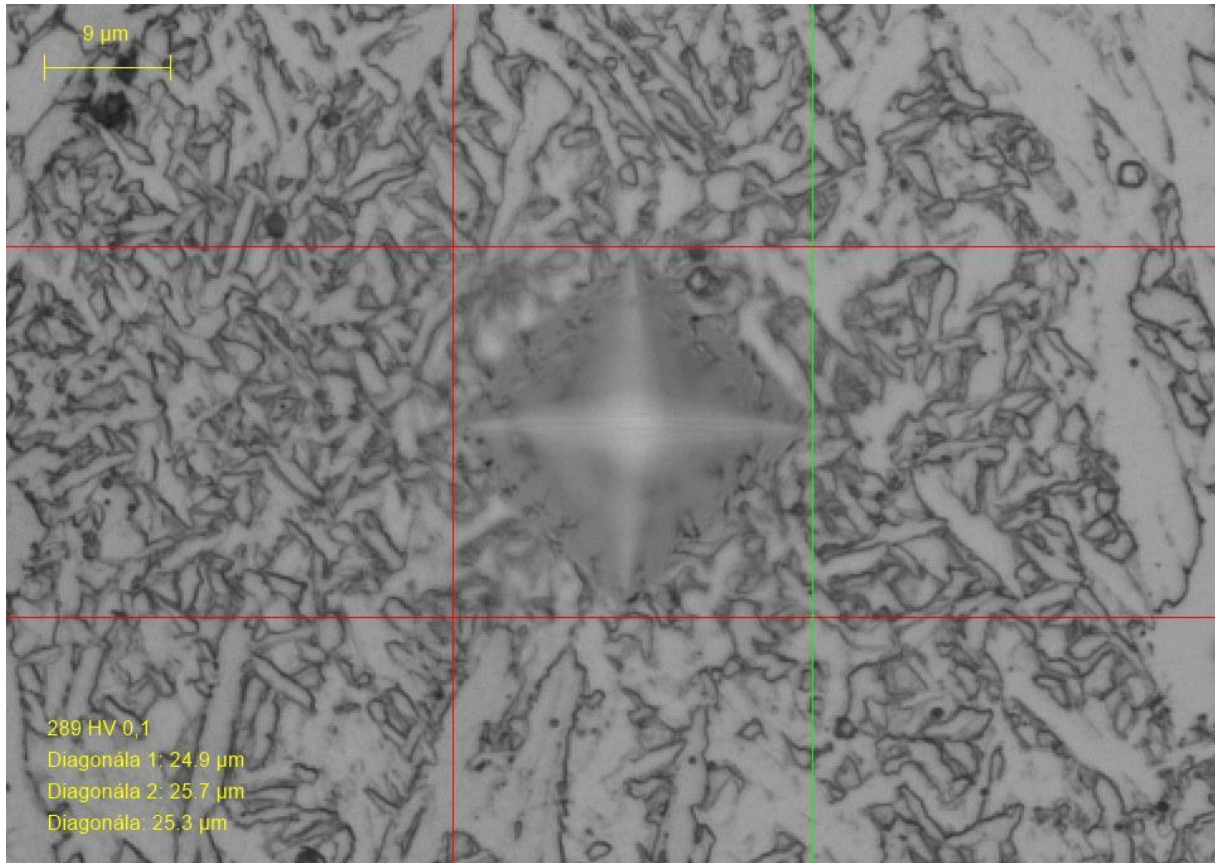
Obr. 91 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 4, řada 4

7.5 Vyhodnocení výsledků

V případě všech zkoušených svařovacích parametrů z hlediska jakostních norem TSH5603 a ČSN EN ISO 5817 jedná o plně vyhovující výsledky. Všechna měření provedena v kapitole 7 ukazují na funkčnost vyvinutých parametrických rovnic v oblastech svařovacích rychlostí 13 mm/sekundu pro spoj koutový a 20 mm/sekundu pro spoj překlátovaný.

Oba základní materiály dle ISO/TR 15608 dle chemického složení patří do skupiny 1, podskupiny 1.1 pro základní materiál SCGA270C a 1.2 pro základní materiál SCGA440. Podle ČSN EN ISO15614 maximální přípustná hodnota tvrdosti pro uvedené skupiny oceli je 380 HV10 ve stavu tepelně nezpracovaném a 320 HV10 ve stavu tepelně zpracovaném.

Ze všech vyhodnocených vtisků o počtu přesahujícím 300 největší hodnota byla zaznamenána u druhého vzorku řada číslo 1, v oblasti svarového kovu cca 0,3 mm od hranice ztavení (viz. Obr. 64). Hodnota tvrdosti v tomto konkrétním místě je 289 HV0,1. Vtisk byl proveden do velice jemné a pevné struktury (viz. Obr. 92).



Obr. 92 Struktura kovu v místě největší naměřené hodnoty tvrdosti 289 HV 0,1

8 Ekonomické vyhodnocení

Vzhledem k lepší interpretaci ekonomických výsledků bude vyhodnocení provedeno nikoliv v peněžních jednotkách, ale v nárůstu vyrobených kusů za směnu.

Pracovní směna se skládá z 27 000 sekund. Za jeden pracovní takt se současně vyrábí 2 díly (svařování se provádí současně dvěma roboty). Před optimalizací jeden takt trval 45,9s – všech 9 svarů na jednom výrobku se svařovalo rychlostí 10 mm/s. Díky analýze výsledků studie bylo možno zvýšit rychlost svařování koutových svarů na 13 mm/s a přeplátovaného spoje na 20 mm/s. Trvání nového taktu se tak zkrátilo o 5,1s, a činí 40,8s. Pracovní výsledek se tak zlepšil o 118 kusů a přesně z 940 kusů za směnu na 1058 kusů za směnu. Přírůstek výroby tak činí přes 12,5% bez započtení faktoru zmetkovitosti.

Také se ukázalo, že nově nastavené svařovací parametry jsou stabilnější k rozměrovým nestabilitám vstupního materiálu a dochází tak k menší zmetkovitosti svarových spojů. Zmetkovitost byla snížena z původních 5% na 1%. Při provedení přepočtu, celkový počet výrobků zachráněných před zmetkovitostí se zvýšil o 36 kusů. Celkový přírůstek tak činí 154 ks/směna, tj. 17,3%.

Dalším zefektivněním je díky provedeným optimalizacím uvolnění jednoho operátora, čímž se efektivita celého procesu taktéž zvýšila, díky zmenšení nákladů na provoz pracoviště.

9 Závěr

V první části experimentu této diplomové práce proběhlo robustní vyhodnocení velkého rozsahu proměnných svařovacích parametrů: rychlost podávání drátu, pozice drátu vůči základním materiálům a rychlosti svařování. Předmětem zkoumání bylo určení rozsahu rychlosti podávání drátu při různých rychlostech svařování při konstantní vzdálenosti hořáku od základního materiálu tak, aby parametry vyhovovaly jakostním normám. Dále při dodržení optimálních rychlostí podávání drátu byl určen rozsah vzdálenosti pozice svařovacího drátu od styku základních materiálů při různých rychlostech svařování. Díky analýze získaných výsledků, bylo možné sestavit parametrické rovnice, které matematickou řečí popisují specifika rozličných kombinací vstupních parametrů a jejich vztah k požadované jakosti výrobku.

Díky těmto rovnicím je možné i přes rozličné vstupní požadavky (v daném případě rozměrová nestabilita vstupního materiálu) určit optimální svařovací parametry pro daný proces. Výsledek předchozích dvou kapitol potvrdil funkčnost studie a pomohl zlepšit výrobní výkon o 17,3%. Zmetkovitost však nebyla úplně odstraněna a občas dochází k neopravitelným výrobním defektům na koutových svarových spojích.

Pro další zpřesnění představy o svařovacím procesu a potencialní snížení zmetkovitosti navrhuji provést další zkoušky rychlosti podávání drátu a rychlosti svařování pro jiné, zatím neověřené odchylky pozice drátu od základních materiálů např. -1,0 mm a +1,0 mm od původně nastavené hodnoty.

Zdroje

- [1] BODEA, M. New weldability model based on the welding parameters and hardness profile. *Powder Metallurgy and Advanced Materials: RoPM&AM 2017-8*, 2018: 115.
- [2] *Vapor pressures of the chemical elements* [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.powerstream.com/vapor-pressure.htm>
- [3] LIVELLI, G., LANGILL, T. Guidelines for Welding Galvanized Steel. *PCI journal* 43.3, 1998: 40-48.
- [4] KIM, Dong-Yoon, et al. Effect of Porosity on the Fatigue Behavior of Gas Metal Arc Welding Lap Fillet Joint in GA 590 MPa Steel Sheets. *Metals* 8.4, 2018: 241.
- [5] *The benefits of using metal cored wire* [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://polymet.wordpress.com/tag/metal-cored-wire/>
- [6] *Optimizing the robotic welding process* [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianindustrialmachinery/article/welding/optimizing-the-robotic-welding-process>
- [7] YU, J., Seung Mok Cho. Metal-cored welding wire for minimizing weld porosity of zinc-coated steel. *Journal of Materials Processing Technology* 249, 2017: 350-357.
- [8] SHREYAS, P., Bijayani Panda, Rakesh Kumar. Mechanical properties and microstructure of 316L-galvanized steel weld. *Materials Today: Proceedings*, 2019.
- [9] YANG, S. L., and R. Kovacevic. Welding of galvanized dual-phase 980 steel in a gap-free lap joint configuration. *Welding Journal* 88.8, 2009: 168-78.
- [10] GOYAL, S., Singh Sanjay. *A Review on Optimization of Welding Parameters in Arc Welding Process using Taguchi Parametric Optimization Technique*. 2017.
- [11] JEFFUS, L. F. *Welding: principles and applications. Eighth edition*. Boston, MA: Cengage Learning, 2019. ISBN 9781305494695.
- [12] YU, J., Dooyoung Kim. Effects of welding current and torch position parameters on minimizing the weld porosity of zinc-coated steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 95.1-4, 2018: 551-567.
- [13] IZUTANI, Shun, Kei Yamazaki, and Reiichi Suzuki. New welding process, "J-Solution™ Zn", suitable for galvanized steel in the automotive industry. *Kobelco Technol. Rev* 32, 2013: 16-23.
- [14] TSH5603G. Toyota engineering standard: Arc welding. Rev 9. Design Quality Inovation Div. TOYOTA MOTOR CORPORATION, 4.2014n. 1.

[15] TSH3109G. Toyota engineering standard: Galvannealed steels. Rev 19. Design Quality Inovation Div. TOYOTA MOTOR CORPORATION, 11.2015n. 1.

[16] ČSN EN ISO 6520-1. Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování. Praha: Český normalizační institut, 1.2008n. 1.

[17] ČSN EN ISO 5817. Svařování – Svarové spoje oceli. Niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) Určování stupňů kvality. Praha: Český normalizační institut, 8.2014n. 1.

[18] OK Aristorod 12.50. [online]. Copyright © 1998 [cit. 22.06.2020]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/ok-aristorod-12-50.cfm>

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Roztřídění svarů podle umístění porozity</i>	6
<i>Obr. 2 Legenda rozměrových parametrů svarů</i>	7
<i>Obr. 3 Záznam rozměrových parametrů vzorků</i>	7
<i>Obr. 4 Porovnání pevnosti v tahu vzorků</i>	7
<i>Obr. 5 Wöhlerův diagram poruch vzorků v závislosti na nominálním napětí</i>	7
<i>Obr. 6 Tavicí charakteristika MCW a plného drátu.[6]</i>	8
<i>Obr. 7 Depoziční poměr přídavných GMAW elektrod. 10 [lb/hr] je cca 1,26 [g/sec]. [5]</i>	8
<i>Obr. 8 3D zobrazení vlivu Si a Mn na množství porozity</i>	9
<i>Obr. 9 2D zobrazení vlivu Si a Mn na mužství porozity</i>	9
<i>Obr. 10 Tvrdost svarového spoje optimálního chemického složení MCW v závislosti na množství C</i>	10
<i>Obr. 11 Závislost mezi složením ochranné atmosféry a velikosti kráteru v roztavené lázni</i>	11
<i>Obr. 12 Počet porézních defektů ve svaru dlouhém 200 mm, v závislosti na ochranné atmosféře</i>	11
<i>Obr. 13 SEM mikrosnímek vzorku č. 1 místo nalezené trhliny</i>	12
<i>Obr. 14 SEM mikrosnímek vzorku č. 1 trhlina</i>	12
<i>Obr. 15 EDX bodu iniciáče trhliny</i>	12
<i>Obr. 16 EDX bodu konce trhliny</i>	12
<i>Obr. 17 Závislost meze povnosti na druhu vzorku</i>	13
<i>Obr. 18 Závislosti meze kluzu na druhu vzorku</i>	13
<i>Obr. 19 Ukázka pracovního úhlu hořáku</i>	13
<i>Obr. 20 Ukázka postupového úhlu hořáku</i>	13
<i>Obr. 21 Ukázka pozičního umístění drátu vůči základním materiálům</i>	13
<i>Obr. 22 Podíl množství porozity v závislosti na postupovém hořáku a proudu při pracovním úhlu hořáku 60° a pozici drátu +1 mm</i>	15
<i>Obr. 23 Podíl množství porozity v závislosti na postupovém úhlu hořáku a proudu při pracovním úhlu hořáku 50° a pozici drátu -1 mm</i>	15
<i>Obr. 24 Ukázka svařence řešeného v této kvalifikační práci</i>	15
<i>Obr. 25 Druhá svařovací pozice, přeplátovaný spoj</i>	17
<i>Obr. 26 Druhá svařovací pozice, identické koutové spoje</i>	17
<i>Obr. 27 První svařovací pozice, koutové spoje</i>	17
<i>Obr. 28 Závislost WFS – elektrický proud (RapidArc, 90%Ar 10%CO₂, výlet drátu 15 mm)</i>	22

Obr. 29 Závislost WFS – elektrické napětí pro TRIM 1.0 (RapidArc, 90%Ar 10%CO ₂ , výlet drátu 15 mm)	22
Obr. 30 Přeplátovaný spoj: závislost vyhovujícího WFS rozsahu na TS (WTP=0.5 mm)	23
Obr. 31 Přeplátovaný spoj: závislost vyhovujícího WTP rozsahu na TS (WFS _o dle 5. rovnice)	24
Obr. 32 Koutový spoj: závislost vyhovujícího WFS rozsahu na TS (WTP=1 mm)	25
Obr. 33 Koutový spoj: závislost vyhovujícího WTP rozsahu na TS (WFS _o)	26
Obr. 34 Mikrostruktura ZM SCGA440 světelná mikroskopie, ×500 (detail 4_1 obrázku 81)	29
Obr. 35 mikrostruktura ZM SCGA270C světelná mikroskopie, ×500 (detail 1_12 obrázku 41)	29
Obr. 36 Mikrostruktura ZM SCGA440 skenovací elektronová mikroskopie, ×1500.....	29
Obr. 37 Mikrostruktura a vměstek v ZM SCGA270C skenovací elektronová mikroskopie, ×2000	29
Obr. 38 EDX spektrum odhalující chemické složení vměstku z obrázku 37	30
Obr. 39 Tvrdost obou základních materiálů - HV0,1	30
Obr. 40 Report geometrického vyhodnocení svarového spoje – vzorek 1	32
Obr. 41 Mapa mikro snímků a lokace jednotlivých řad HV0,1 vtisků – vzorek 1	33
Obr. 42 Detail 1_14, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200	34
Obr. 43 Detail 1_10, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200	34
Obr. 44 Detail 1_9, kořen svaru ×500.....	34
Obr. 45 Detail 1_8, hranice ztavení SCGA270C – svarový kov ×500.....	34
Obr. 46 Detail 1_11, hranice ztavení SCGA270C – svarový kov ×200.....	34
Obr. 47 Detail 1_6, svarový kov ×500.....	34
Obr. 48 Detail 1_8, hranice ztavení SCGA270C – svarový kov ×1500.....	35
Obr. 49 Detail 1_10, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov ×2000	35
Obr. 50 Detail 1_6, svarový kov ×1000.....	35
Obr. 51 Detail 1_6, svarový kov ×6500.....	35
Obr. 52 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 1, řada 1	36
Obr. 53 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 1, řada 2	36
Obr. 54 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA270C, vzorek 1, řada 3	36
Obr. 55 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA270C, vzorek 1, řada 4.....	36
Obr. 56 Report geometrického vyhodnocení svarového spoje – vzorek 2	37
Obr. 57 Mapa mikro snímků a lokace jednotlivých řad HV0,1 vtisků – vzorek 2.....	37
Obr. 58 Detail 2_17, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200	38
Obr. 59 Detail 2_14, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200	38
Obr. 60 Detail 2_13, kořen svaru ×200.....	38
Obr. 61 Detail 2_9, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×500	38
Obr. 62 Detail 2_16, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200	38
Obr. 63 Detail 2_10, svarový kov ×500.....	38
Obr. 64 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 2, řada 1	39
Obr. 65 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 2, řada 2	39
Obr. 66 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 2, řada 3	39
Obr. 67 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 2, řada 4	39
Obr. 68 Report geometrického vyhodnocení svarového spoje – vzorek 3	40
Obr. 69 Mapa mikro snímků a lokace jednotlivých řad HV0,1 vtisků – vzorek 3.....	41
Obr. 70 Detail 3_10, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200	42
Obr. 71 Detail 3_10, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×500	42
Obr. 72 Detail 3_9, kořen svaru ×100.....	42
Obr. 73 Detail 3_8, hranice ztavení SCGA270C – svarový kov ×500.....	42
Obr. 74 Detail 3_7, hranice ztavení SCGA270C – svarový kov ×200.....	42

<i>Obr. 75 Detail 3_5, svarový kov ×500</i>	42
<i>Obr. 76 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 3, řada 1</i>	43
<i>Obr. 77 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 3, řada 2</i>	43
<i>Obr. 78 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA270C, vzorek 3, řada 3</i>	43
<i>Obr. 79 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA270C, vzorek 3, řada 4</i>	43
<i>Obr. 80 Report geometrického vyhodnocení svarového spoje – vzorek 4</i>	44
<i>Obr. 81 Mapa mikro snímků a lokace jednotlivých řad HV0,1 vtisků – vzorek 4</i>	44
<i>Obr. 82 Detail 4_10, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200</i>	45
<i>Obr. 83 Detail 4_14, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×500</i>	45
<i>Obr. 84 Detail 4_12, kořen svaru ×200</i>	45
<i>Obr. 85 Detail 4_3, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200</i>	45
<i>Obr. 86 Detail 4_11, hranice ztavení SCGA440 – svarový kov, ×200</i>	46
<i>Obr. 87 Detail 4_5, svarový kov ×500</i>	46
<i>Obr. 88 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 4, řada 1</i>	46
<i>Obr. 89 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 4, řada 2</i>	46
<i>Obr. 90 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 4, řada 3</i>	46
<i>Obr. 91 Průběh tvrdostí svarový kov – SCGA440, vzorek 4, řada 4</i>	46
<i>Obr. 92 Struktura kovu v místě největší naměřené hodnoty tvrdosti 289 HV 0,1</i>	47

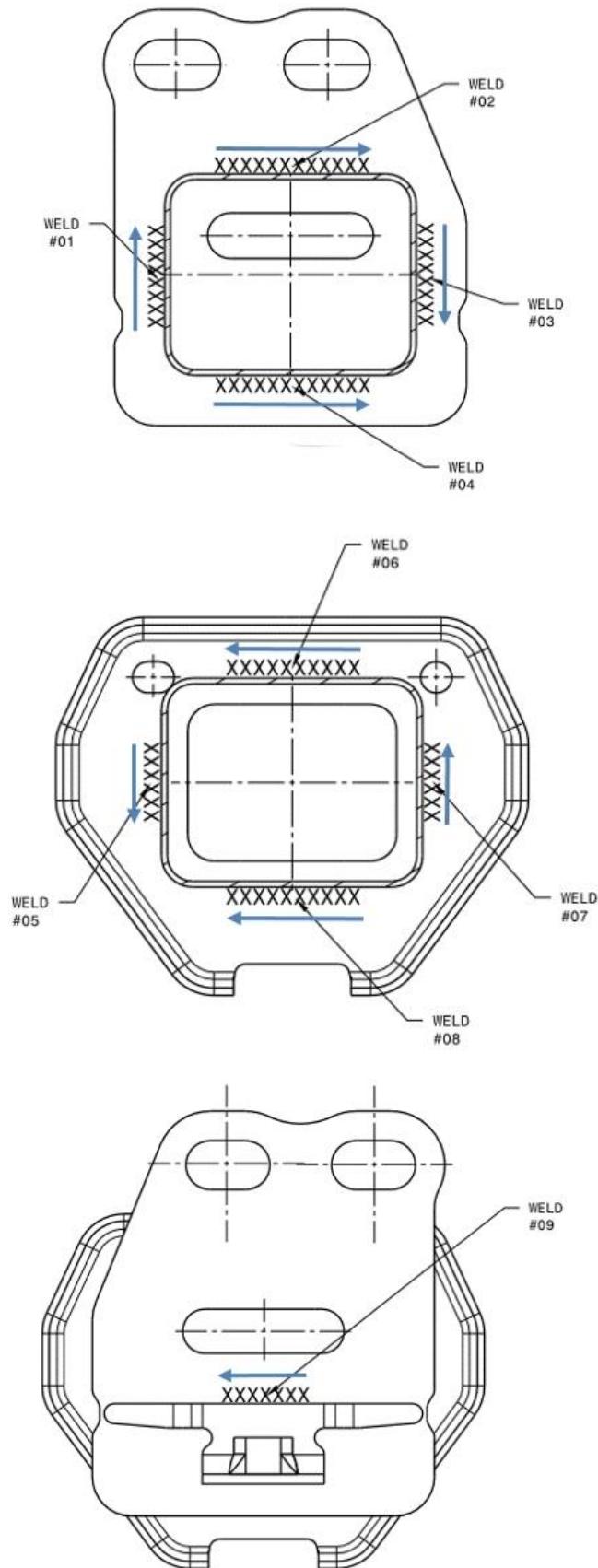
Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Porovnání Ceq a 5PL svařitelnostních klasifikačních systémů</i>	5
<i>Tab. 2 Svařovací parametry použité ve studii vlivu porozity na vlastností svarových spojů</i>	6
<i>Tab. 3 Svařovací parametry ve studii vlivu chemického složení drátu na porozitu spojů</i>	8
<i>Tab. 4 Svařovací parametry ve studii vlivu dvou ochranných atmosfér na porozitu spojů</i>	11
<i>Tab. 5 Specifikace svarových spojů pro studium vlivů zinkové vrstvy na jejich vlastností</i>	12
<i>Tab. 6 Svařovací parametry použité ve studii vlivu úhlu hořáku na porozitu spojů</i>	14
<i>Tab. 7 Specifikace základních materiálů [14] [15]</i>	16
<i>Tab. 8 Předepsané jakostní požadavky svarových spojů [14, 16, 17]</i>	18
<i>Tab. 9 Specifikace vstupujících parametrů GMAW</i>	20
<i>Tab. 10 Charakteristika zvoleného přídavného materiálu</i>	20
<i>Tab. 11 Návrh optimálních parametrů pro spoj přeplátovaný</i>	27
<i>Tab. 12 Návrh optimálních parametrů pro spoj koutový</i>	27
<i>Tab. 13 Schéma vzorků pro následné vyhodnocení</i>	31
<i>Tab. 14 Svařovací parametry vzorku 1, koutový spoj – nejnižší dovolený příkon</i>	32
<i>Tab. 15 Svařovací parametry vzorku 2, přeplátovaný spoj – nejnižší dovolený příkon</i>	36
<i>Tab. 16 Svařovací parametry vzorku 3, koutový spoj – nejvyšší dovolený příkon</i>	39
<i>Tab. 17 Svařovací parametry vzorku 4, přeplátovaný spoj – nejvyšší dovolený příkon</i>	43

Grafická část – seznam příloh

Příloha A	Mapa svarů
Příloha B	pWPS koutový spoj
Příloha C	pWPS přeplátovaný spoj
Příloha D	Pohybový program Fanuc100iC, pořadí svarů
Příloha E	Mapa mikrostruktur vzorek 1
Příloha F	Mapa mikrostruktur vzorek 2
Příloha G	Mapa mikrostruktur vzorek 3
Příloha H	Mapa mikrostruktur vzorek 4

Příloha A: Mapa svarů



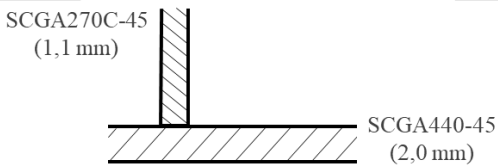
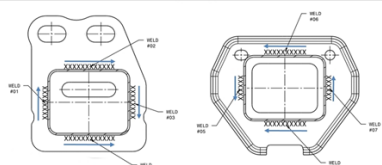
Příloha B: pWPS koutový spoj

	Specifikace svařovacího postupu		Číslo dokladu WPS: WPS Reference № : pWPS_1	
	pWPS Manufacturer's Preliminary Welding Procedure Specification		Číslo dokladu WPQR: WPQR Reference № : ---	
Místo: Location:	Plzeň	Zkušební orgán: Examiner:	Shape Corp. CZ s.r.o	

Postup svařování výrobce: Manufacturer's Welding Procedure:

Způsob přípravy a čištění: Method of Preparation and Cleaning:	Odmaštění		
Výrobce: Manufacturer:	Shape Corp. CZ s.r.o	Specifikace zákl. mater.: Parent Material Specification:	SCGA270C/440-45
Jméno svařeče: Welder's Name:	Bc. Michael Tochylin	Tloušťka součásti [mm]: Material Thickness [mm]:	1,1/2,0
Svařovací proces: Welding Proces:	135 (MAG)	Vnější průměr [mm]: Outside Diameter [mm]:	Plech
Druh svaru: Joint Type:	Koutový	Poloha svařování: Welding Position:	PB

Údaje k přípravě úkosu (výkres): Weld Preparation Details (Sketch):

Tvar spoje Joint Design	Postup (sled) svařování Welding Sequences
	

Podrobné údaje ke svařování: Welding details:


Housenka Run	Proces Process	Prům. příd. mat. Size of Filler Mat.	Proud [A] Curr. [A]	Napětí [V] Volt [V]	Druh proudu polar. Type of Curr. - polar.	Posuv drátu Wire Feed Speed	Rychlost svařování Travel speed	Pozice drátu Wire Target Point
1	135	1,0	204	23,6	DC - =	140 mm/s	13 mm/s	1,5 mm

Přídavný mat. – značka, zařazení: Filler Metal Classif., Trade Name:	OK Aristorod 12,50		
Zvláštní předpisy pro sušení: Any Special Backing or Drying:			
Plyn – tavíadlo: Gas - Flux:		Průtok plynu: Gas, Flow Rate:	16 l/min
Ochranný plyn: Shielding:	---	Ochranný plyn: Shielding:	90% Ar + 10 % CO ₂
Ochrana kořene: Backing:	---	Ochrana kořene: Backing:	---
W elektr./typ, průměr Tungsten Electr.-Type, Size	---	Další informace *): Other Information *):	---
Údaje o drážkování/ochraně kořenu: Details of Back gouging/Backing:	---	Rozkvy (max. š. housenky) Eg. Weaving (max. width of run)	---
Teplota předehřevu: Preheat Temperature:	---	Oscilace/amplituda, frekvence, doba prodlevy: Oscill./Amplit., Freq., dwell time	---
Teplota interpassu: Interpass temperature:	---	Údaje o puls. svařování: Pulse welding date:	RapidArc
Tepelné zpracování / vytvrzování: Post. Weld Head Heatment/ Ageiging	---	Vzdálenost kontakt. dýzy: Stand off Distance:	15 mm
Doba, teplota, postup: Time, Temperature, Method:	---	Svařovací zařízení: Welding Machine:	Lincoln Electric S350CE POWER WAVE

*) pokud je požadováno , If Required

Výrobce: Manufacturer:	Shape Corp. CZ s.r.o	Zkušební orgán: Examiner:	Ing. Miroslav Vomáčka, IWE
Jméno, datum, podpis: Name, Date, Signature:	Jiří Kožnář, IWT	Jméno, datum, podpis: Name, Date, Signature:	Ing. Miroslav Vomáčka, IWE


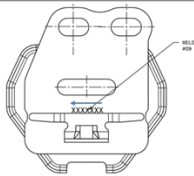
Príloha C: pWPS Přeplátovaný spoj

	Specifikace svařovacího postupu pWPS Manufacturer's Preliminary Welding Procedure Specification		Číslo dokladu WPS: WPS Reference № : pWPS_2
			Číslo dokladu WPQR: WPQR Reference № :
Místo: Location:	Plzeň	Zkušební orgán: Examiner:	Shape Corp. CZ s.r.o

Postup svařování výrobce:
Manufacturer's Welding Procedure:

Způsob přípravy a čištění: Method of Preparation and Cleaning:	Odmaštění		
Výrobce: Manufacturer:	Shape Corp. CZ s.r.o	Specifikace zákl. mater.: Parent Material Specification:	SCGA440/440-45
Jméno svařeče: Welder's Name:	Bc. Michael Tochylin	Tloušťka součásti [mm]: Material Thickness [mm]:	1,1/2,0
Svařovací proces: Welding Process:	135 (MAG)	Vnější průměr [mm]: Outside Diameter [mm]:	Plech
Druh svaru: Joint Type:	Přeplátovaný	Poloha svařování: Welding Position:	PB

Údaje k přípravě úkosu (výkres):
Weld Preparation Details (Sketch):

Tvar spoje Joint Design	Postup (sled) svařování Welding Sequences
SCGA440-45 (2,0 mm)  SCGA440-45 (2,0 mm)	

Podrobné údaje ke svařování:
Welding details:

Housenka Run	Proces Process	Prům. příd. mat. Size of Filler Mat.	Proud [A] Curr. [A]	Napětí [V] Volt [V]	Druh proudu polar. Type of Curr. - polar.	Posuv drátu Wire Feed Speed	Rychlost svařování Travel speed	Pozice drátu Wire Target Point
1	135	1,0	297	34,7	DC - =	231 mm/s	20 mm/s	0,9 mm

Přídavný mat. – značka, zařazení: Filler Metal Classif., Trade Name:	OK Aristorod 12,50		
Zvláštní předpisy pro sušení: Any Special Backing or Drying:			
Plyn – tavidlo: Gas - Flux:		Průtok plynu: Gas, Flow Rate:	16 l/min
Ochranný plyn: Shielding:	---	Ochranný plyn: Shielding:	90% Ar + 10 % CO ₂
Ochrana kořene: Backing:	---	Ochrana kořene: Backing:	---
W elektr./typ, průměr Tungsten Electr.-Type, Size	---	Další informace *): Other Information *):	---
Údaje o drážkování/ochraně kořenu: Details of Back gouging/Backing:	---	Rozkvy (max. š. housenky) Eg. Weaving (max. width of run)	---
Teplota předehřevu: Preheat Temperature:	---	Oscilace/amplituda, frekvence, doba prodlevy: Oscill./Amplit., Freq., dwell time	---
Teplota interpassu: Interpass temperature:	---	Údaje o puls. svařování: Pulse welding date:	RapidArc
Tepelné zpracování / vytvrzování: Post. Weld Head Heatment/ Ageiging	---	Vzdálenost kontakt. dýzy: Stand off Distance:	15 mm
Doba, teplota, postup: Time, Temperature, Method:	---	Svařovací zařízení: Welding Machine:	Lincoln Electric S350CE POWER WAVE

*) pokud je požadováno , If Required

Výrobce: Manufacturer:	Shape Corp. CZ s.r.o	Zkušební orgán: Examiner:	Ing. Miroslav Vomáčka, IWE
Jméno, datum, podpis: Name, Date, Signature:	Jiří Kožnár, IWT	Jméno, datum, podpis: Name, Date, Signature:	Ing. Miroslav Vomáčka, IWE

Příloha D: Pohybový program Fanuc100iC, pořadí svarů

```
/PROG T_402B_FIX_A_POS_1

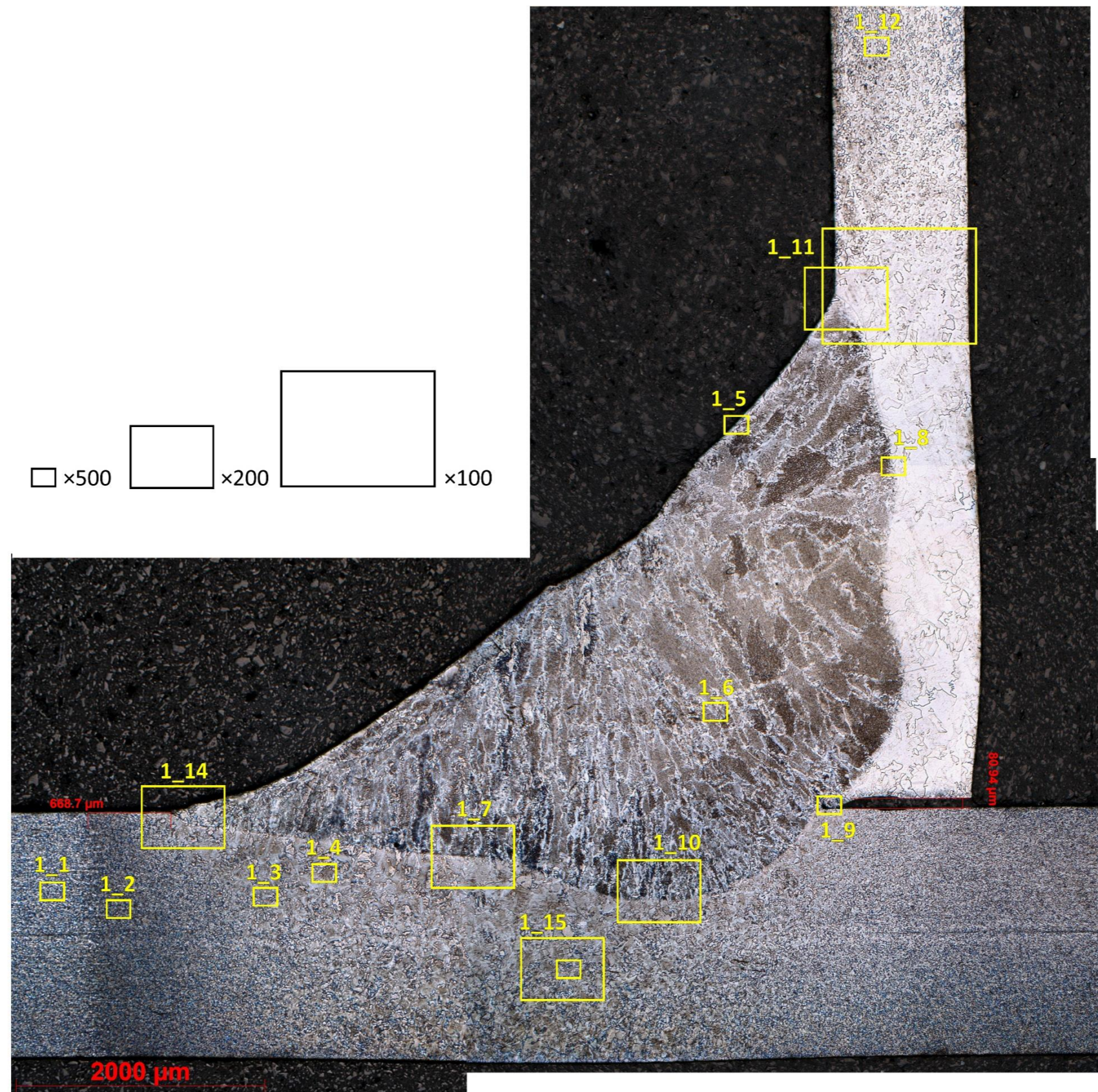
1:J PR[1:PERCH] 100% CNT100 ;
2: ;
3: UTOOL_NUM=2 ;
4: UFRAME_NUM=1 ;
5: ;
6: WAIT DI[9:OFF:HOLD ROB AT ROTATION]=OFF ;
7: IF DI[61:OFF:FIX A PART 2]=OFF, JMP LBL[10] ;
8: WAIT DI[30:OFF:FIX A POS1 (-180)]=ON ;
9: ;
10:J P[1] 100% CNT100 ;
11:J P[2] 100% CNT100 ;
12:J P[3] 100% CNT100 ;
13: ;
14: !WELD#04 (30mm) ;
15:L P[4] 1000mm/sec FINE
   : Weld Start[13,6] ;
16:L P[6] WELD_SPEED FINE ;
17: Weld End[13,6] ;
18: CALL RECORD_WELD(6) ;
19: !----- ;
20: ;
21:J P[7] 100% CNT100 ;
22:J P[8] 100% CNT70 ;
23: ;
24: !WELD#01 (20mm) ;
25:L P[9] 1000mm/sec FINE
   : Weld Start[13,7] ;
26:L P[10] WELD_SPEED FINE ;
27: Weld End[13,7] ;
28: CALL RECORD_WELD(7) ;
29: !----- ;
30: ;
31:J P[11] 100% CNT100 ;
32:J P[12] 80% CNT100 ;
33:J P[13] 70% CNT100 ;
34: ;
35: !WELD#02 (30mm) ;
36:L P[14] 800mm/sec FINE
   : Weld Start[13,8] ;
37:L P[16] WELD_SPEED FINE ;
38: Weld End[13,8] ;
39: CALL RECORD_WELD(8) ;
40: !----- ;
41: ;
42:L P[17] 2000mm/sec CNT10 ;
43:J P[24] 100% CNT100 ;
44:J P[18] 100% CNT10 ;
45:J P[19] 100% CNT100 ;
46: ;
47: !WELD#03 (20mm) ;
48:L P[20] 1000mm/sec FINE
   : Weld Start[13,9] ;
49:L P[21] WELD_SPEED FINE ;
50: Weld End[13,9] ;
51: CALL RECORD_WELD(9) ;
52: !----- ;
53: ;
54:J P[22] 100% CNT80 ;
55:J P[23] 100% CNT100 ;
56: ;
57: LBL[10] ;
58: ;
59:J PR[1:PERCH] 100% FINE ;
```

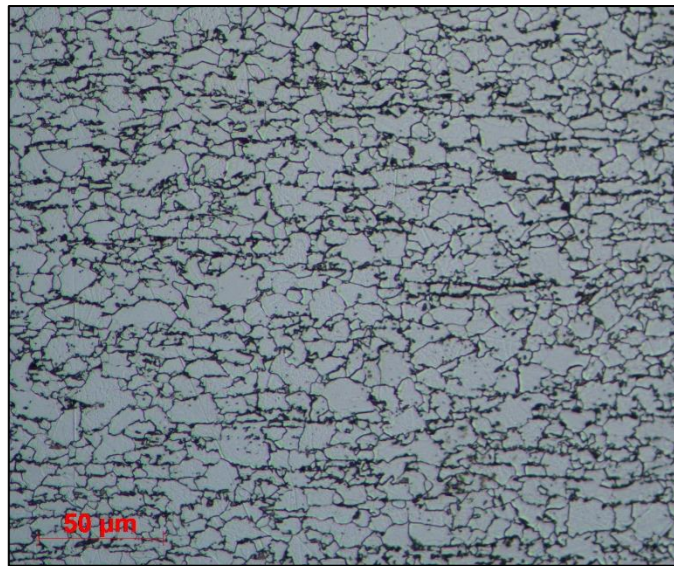
```
/PROG T_402B_FIX_A_POS_5

1:J PR[1:PERCH] 100% CNT100 ;
2: ;
3: UTOOL_NUM=2 ;
4: UFRAME_NUM=1 ;
5: ;
6: WAIT DI[9:OFF:HOLD ROB AT ROTATION]=OFF ;
7: IF DI[60:OFF:FIX A PART 1]=OFF,JMP LBL[10] ;
8: WAIT DI[34:OFF:FIX A POS5(0)]=ON ;
9: DO[269:OFF:INCH BACKWARD]=PULSE,0.6sec ;
10: ;
11:J P[1] 100% CNT100 ;
12:J P[2] 100% CNT20 ;
13:J P[3] 100% CNT20 ;
14: ;
15: !WELD#05 (15mm) ;
16:J P[4] 50% FINE
: Weld Start[13,1] ;
17:L P[5] WELD_SPEED FINE ;
18: Weld End[13,1] ;
19: CALL RECORD_WELD(1) ;
20: !----- ;
21: ;
22:J P[6] 100% CNT20 ;
23:J P[7] 100% CNT20 ;
24:J P[8] 100% CNT100 ;
25:J P[9] 100% CNT100 ;
26: ;
27: !WELD#08 (25mm) ;
28:L P[10] 1000mm/sec FINE
: Weld Start[13,2] ;
29:L P[12] WELD_SPEED FINE
: Weld End[13,2] ;
30: CALL RECORD_WELD(2) ;
31: !----- ;
32: ;
33:J P[13] 100% CNT100 ;
34:J P[14] 100% CNT100 ;
35:J P[15] 100% CNT100 ;
36: ;
37: !WELD#07 (15mm) ;
38:L P[16] 1000mm/sec FINE
: Weld Start[13,3] ;
39:L P[17] WELD_SPEED FINE
: Weld End[13,3] ;
40: CALL RECORD_WELD(3) ;
41: !----- ;
42: ;
43:J P[18] 100% CNT60 ;
44:J P[19] 100% CNT60 ;
45:J P[32] 100% CNT100 ;
46: ;
47: !WELD#06 (25mm) ;
48:L P[20] 1000mm/sec FINE
: Weld Start[13,4] ;
49:L P[11] WELD_SPEED CNT100 ;
50:L P[21] WELD_SPEED FINE
: Weld End[13,4] ;
51: CALL RECORD_WELD(4) ;
52: !----- ;
53: ;
54:J P[22] 100% CNT100 ;
55:J P[23] 100% CNT100 ;
56:J P[24] 100% CNT100 ;
57:J P[26] 100% CNT20 ;
58: ;
59: !WELD#09 (17.2mm) ;
60:L P[27] 1000mm/sec FINE
: Weld Start[13,5] ;
61:L P[28] WELD_SPEED FINE ;
62: Weld End[13,5] ;
63: CALL RECORD_WELD(5) ;
64: !----- ;
65: ;
```

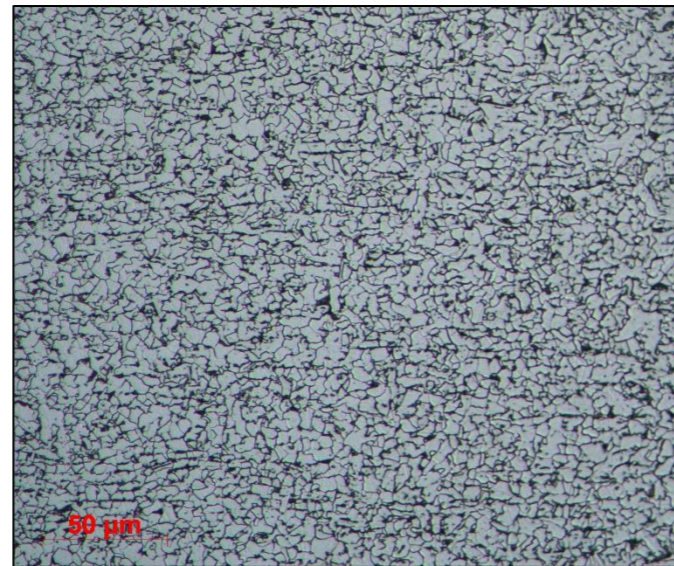
```
66:L P[29] 2000mm/sec CNT100 ;  
67:J P[30] 100% CNT100 ;  
68: ;  
69: LBL[10] ;  
70: ;  
71:J PR[1:PERCH] 100% FINE ;
```

Příloha E: Mapa mikrosnímků vzorek 1

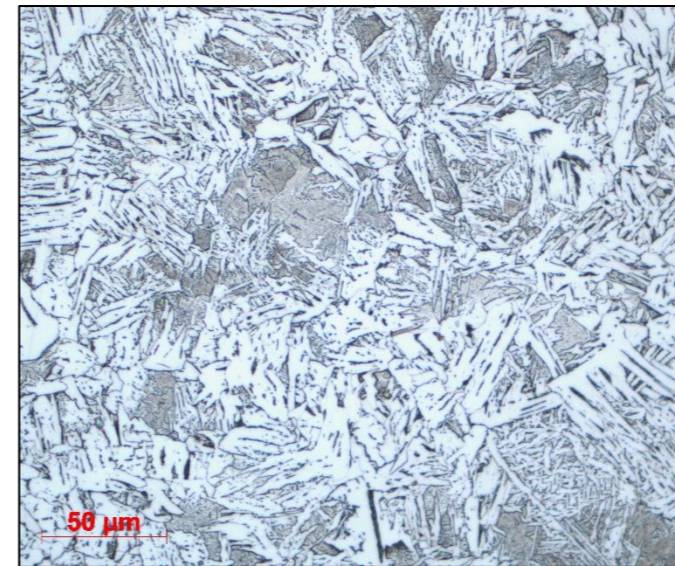




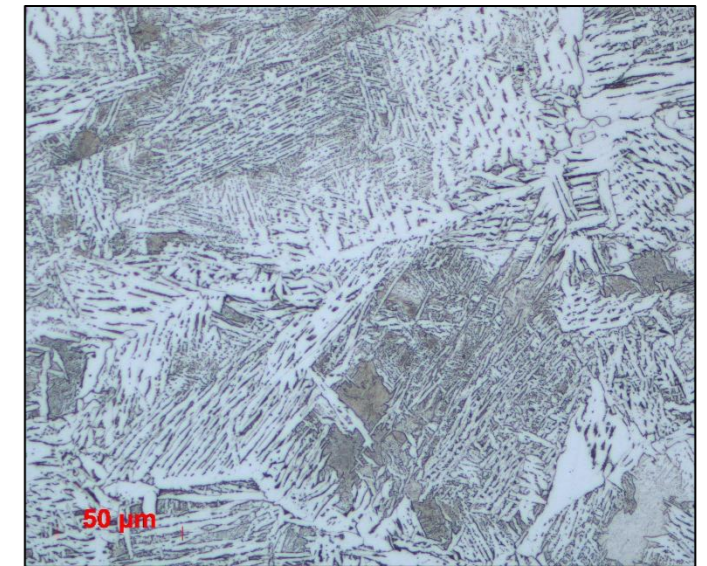
Detail 1_1 ×500



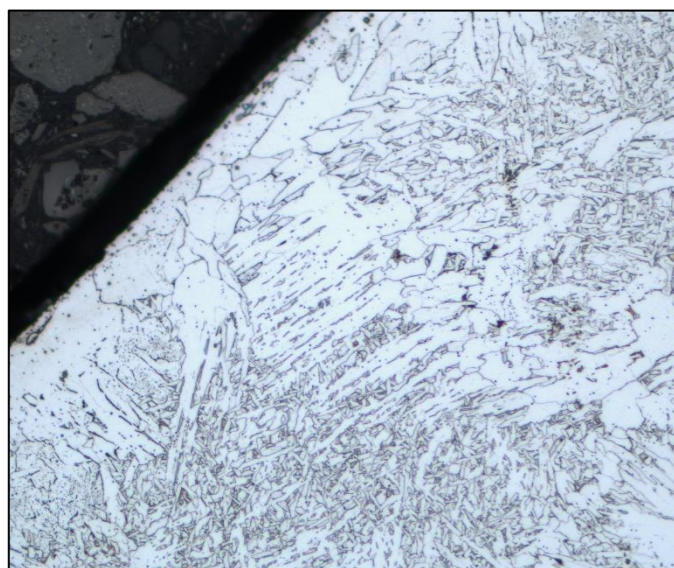
Detail 1_2 ×500



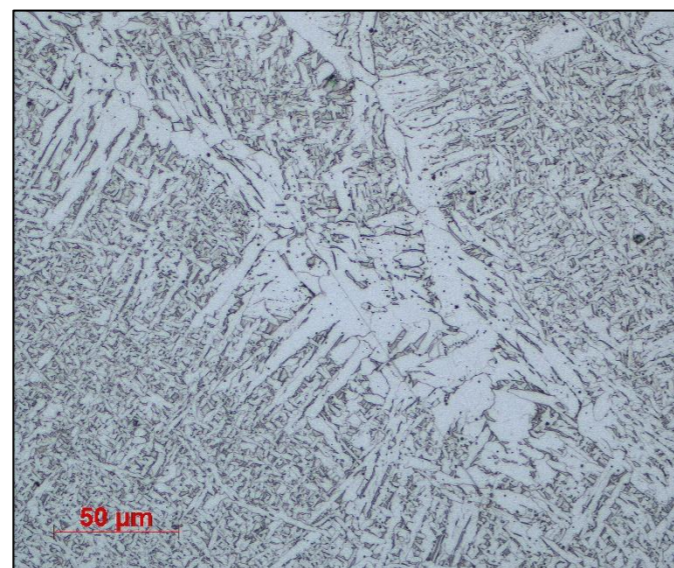
Detail 1_3 ×500



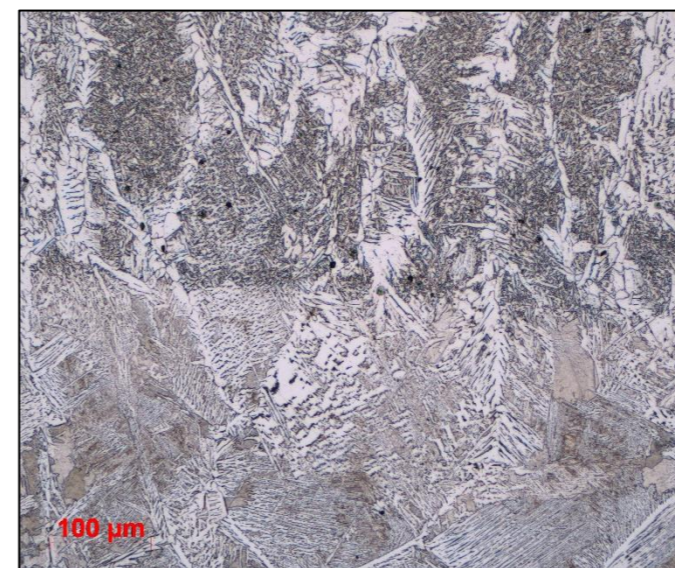
Detail 1_4 ×500



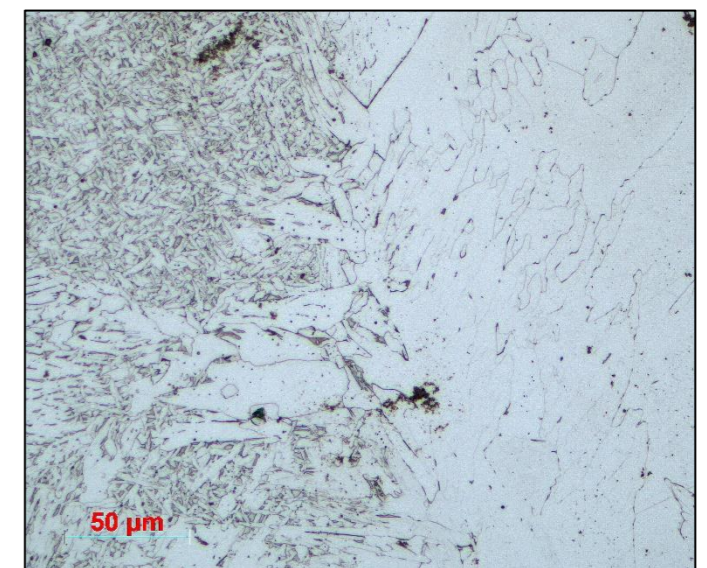
Detail 1_5 ×500



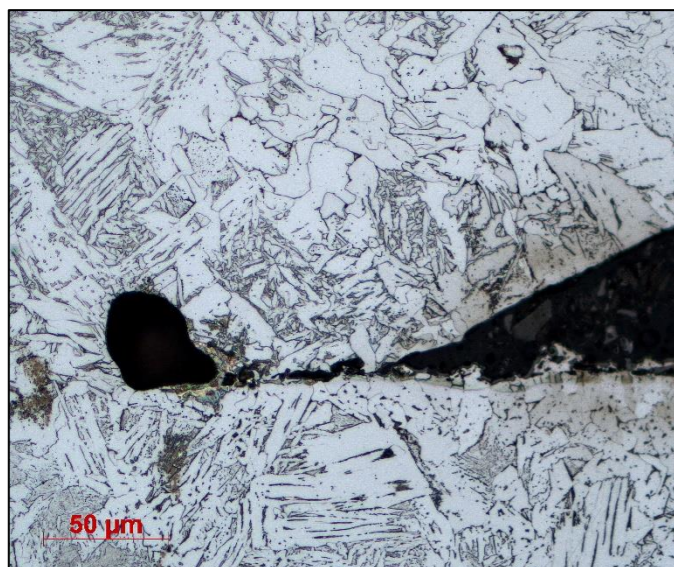
Detail 1_6 ×500



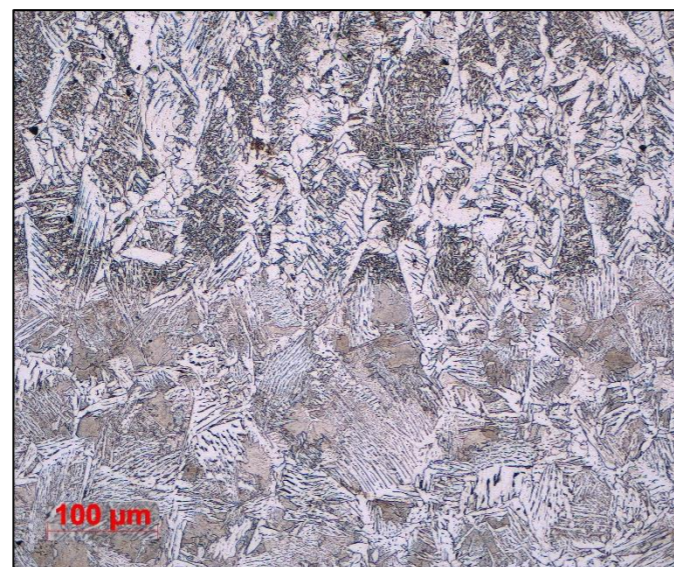
Detail 1_7 ×200



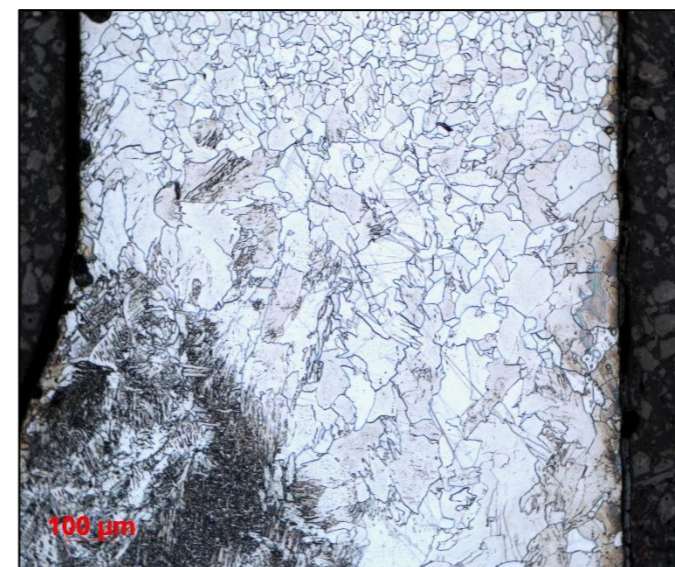
Detail 1_8 ×500



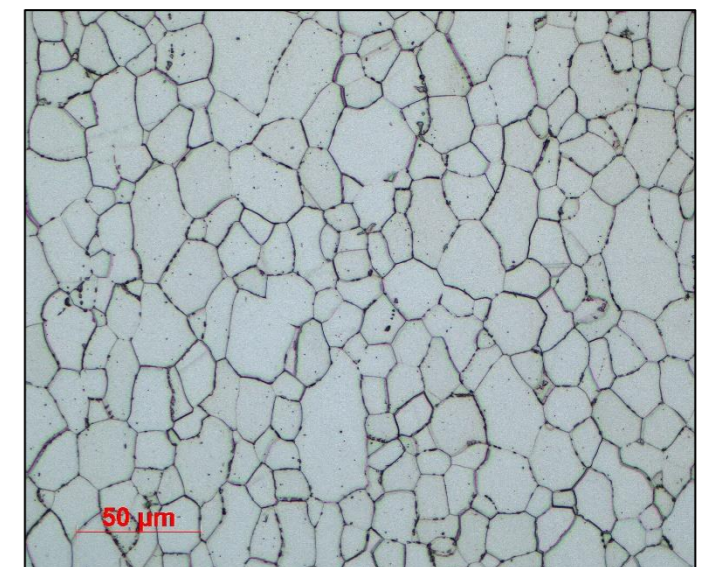
Detail 1_9 ×500



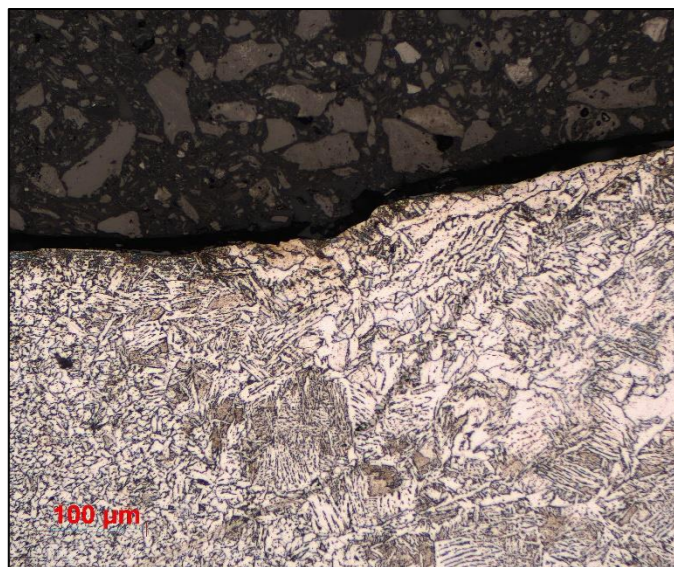
Detail 1_10 ×200



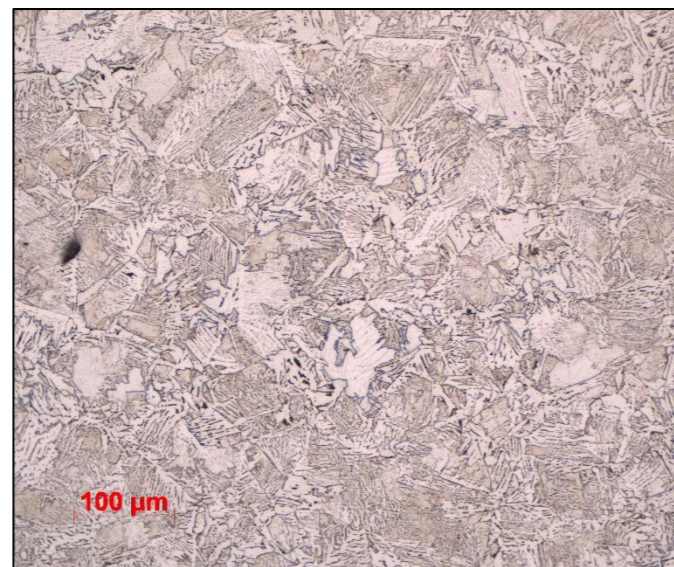
Detail 1_11 ×100



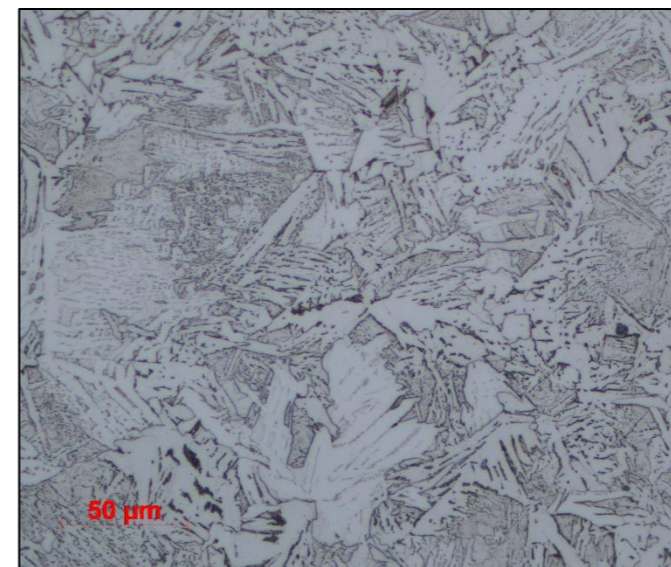
Detail 1_12 ×500



Detail 1_14 ×200

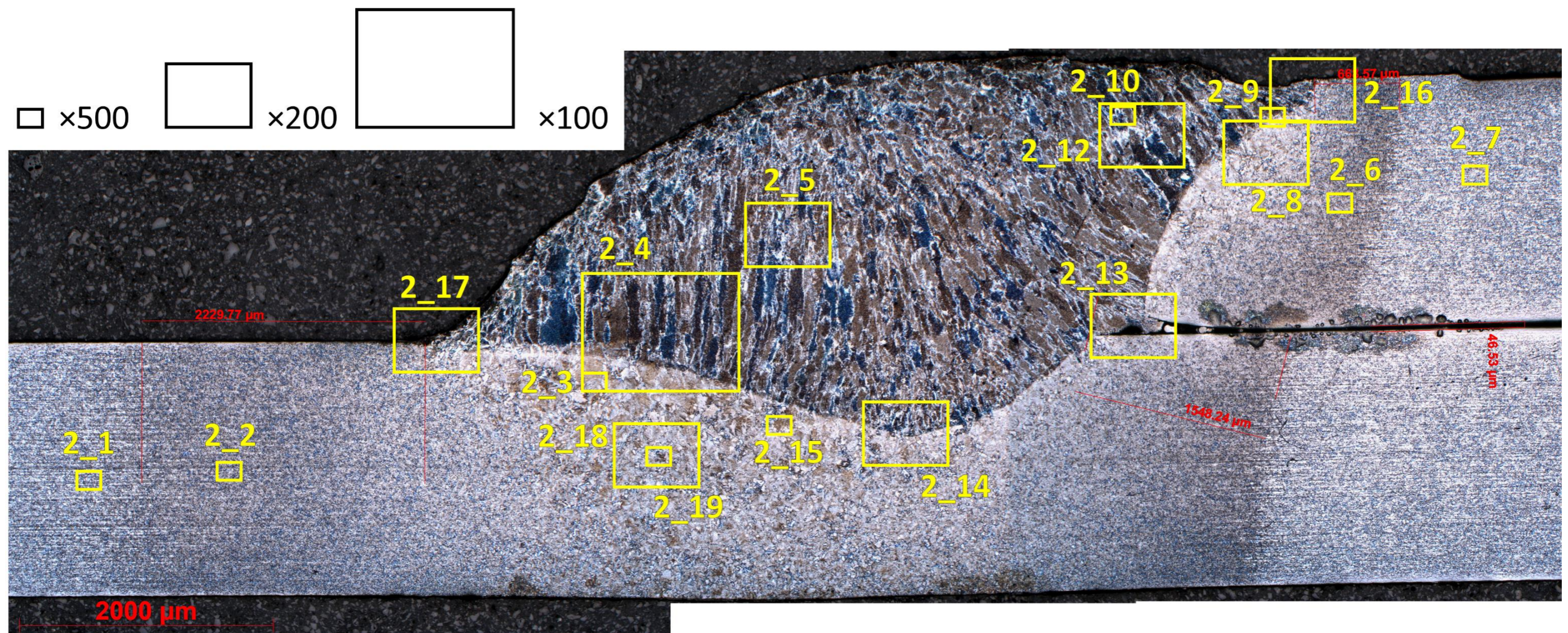


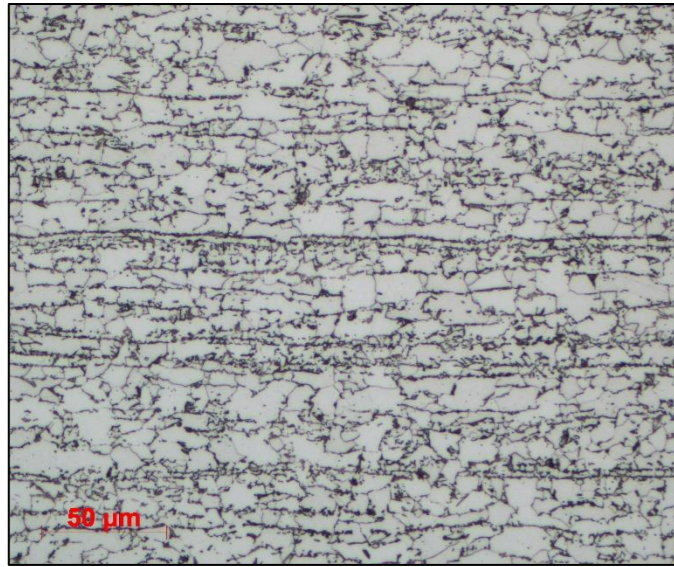
Detail 1_15 ×200



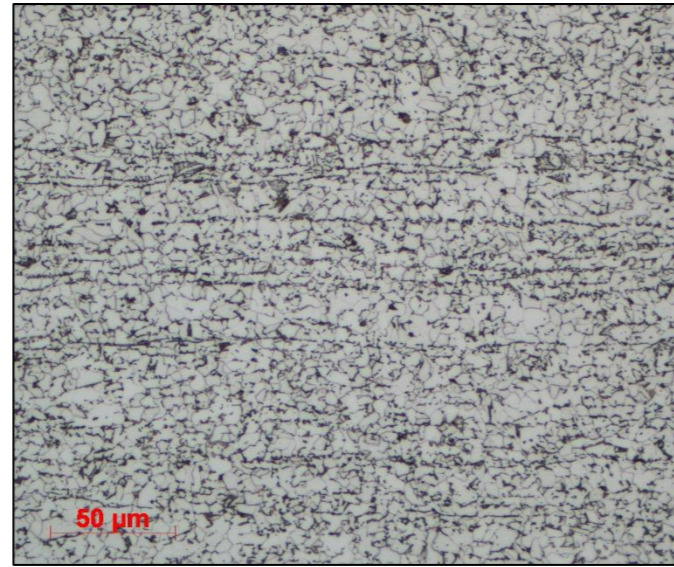
Detail 1_15 ×500

Příloha F: Mapa mikrosnímků vzorek 2

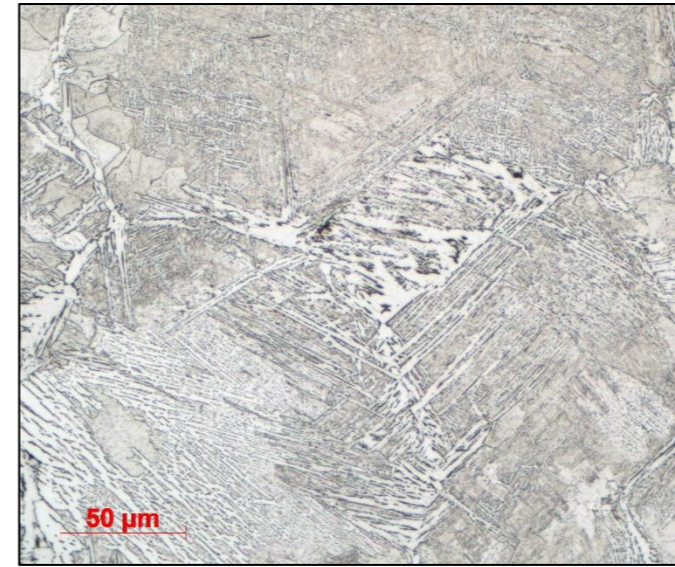




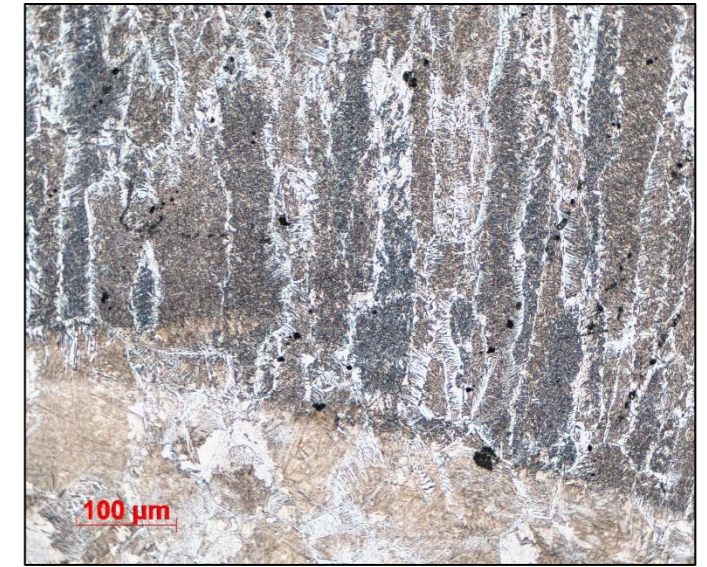
Detail 2_1 ×500



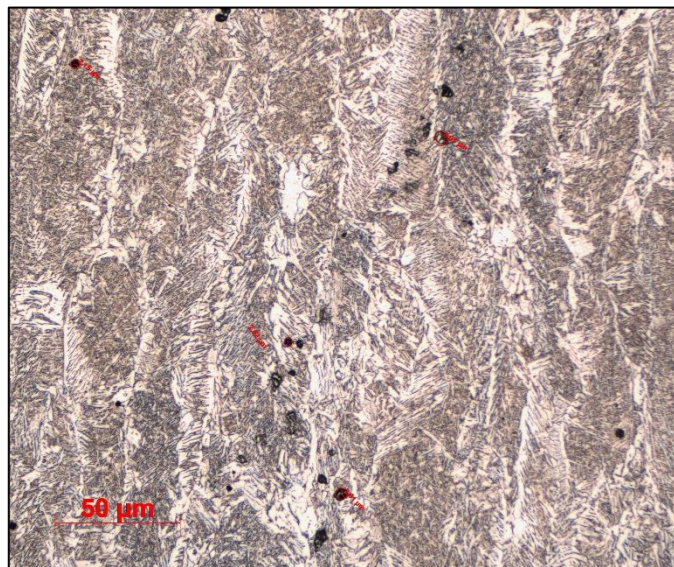
Detail 2_2 ×500



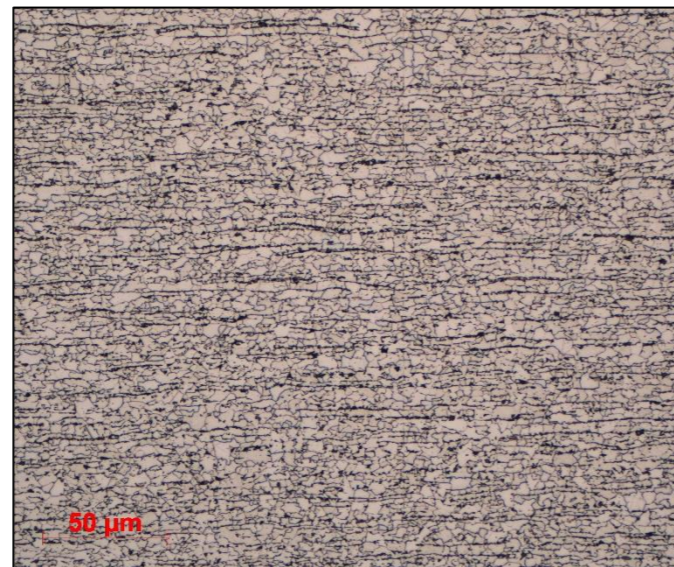
Detail 2_3 ×500



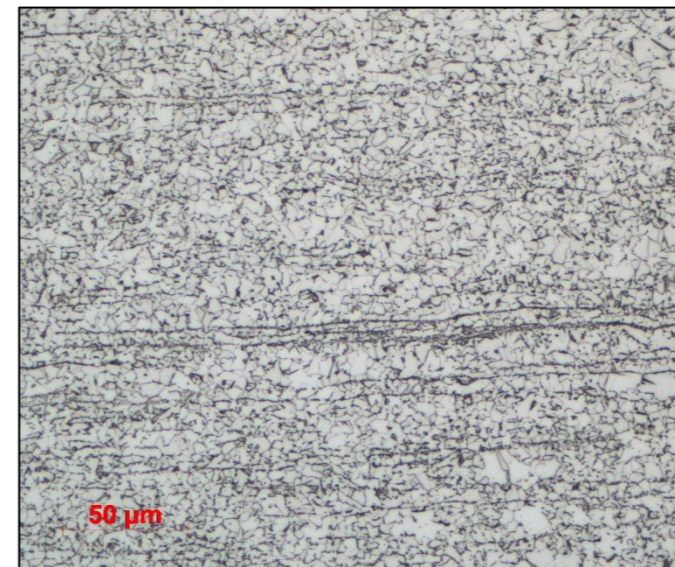
Detail 2_4 ×100



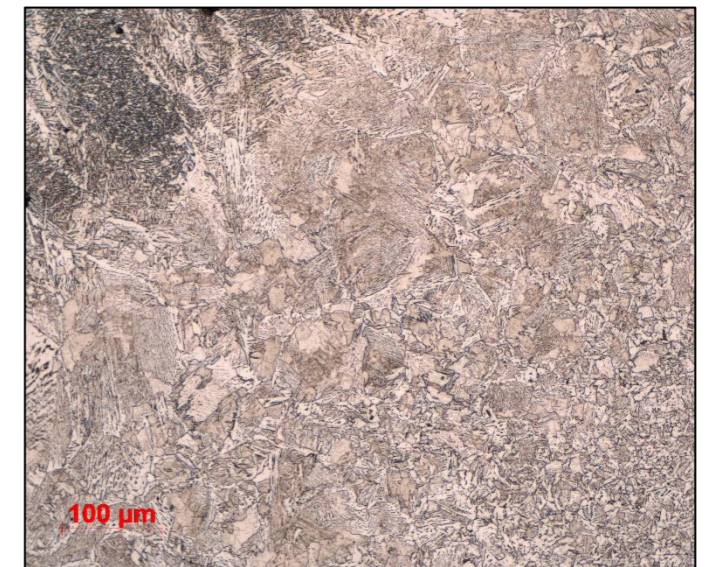
Detail 2_5 ×200



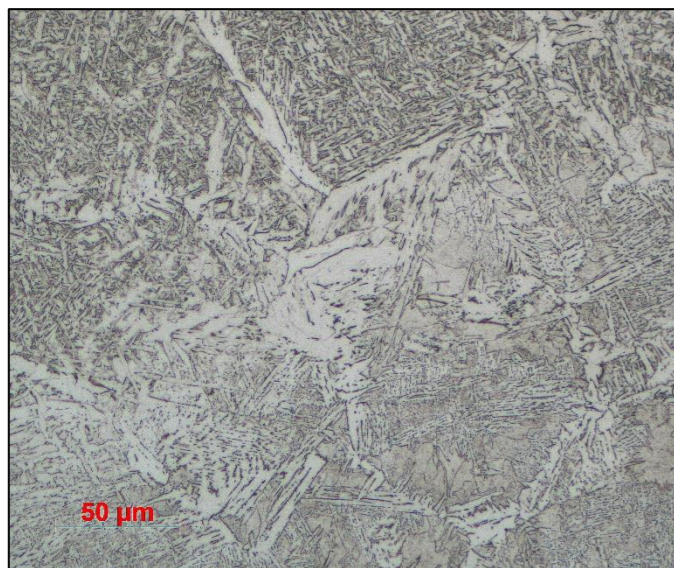
Detail 2_6 ×500



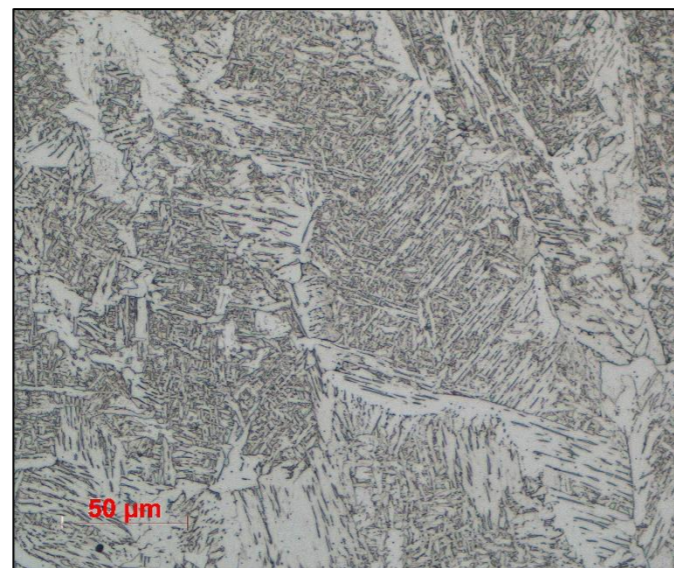
Detail 2_7 ×500



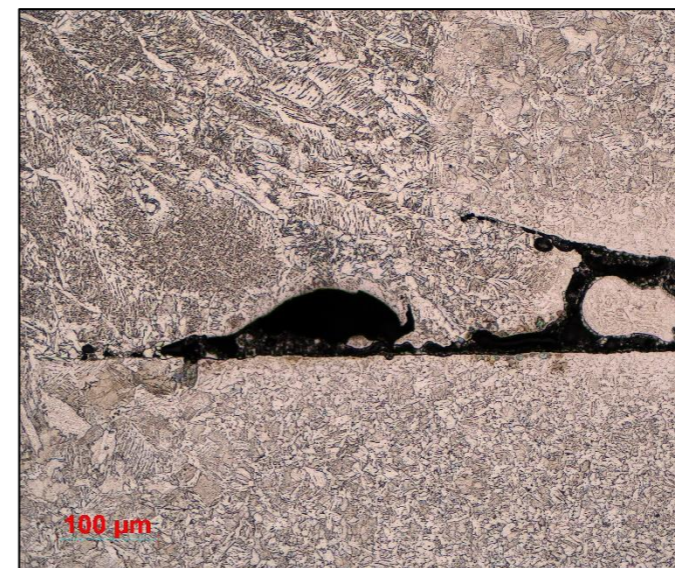
Detail 2_8 ×200



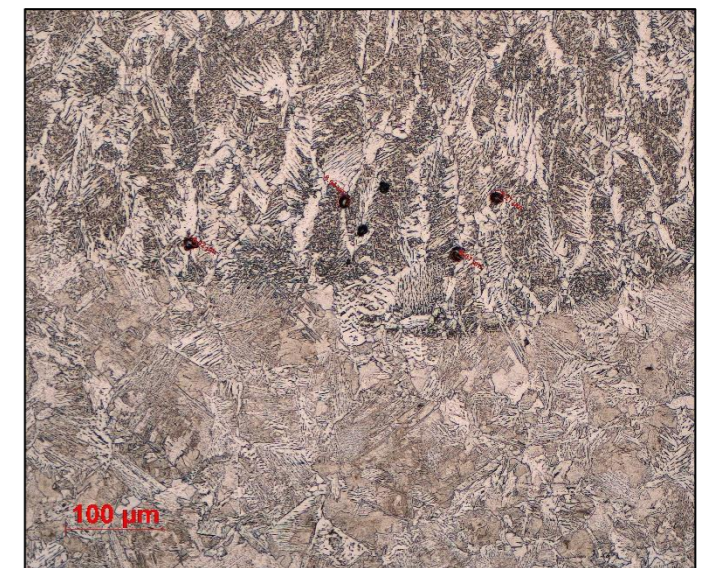
Detail 2_9 ×500



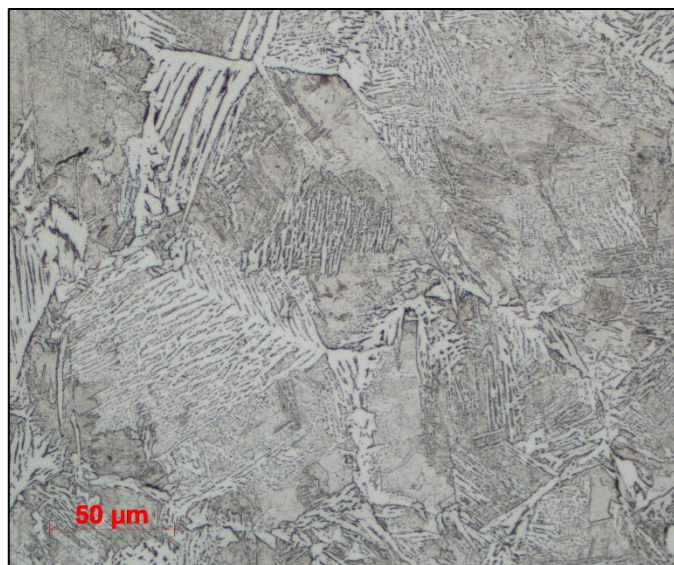
Detail 2_10 ×500



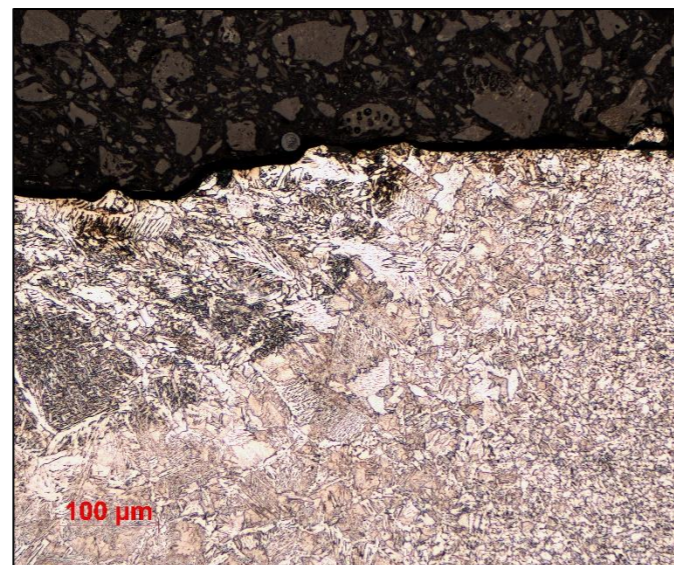
Detail 2_13 ×500



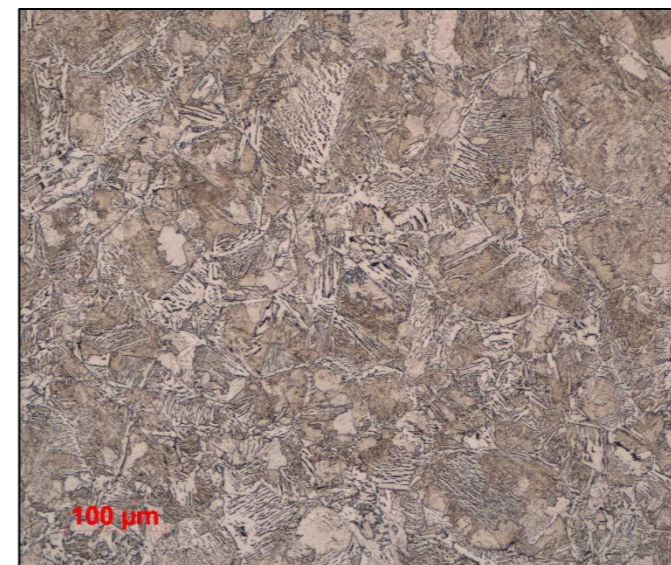
Detail 2_14 ×200



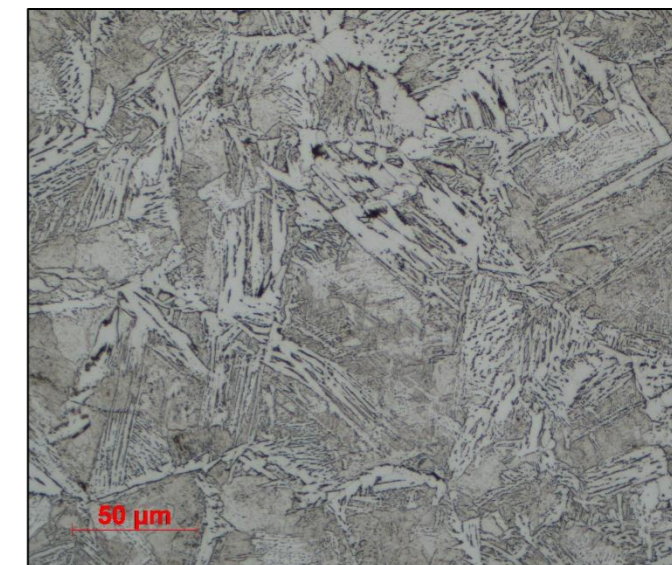
Detail 2_15 ×500



Detail 2_16 ×200

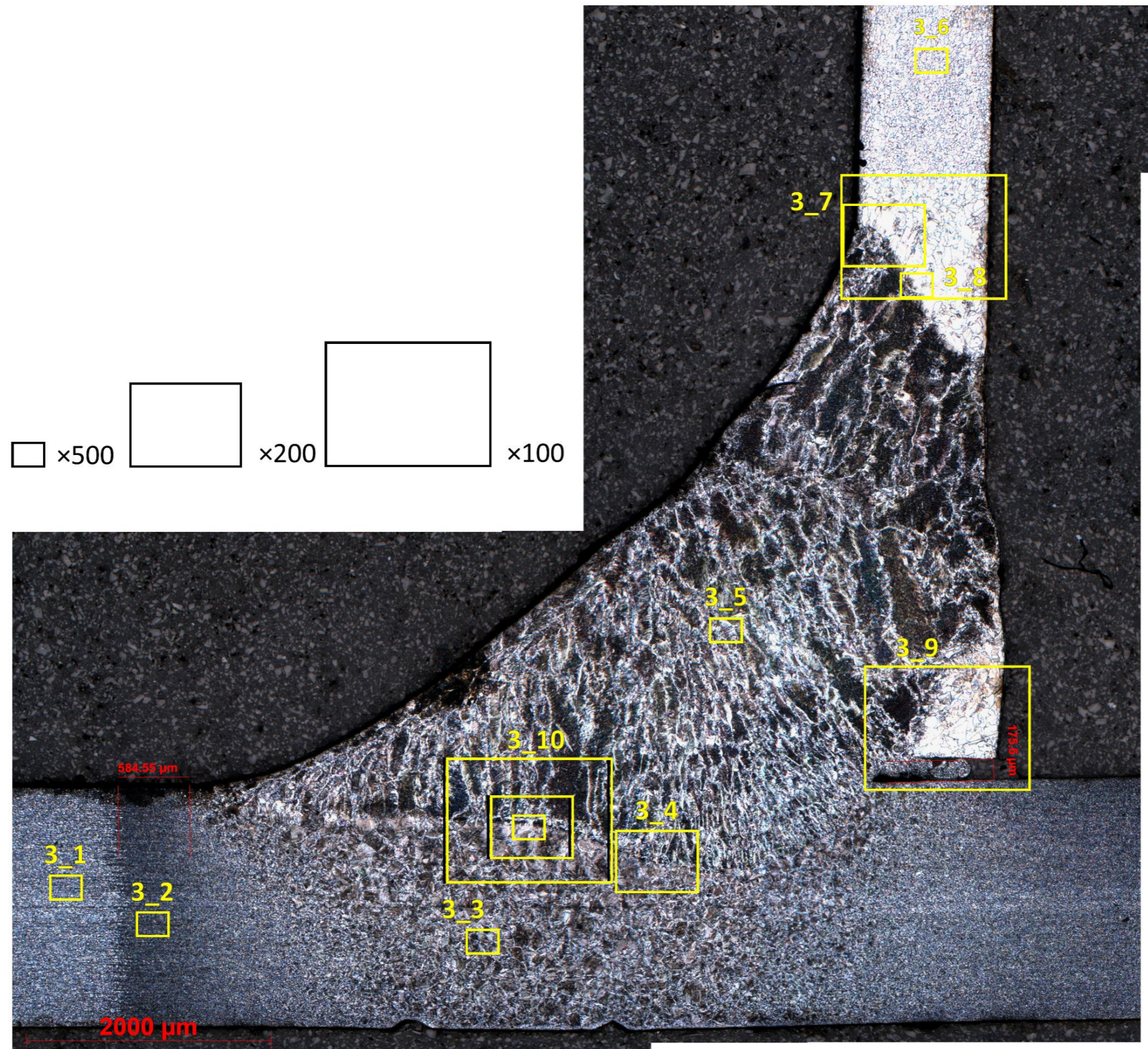


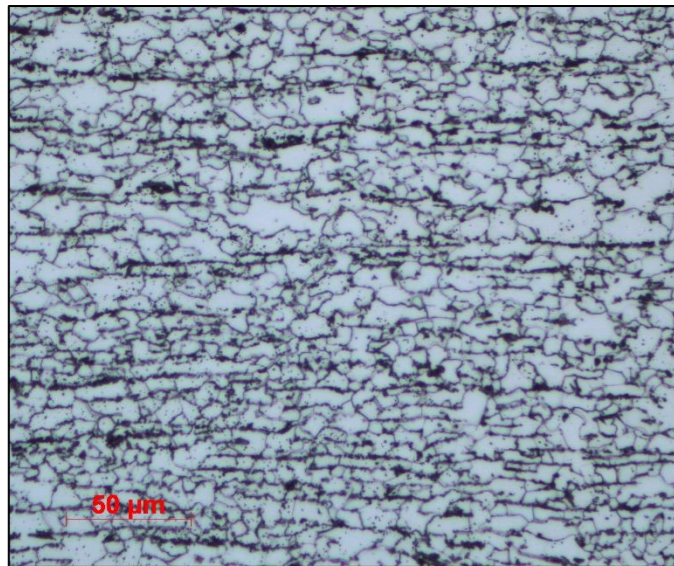
Detail 2_18 ×200



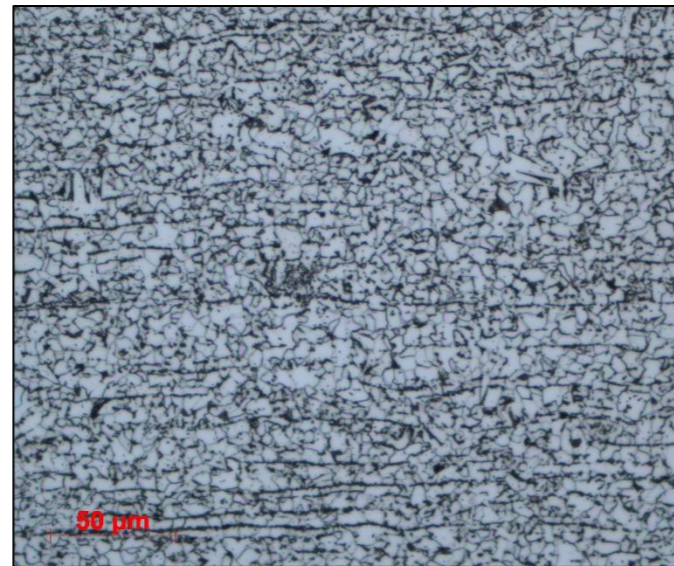
Detail 2_19 ×500

Příloha G: Mapa mikrosnímků vzorek 3

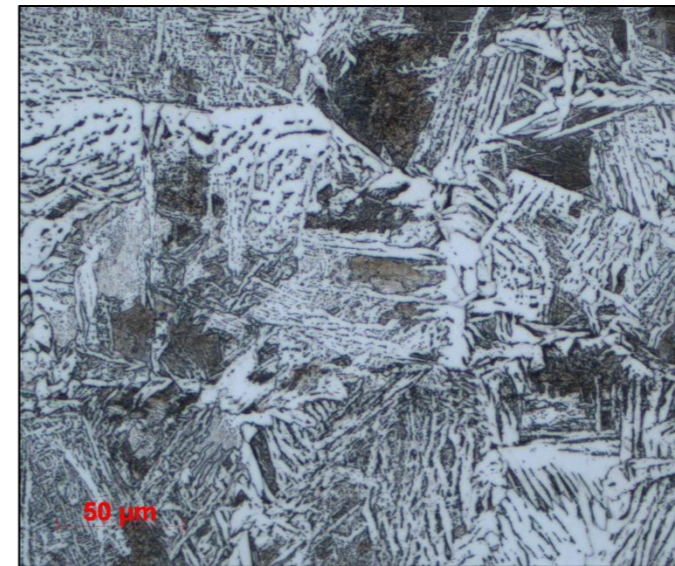




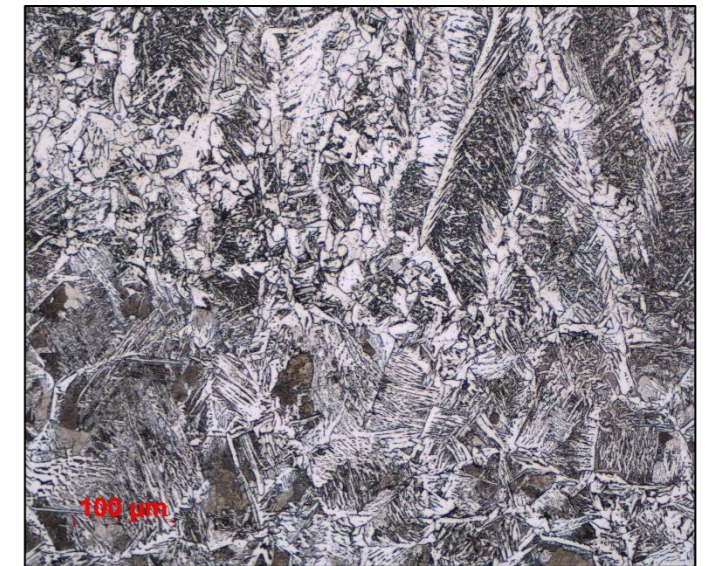
Detail 3_1 ×500



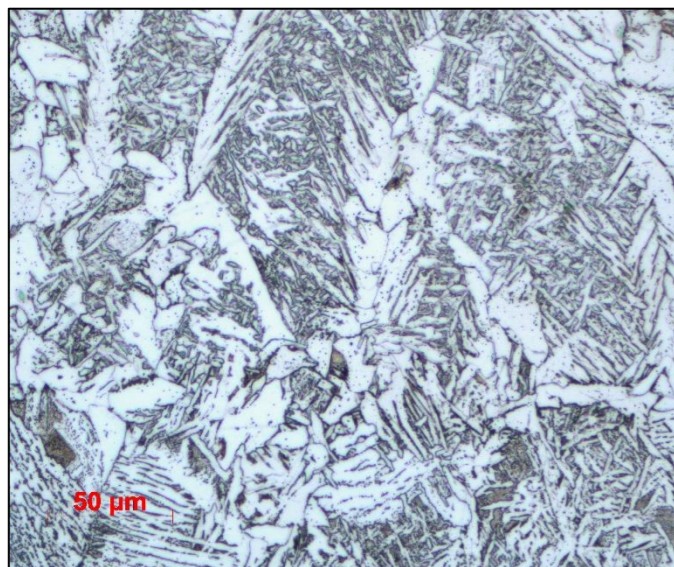
Detail 3_2 ×500



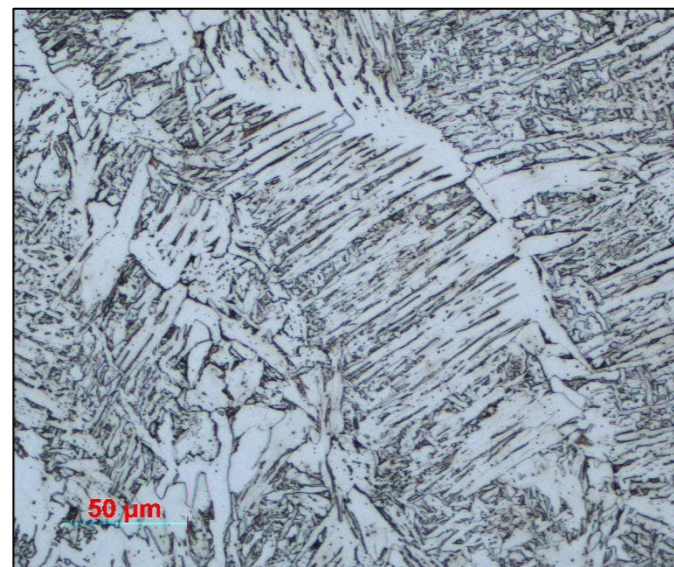
Detail 3_3 ×500



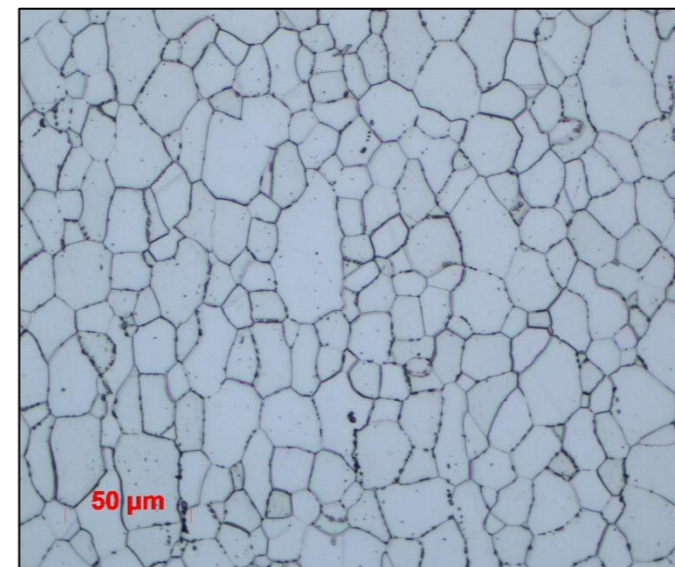
Detail 3_4 ×200



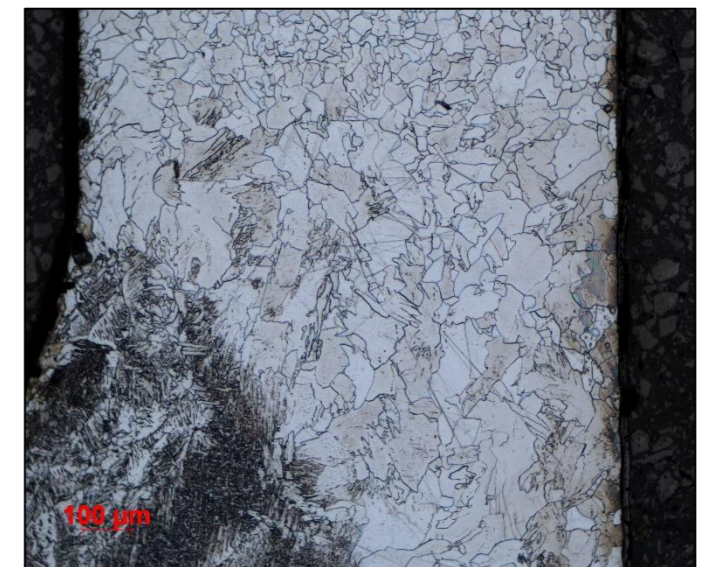
Detail 3_4 ×500



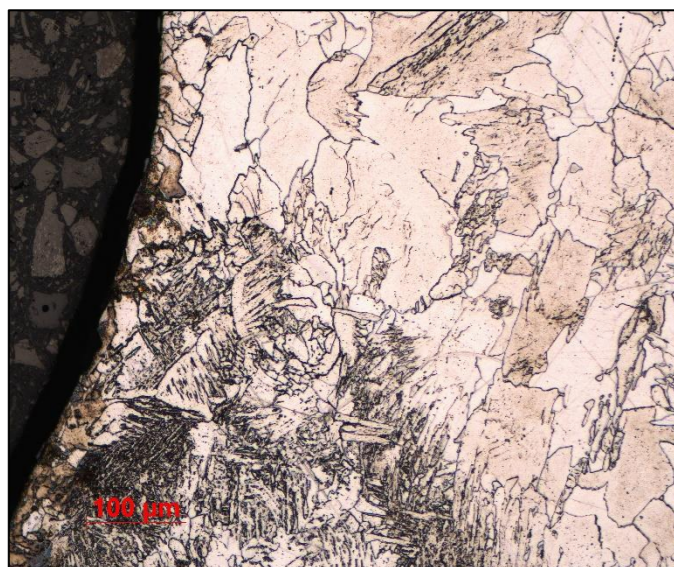
Detail 3_5 ×500



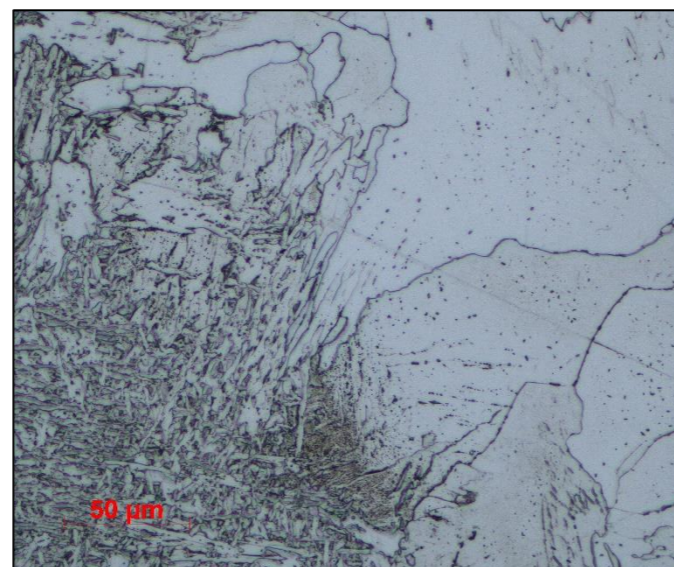
Detail 3_6 ×500



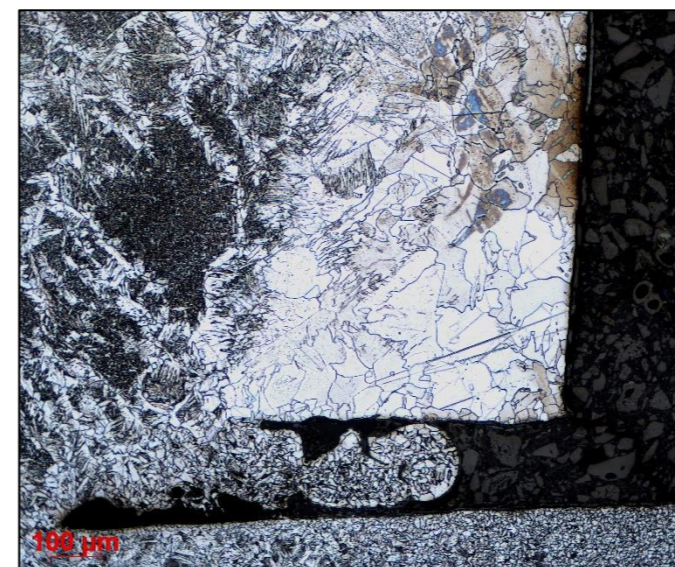
Detail 3_7 ×100



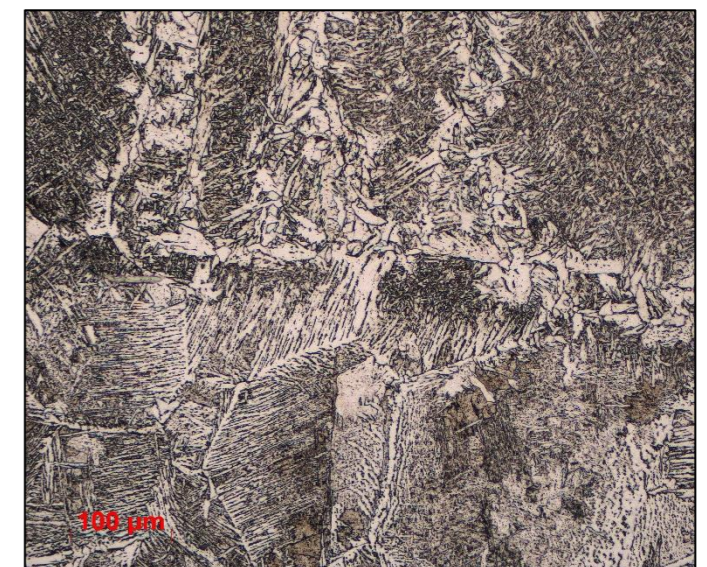
Detail 3_7 ×200



Detail 3_8 ×500

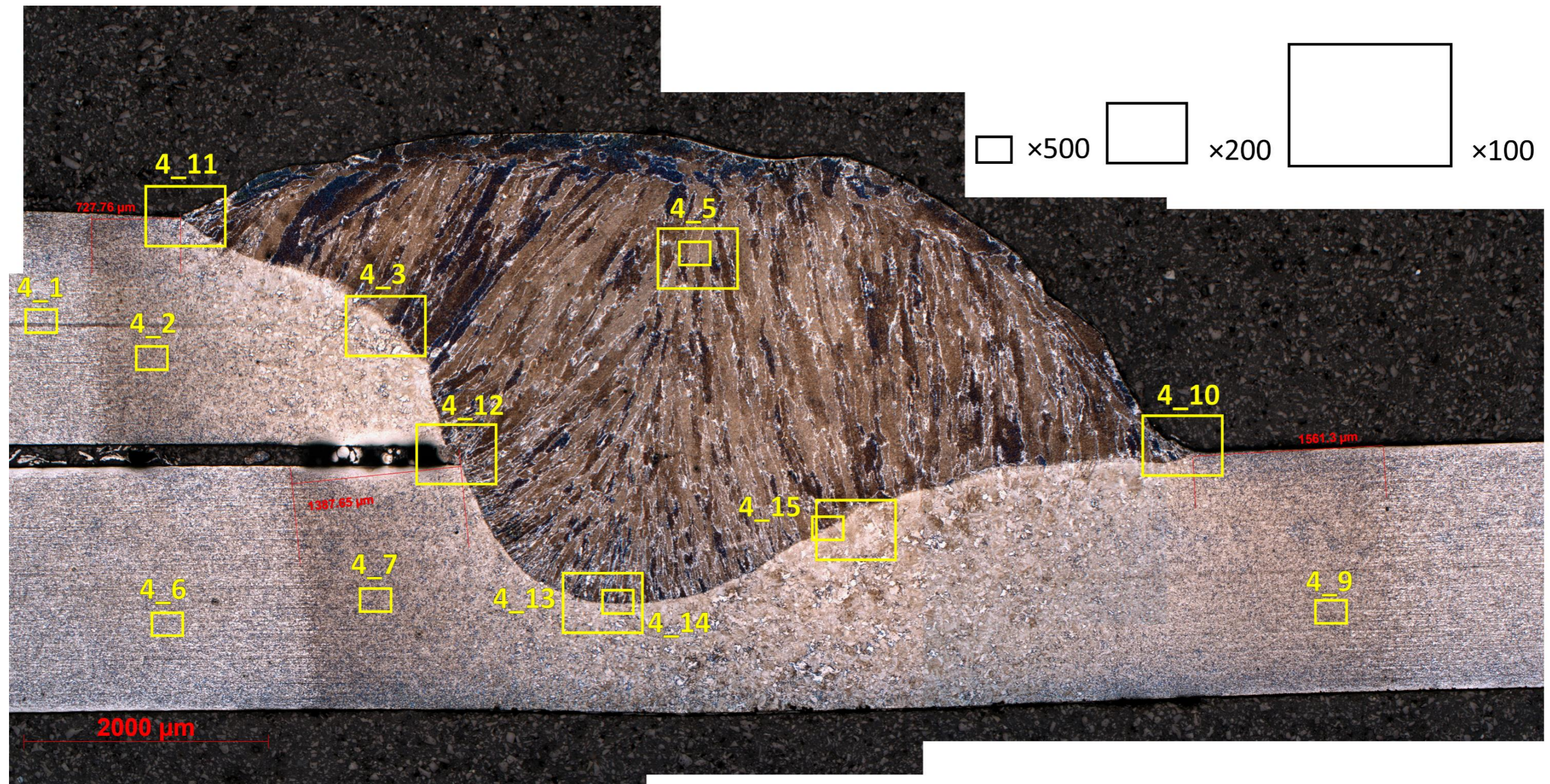


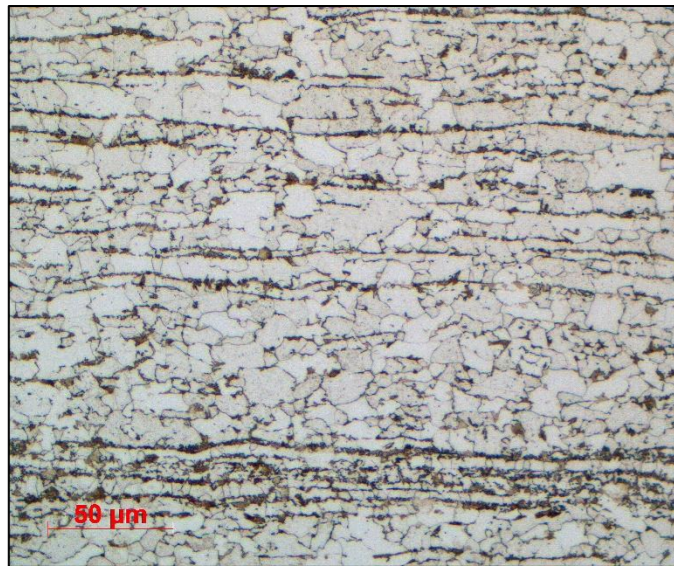
Detail 3_9 ×100



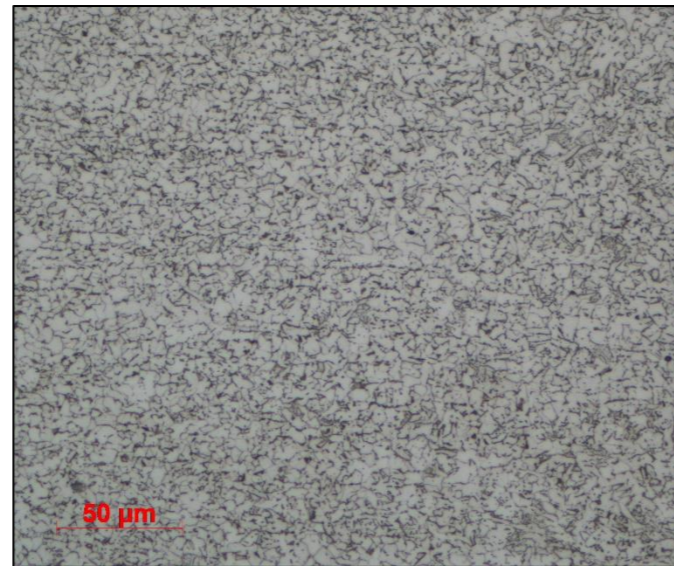
Detail 3_10 ×200

Příloha H: Mapa mikrosnímků vzorek 4

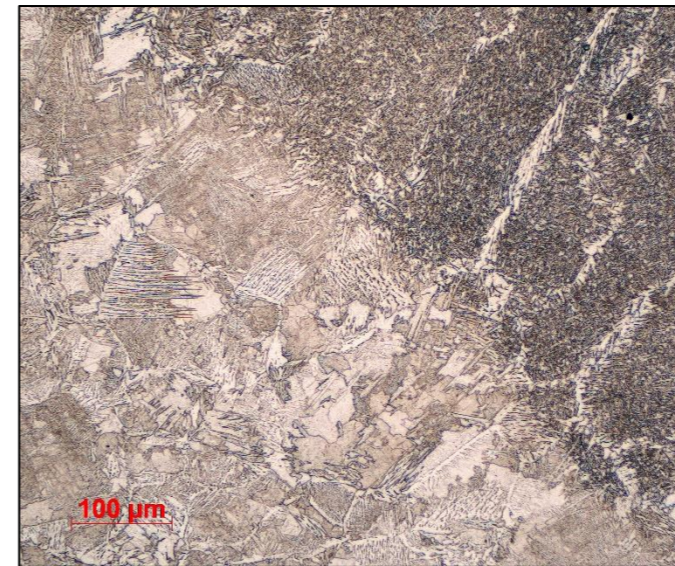




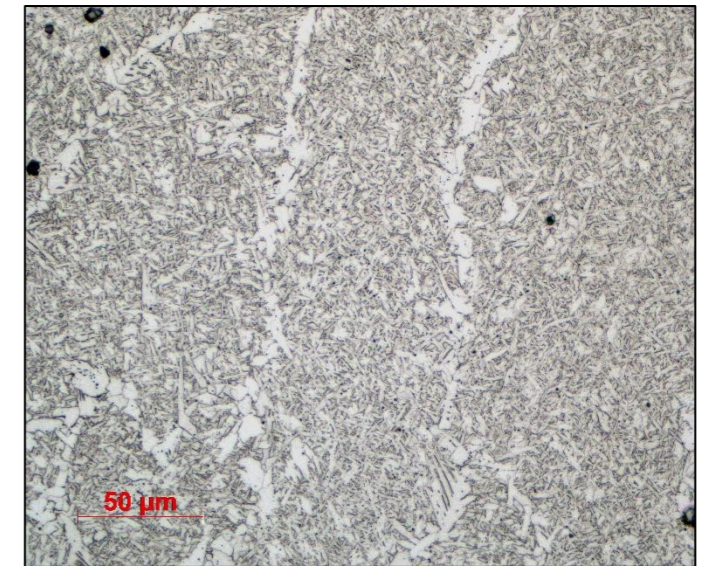
Detail 4_1 ×500



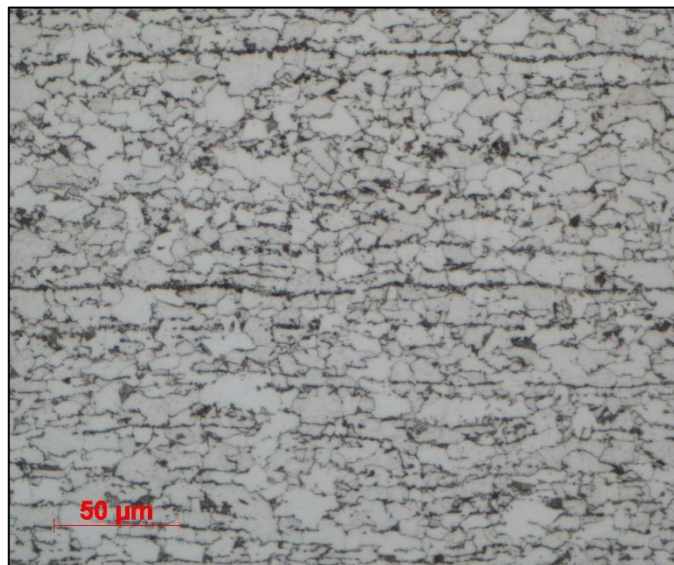
Detail 4_2 ×500



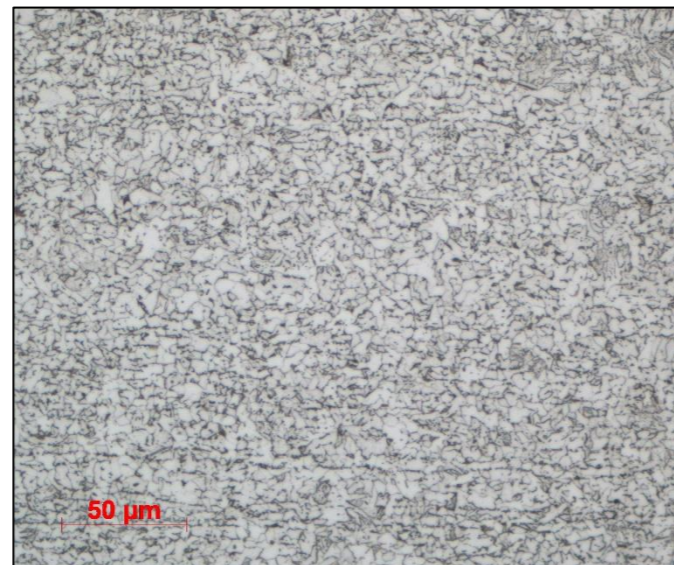
Detail 4_3 ×200



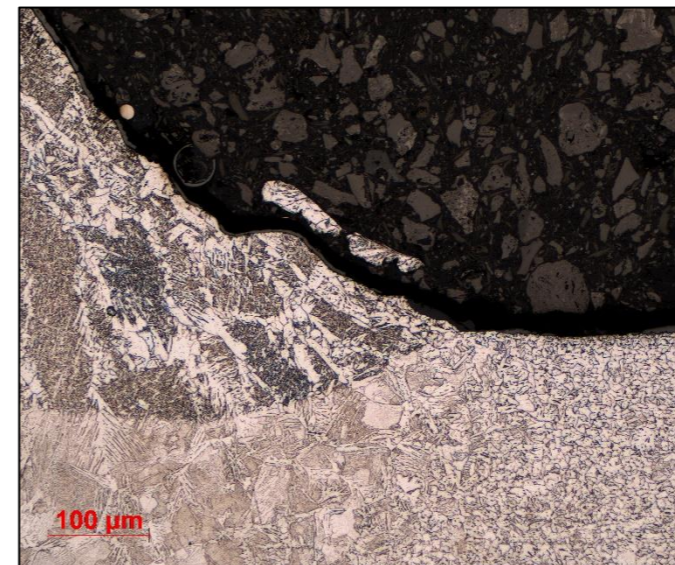
Detail 4_5 ×500



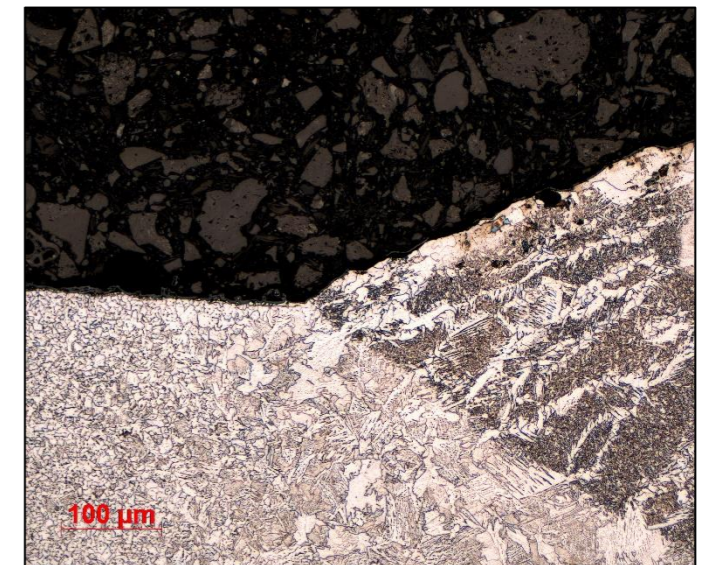
Detail 4_6 ×500



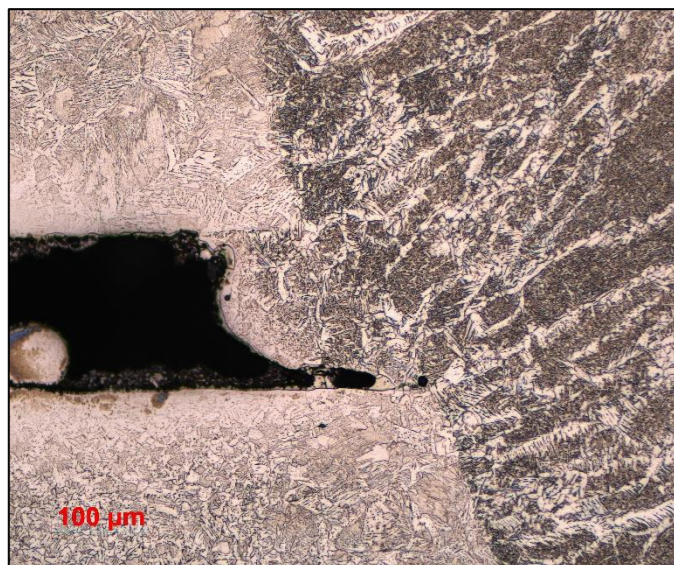
Detail 4_7 ×500



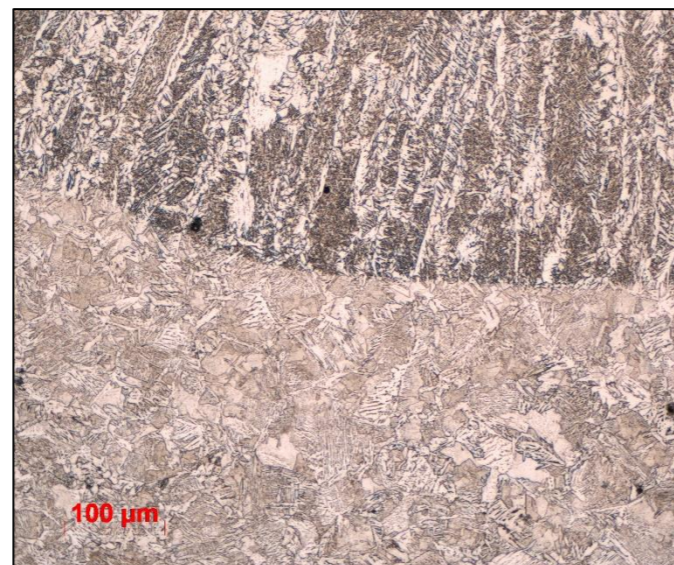
Detail 4_10 ×200



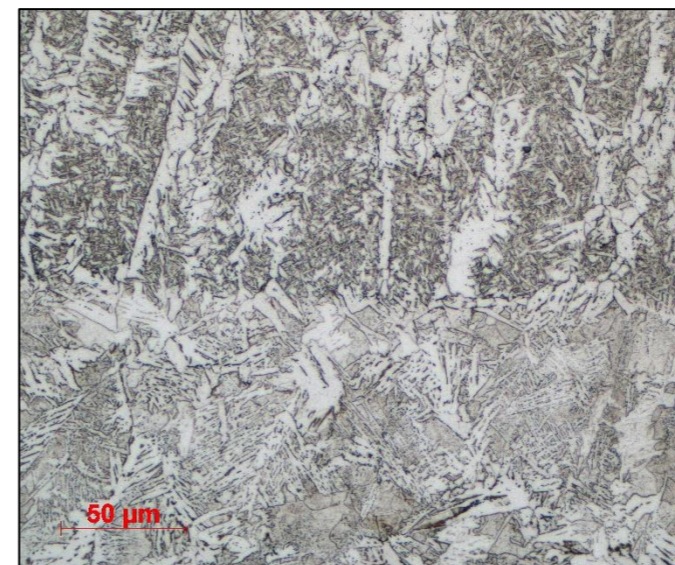
Detail 4_11 ×200



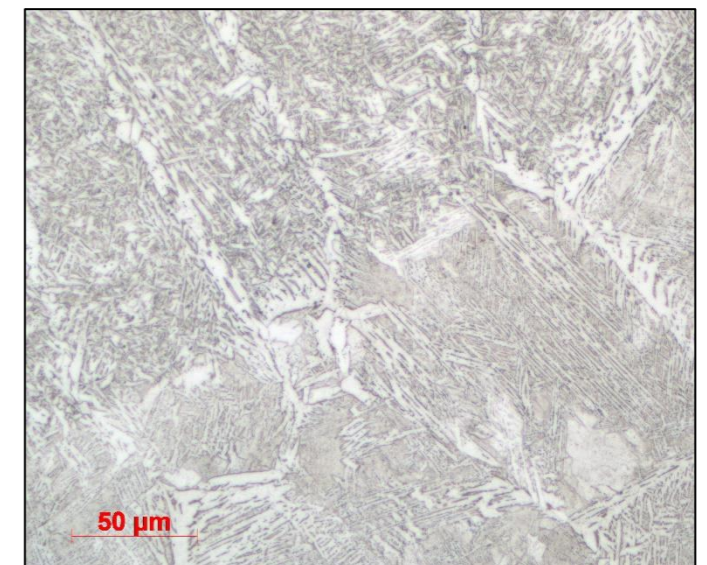
Detail 4_12 ×200



Detail 4_13 ×200



Detail 4_14 ×500



Detail 4_15 ×500

