

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Svařování aditivně vyrobených dílů z oceli 316L

Autor: Bc. Michal LUKSCH

Vedoucí práce: Doc. Ing. Stanislav NĚMEČEK, Ph.D.

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal LUKSCH**
Osobní číslo: **S22N0049P**
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Téma práce: **Svařování aditivně vyrobených dílů z oceli 316L**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Svařování dílů vyrobených aditivně
2. Moderní technologie pro vytváření svarů
3. Experimentální část – příprava vzorků
4. Výsledky a diskuse
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-70 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

KATAYAMA, Seiji. Handbook of laser welding technologies. Woodhead publishing series in electronic and optical materials. Oxford: Woodhead Publishing, 2013. ISBN 978-0-85709-264-9.

Jagdheesh Radhakrishnan, Sunil Pathak: Advanced Engineering of Materials Through Lasers, Springer, Berlin 2022, EAN: 9783031038297.

S. Katayama: Fundamentals and Details of Laser Welding, Springer 2020, ISBN 9789811579325.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Stanislav Němeček, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Miroslav Urbánek, Ph.D.**
COMTES FHT a.s.

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.
vedoucí katedry

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

Poděkování

Chtěl bych touto formou poděkovat panu docentu Němečkovi za jeho cenné rady a lidský přístup po celou dobu řešení této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti COMTES FHT a.s. za vyrobení zkušebních aditivních plechů a Regionálnímu technologickému institutu za jejich odborné materiálové analýzy, mechanické zkoušky a poskytnuté informace.

Rád bych též poděkoval svým rodičům a přítelkyni za bezmeznou podporu po celá dlouhá léta mého studia na Západočeské univerzitě.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Luksch	Jméno Michal	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Němeček, Ph.D.	Jméno Stanislav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Svařování aditivně vyrobených dílů z oceli 316L		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2024
---------	---------	---------	-----	-------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	99	TEXTOVÁ ČÁST	88	GRAFICKÁ ČÁST	11
--------	----	--------------	----	---------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato diplomová práce pojednává o svařitelnosti aditivně vyrobené austenitické oceli 316L metodou DED (Direct Energy Deposition) v porovnání s konvenčně vyrobenou válcovanou ocelí 316L. Posuzuje se zde vhodnost oceli pro svařování obloukovou metodou TIG, laserovým paprskem a dále moderní metodou Cold wire (svařování laserem s přídavným drátem). Je hodnocena svařitelnost, kvalita svarů, mikrostruktura a mechanické vlastnosti.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	316L, DED, Direct Energy Deposition, Aditivní výroba, TIG, Laserové svařování, Laser Cold wire

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Luksch	Name Michal
STUDY PROGRAMME	N0715A270014 - Material Science and Manufacturing Technology	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Němeček, Ph.D.	Name Stanislav
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Welding of additively manufactured 316L steel parts	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	99	TEXT PART	88	GRAPHICAL PART	11
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This master thesis describes weldability of additively manufactured 316L austenitic steel through DED (Direct Energy Deposition) method compared to conventionally rolled 316L steel. This thesis adjudicate steel's desirability for TIG arc welding method, laser beam welding and also a new Cold wire (laser beam plus filler wire welding) method. The target is to evaluate weldability, quality of the welds, microstructure and mechanical characteristics.
KEY WORDS	316L, DED, Direct Energy Deposition, Additive manufacturing, TIG, Laser welding, Laser Cold wire

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
1 Úvod.....	15
2 Svařování korozivzdorných ocelí.....	17
2.1 Svařování austenitických ocelí	18
2.2 Problémy při svařování austenitických ocelí.....	19
2.3 Praxe svařování austenitických ocelí.....	20
3 Svařování aditivně vyrobených ocelí	20
3.1 Princip technologie PBF.....	20
3.2 Princip technologie DED.....	21
3.3 Vlastnosti oceli 316L vyrobené metodou DED.....	22
3.4 Svařování aditivně vyrobených ocelí laserovým paprskem	24
3.5 Svařování aditivně vyrobených ocelí obloukovými metodami	26
3.6 Výpočet vneseného tepla pro obloukové metody svařování	27
4 Technologie laserového svařování	27
4.1 Svařování bez přídavného drátu	27
4.2 Laserové svařování s přídavným drátem.....	29
4.2.1 Svařování kořenové vrstvy.....	29
4.2.2 Svařování výplňové a krycí vrstvy.....	30
4.2.3 Typy laserů.....	31
4.2.4 Ochranný plyn	31
4.2.5 Tvar a šířka drážky.....	31
4.2.6 Poloha ohniska laserového svazku.....	32
4.2.7 Pozice přídavného drátu	33
4.3 Výpočet vneseného tepla	33
5 Návrh experimentální části.....	34
6 Experiment - část první: Svařování aditivně vyrobené a válcované oceli 316L.....	35
6.1 Značení vzorků a metod svařování.....	35
6.2 Popis základního materiálu.....	35
6.3 Svařování metodou 141 (TIG).....	36
6.4 Svařování metodou 141 (TIG) – opakování experimentu.....	40
6.5 Svařování laserem bez přídavného drátu (metoda 521)	41

6.6	Svařování metodou 521 Cold wire	44
7	Experiment – část druhá: Hodnocení svarových spojů	47
7.1	NDT – vizuální zkouška	47
7.2	NDT – kapilární zkouška.....	48
7.3	NDT – Radiografická zkouška	50
7.4	Makroskopická zkouška svarů.....	53
7.5	Mikrostruktura svarových spojů.....	55
7.6	Pozorování mikrostruktury na řádkovacím elektronovém mikroskopu (SEM)	61
7.7	Měření průběhu mikrotvrdosti.....	63
7.8	Statická zkouška tahem – opakování metody 141	66
7.9	Makroskopické hodnocení lomových ploch – opakovaná metoda 141.....	67
7.10	Statická zkouška tahem – metoda 521	67
7.11	Makroskopické hodnocení lomových ploch – metoda 521	69
7.12	Statická zkouška tahem – metoda 521 Cold wire	71
7.13	Makroskopické hodnocení lomových ploch – metoda 521 Cold wire	73
7.14	Pozorování lomů na řádkovacím elektronovém mikroskopu (SEM)	74
7.15	Zkouška ohybem.....	76
7.16	Porovnání vneseného tepla při svařování	77
8	Diskuze výsledků	78
9	Závěr.....	82
	Seznam použitých zdrojů	83
	Přílohy	i

Přehled použitých zkratk a symbolů

A	Tažnost [%]
CAD	Computer Aided Design
DED	Direct Energy Deposition
FCC	Kubická mřížka plošně středěná
LBW	Laser Beam Welding
MKK	Mezikrystalová koroze
NDT	Nedestruktivní zkoušení
PBF	Powder Bed Fusion
PT	Kapilární zkouška
R _m	Mez pevnosti v tahu [MPa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu [MPa]
RT	Radiografická zkouška
RTG	Rentgenové záření
SEM	Řádkovací elektronový mikroskop
TIG	Tungsten Inert Gas
TOO	Tepelně Ovlivněná Zóna
VT	Vizuální zkouška
Z	Kontrakce [%]

Seznam obrázků

Obr. 1: Konstrukční uspořádání heterogenního svarového spoje 22K-08Ch18N10T [3].....	15
Obr. 2: Mikrostruktura duplexní oceli; vlevo ZM, vpravo svarový kov [7]	18
Obr. 3: Schaefflerův diagram s vyznačením oceli 316L [9]	19
Obr. 4: Precipitace karbidů chromu v pásmu zcitlivění [60]	20
Obr. 5: Princip metody PBF [14]	21
Obr. 6: Princip technologie DED, vlevo použití prášku, vpravo drátu [19]	22
Obr. 7: Porovnání horizontálně a vertikálně zatěžované DED oceli 316L [20]	23
Obr. 8: Austenitická mikrostruktura oceli 316L vyrobené metodou DED [20].....	24
Obr. 9: Porovnání svaru válcované a PBF vyrobené oceli 316L [21].....	24
Obr. 10: Makroskopické hodnocení svaru válcované (CR – vlevo) a aditivně vyrobené (PBF - vpravo) oceli 316L [21].....	25
Obr. 11: Makro struktura svarů a) válcovaný, b) PBF, c) detail hranice ztavení PBF [23].....	26
Obr. 12: Porovnání laserového, elektronového, plasmového a obloukového svařování [27]..	28
Obr. 13: Rozdílné parametry při svařování kořene [27]	30
Obr. 14: Studený spoj typu A [27]	30
Obr. 15: Studený spoj typu B [27]	31
Obr. 16: Svařování metodou Cold wire pro různé rozměry drážky [38]	32
Obr. 17: Porovnání různých poloh ohniska; vlevo fokusace na povrch, vpravo +60 mm nad povrchem [39]	32
Obr. 18: Tvary drážek použité v experimentu [34].....	33
Obr. 19: Vliv umístění přídavného drátu [34].....	33
Obr. 20: Příprava vzorků pro svařování metodou TIG	37
Obr. 21: Průběh a vyhodnocení kapilární zkoušky úkosů; delší plechy – válcovaná ocel, kratší plechy – DED ocel	37
Obr. 22: Kořenová vrstva válcované oceli, nahoře pohled z lící strany, dole pohled na kořenovou stranu	38
Obr. 23: Svarový spoj – válcovaná ocel 316L; metoda 141	38
Obr. 24: Kořenová vrstva DED oceli; vlevo pohled z lící strany, vpravo pohled z kořenové strany	38
Obr. 25: Nevyhovující kořen svaru DED oceli	39
Obr. 26: Svarový spoj DED oceli.....	39
Obr. 27: Schéma svaru metody 141 (TIG).....	39
Obr. 28: Schéma svaru opakované metody 141	40
Obr. 29: Vyhovující kořen svaru DED oceli při opakování metody 141.....	41

Obr. 30: Svařenec opakované metody 141, vlevo líc, vpravo kořen; kratší plechy DED, delší válcovaná ocel	41
Obr. 31: Konfigurace pracoviště pro laserové svařování	42
Obr. 32: Příprava plechů pro laserové svařování bez přídavného drátu	43
Obr. 33: Schéma svaru metodou 521	43
Obr. 34: Strana A vzorků svařených natupo metodou 521	44
Obr. 35: Strana B vzorků svařených natupo metodou 521	44
Obr. 36: Příprava vzorků pro svařování metodou 521 Cold wire	45
Obr. 37: Schéma svaru 521 Cold wire pro válcovanou ocel	45
Obr. 38: Schéma svaru 521 Cold wire pro DED ocel	45
Obr. 39: Svařenec; metoda 521 Cold wire; líc svaru	46
Obr. 40: Svařenec; metoda 521 Cold wire; kořen svaru	46
Obr. 41: Svar válcované oceli, metoda 141	50
Obr. 42: Svar DED oceli; metoda 141	50
Obr. 43: Shora válcovaný, DED a přechodový spoj	51
Obr. 44: Svar válcované oceli; metoda 521	51
Obr. 45: Svar DED oceli; metoda 521	51
Obr. 46: Přechodový spoj; zvýrazněné póry; metoda 521	52
Obr. 47: Svar válcované oceli; metoda 521 Cold wire	52
Obr. 48: Svar DED oceli; metoda 521 Cold wire	52
Obr. 49: Přechodový spoj; metoda 521 Cold wire	52
Obr. 50: Svar metody 141; nahoře válcovaný, dole DED; zvětšeno 50x.....	53
Obr. 51: Metoda 141; nahoře válcovaný, uprostřed DED, dole přechodový spoj; zvětšeno 50x	54
Obr. 52: Metoda 521; vlevo válcovaná, uprostřed DED, vpravo přechodový spoj; zvětšeno 50x.....	55
Obr. 53: Metoda 521 Cold wire; vlevo válcovaná, uprostřed DED, vpravo přechodový spoj; zvětšeno 50x.....	55
Obr. 54: mikrostruktura hranice ztavení svaru válcované oceli; metoda 141; zvětšeno 50x...	56
Obr. 55: mikrostruktura hranice ztavení svaru DED oceli; metoda 141; zvětšeno 50x.....	56
Obr. 56: Detail hranice ztavení svaru DED oceli; metoda 141; zvětšeno 100x.....	57
Obr. 57: Detail hranice ztavení svaru válcované oceli; metoda 141; zvětšeno 200x.....	57
Obr. 58: Mikrostruktura svaru válcované oceli; metoda 521; zvětšeno 50x.....	58
Obr. 59: Mikrostruktura svaru DED oceli; metoda 521; zvětšeno 50x.....	59
Obr. 60: Mikrostruktura přechodového svaru; metoda 521; zvětšeno 50x	59
Obr. 61: Mikrostruktura svaru DED oceli; metoda 521 Cold wire; zvětšeno 25x.....	60

Obr. 62: Detail hranice ztavení svaru válcované oceli; metoda 521 Cold wire; zvětšeno 200x	60
Obr. 63: Základní materiál; vlevo válcovaná, vpravo DED ocel; zvětšeno 200x	61
Obr. 64: Hranice ztavení přechodového spoje (strana DED oceli); metoda 141; zvětšeno 1000x, SEM.....	62
Obr. 65: Detail svarového kovu přechodového spoje; metoda 141; zvětšeno 3000x, SEM	63
Obr. 66: Průběh mikrotvrdosti HV1; válcovaná ocel; metoda 521 Cold wire	64
Obr. 67: Průběh mikrotvrdosti HV1; DED ocel; metoda 521 Cold wire	65
Obr. 68: Průběh mikrotvrdosti HV1; přechodový spoj; metoda 521 Cold wire	66
Obr. 69: Graf výsledků statické zkoušky tahem; metoda 141 (opakování)	67
Obr. 70: Přetržené vzorky po statické tahové zkoušce; metoda 141 (opakování)	67
Obr. 71: Rozměry zmenšených zkušebních těles statické tahové zkoušky.....	68
Obr. 72: Graf výsledků statické tahové zkoušky; metoda 521	69
Obr. 73: Lomové plochy svaru válcované oceli; metoda 521	70
Obr. 74: Lomové plochy svaru DED oceli; metoda 521	70
Obr. 75: Lomové plochy přechodového spoje; metoda 521	71
Obr. 76: Graf výsledků statické tahové zkoušky; metoda 521 Cold wire	72
Obr. 77: Lomové plochy svaru válcované oceli; metoda 521 Cold wire	73
Obr. 78: Lomové plochy svaru DED oceli; metoda 521 Cold wire	73
Obr. 79: Lomové plochy přechodového spoje; metoda 521 Cold wire	74
Obr. 80: Lom svaru DED oceli; metoda 521; zvětšeno 100x, SEM	75
Obr. 81: Detail struktury lomu DED oceli; metoda 521; zvětšeno 3000x, SEM.....	76
Obr. 82: Vzorky po ohybové zkoušce; vlevo válcovaná, vpravo DED ocel; metoda 141	77
Obr. 83: Detail rozstříku válcované oceli; metoda 521 Cold wire	78
Obr. 84: Porovnání rentgenového snímku a kapilární zkoušky	79
Obr. 85: Svařovací přípravek; převzato z literatury [22]	81

Seznam tabulek

Tab. 1: Chemické složení oceli 316L v hmotnostních % [8]	18
Tab. 2: Porovnání válcované a PBF vyrobené oceli 316L [15]	25
Tab. 3: Chemické složení oceli 316L v hmotnostních % [40]	35
Tab. 4: Chemické složení oceli 316L v hmotnostních % změřené ručním spektrometrem.....	36
Tab. 5: Chemické složení přídatného drátu ESAB OK TIGROD 316L dle výrobce v hm. % [44]	36
Tab. 6: Výsledky vizuální zkoušky; metoda 141	47

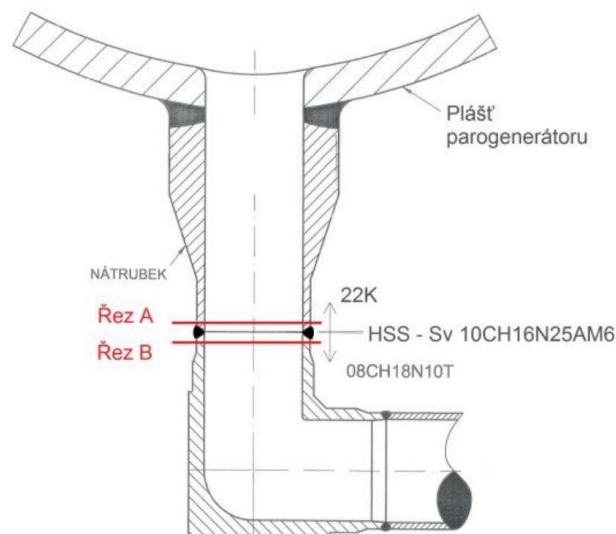
Tab. 7: Výsledky vizuální zkoušky; metoda 141 - opakování	47
Tab. 8: Výsledky vizuální zkoušky; metoda 521	48
Tab. 9: Výsledky vizuální zkouška; metoda 521 Cold wire	48
Tab. 10: Výsledky kapilární zkoušky; metoda 141	49
Tab. 11: Výsledky kapilární zkoušky; metoda 141 - opakování.....	49
Tab. 12: Výsledky kapilární zkoušky; metoda 521	49
Tab. 13: Výsledky kapilární zkoušky; metoda 521 Cold wire	50
Tab. 14: Výsledky statické tahové zkoušky; metoda 141 (opakování).....	66
Tab. 15: Výsledky statické tahové zkoušky; metoda 521	68
Tab. 16: Statická zkouška tahem ; metoda 521 Cold wire	72
Tab. 17: Porovnání vneseného tepla pro všechny svary	77
Tab. 18: Porovnání tahových zkoušek všech vzorků	80

1 Úvod

Svarové spoje jsou i přes značný pokrok techniky a znalostí z hlediska spolehlivosti stále vždy velmi rizikovým místem konstrukce, protože se ve spojích koncentrují negativní vlivy. Únavové lomy jsou často iniciovány z trhlin a vad (defektů) svarových spojů. Tyto vady mohou vzniknout při procesu svařování (studené spoje, póry, trhliny) a při provozu spoje, např. korozí nebo kavitací. Nežádoucí difuzí uhlíku a dalších intersticiálních prvků může vzniknout struktura nevyhovující provozním parametrům, pro které byl spoj navržen, což může vést k lomu a případné havárii [1].

Tato práce se zabývá svařováním aditivně vyrobené oceli 316L metodou DED (Direct Energy Deposition). Technologii 3D tisku kovových materiálů je v poslední době věnována značná pozornost, a proto je studium možností svařitelnosti těchto materiálů velmi relevantní. V současnosti existuje pouze velmi málo článků a studií zabývajících se svařitelností ocelí vyrobených touto aditivní metodou. Limitujícím faktorem pro aditivně vyrobené součásti je maximální rozměr deponovaného kusu odvíjející se od největšího pracovního prostoru a rozsahu výrobního stroje. Při znalosti procesu svařování by tento limitující faktor odpadl, jelikož by mohla být vyrobena libovolně velká součást, která by se rozdělila na menší, aditivně vyrobitelné části, a následně se svařila v jeden celek.

Dalším stimulem pro tuto práci byl heterogenní svarový spoj typu 22K-08ChN10T nacházející se v jaderné elektrárně Temelín na sekundárním okruhu. Tento svar je vystaven teplotě vody 170 – 280 °C (řadí se tedy mezi spoje provozované za teplot nižších než 350 °) a tlaku 6,25 MPa. Pro tento spoj je schválený přídatný drát Sv – 10Ch16N25AM6. Provedení spoje je na obrázku níže [2, 3].



Obr. 1: Konstruktivní uspořádání heterogenního svarového spoje 22K-08Ch18N10T [3]

Heterogenní svarové spoje tohoto typu se vyznačují značně rozdílnou aktivitou uhlíku v nízkolegované oceli a austenitickém svarovém kovu. Během vystavení provozním teplotám dochází k redistribuci uhlíku, který difuzí přechází z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti s nižší koncentrací. Na straně nízkolegované oceli vzniká oduhličená zóna, zatímco austenitický svarový kov se nauhličuje. V oblasti oduhličení dochází k rozpouštění precipitátů a následnému růstu feritického zrna. Dochází k značnému snížení tvrdosti; v případě vyčerpání plasticity v této oblasti nastane lom. V oblasti nauhličení dochází k nukleaci a růstu karbidů, což vede k výraznému nárůstu tvrdosti. Oblasti nauhličení a oduhličení heterogenního svarového spoje mohou vytvářet nejslabší místa a vést k selhání spoje. Při

zvyšování šířky oduhličené zóny nízkolegované oceli a zvyšování nauhličení austenitu dochází k snižování vrubové houževnatosti. Oduhličená a nauhličená oblast působí jako makroheterogenita. Při překročení určité kritické velikosti se z této oblasti stává makrodefekt schopný rychlého šíření, který vede k porušení součásti a následnému selhání její funkce [1, 2, 4].

Z výše uvedeného je patné, že vytváření heterogenních svarových spojů jsou v mnoha ohledech problematické a může u nich docházet k celé řadě defektů. Bezpečnější variantou by tedy bylo vytvořit takové konstrukční uspořádání, které by neobsahovalo heterogenní spoj. Řešením by mohlo být vytvoření nátrubku, který by spojoval feritickou a austenitickou ocel. Tento aditivně vyrobený nátrubek by bylo možné vytvořit gradovaný tak, že na jednom konci byla mikrostruktura feritická a na druhém austenitická. Nátrubek by se následně v místě montáže svařil mezi parogenerátor a potrubí, čímž by vznikly dva homogenní svarové spoje, namísto jednoho heterogenního.

Cílem této práce je hodnocení svařitelnosti aditivně vyrobené oceli v kombinaci s ocelí tvářenou. Ke zhodnocení byly vybrány tři různé metody svařování. První z nich je konvenční metoda TIG, která se v prostorách elektrárny využívá; dále metoda svařování laserovým paprskem, jelikož se jedná o velmi progresivní technologii vyznačující se nízkým množstvím vneseného tepla a vysokými rychlostmi svařování. Třetí metodou je svařování laserovým paprskem s přídavným drátem „Cold wire“.

Svařování laserovým paprskem je velice efektivní technologie vhodná pro širokou škálu materiálů. Přes převažující výhody má tato technologie několik nevýhod, které se dají eliminovat při kombinaci laserového paprsku a přídavného drátu. Jedním z limitů laserového svařování je maximální svařitelná tloušťka součásti, kdy laser svým maximálním výkonem dokáže natavit jen omezenou tloušťku materiálu. Toto omezení se dá vyřešit přípravou drážky na svařovaných plechách a následným vytvořením svarového spoje na více housenek pomocí přídavného drátu, což je podstatou zmíněné metody Cold wire.

2 Svařování korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli jsou skupinou vysokolegovaných ocelí. Jejich svařování je ve srovnání s nízkolegovanými oceli podstatně náročnější, jelikož mají o cca 50% vyšší tepelnou roztažnost a cca o 30 nižší tepelnou vodivost. Oceli odolávají korozi díky pasivační schopnosti a vzniku oxidické vrstvy Cr_2O_3 . Minimální množství chromu je 12% v tuhém α (ferit) nebo γ (austenit) [4, 5].

Korozivzdorné oceli se dělí do hlavních skupin podle nejdůležitějších legujících prvků a mikrostruktury na oceli:

- Feritické
- Martenzitické
- Duplexní (dvoufázové): austeniticko - feritické, martenziticko - austenitické, martenziticko - feritické
- Austenitické [4, 5]

Feritické korozivzdorné oceli:

Jedná se o oceli s nízkým obsahem uhlíku a obsahem $\text{Cr} > 17 \text{ hm. \%}$. Jsou náchylné k hrubnutí zrna v TOO. Při vyšších provozních teplotách u těchto ocelí dochází k nežádoucím difuzním dějům. Tyto oceli jsou náchylné na vznik MKK a σ fáze. Přídavné materiály jsou buď stejného chemického složení, nebo vysokolegované niklové slitiny, které slouží jako difuzní bariéra. Svařování se provádí vždy s předehřevem do $300 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota interpass nesmí překročit $320 \text{ }^\circ\text{C}$; vhodné je též žíhání svařenců na teploty $750 - 800 \text{ }^\circ\text{C}$. Používají se především pro tenkostěnné výrobky, např. pracovní desky stolů profesionálních kuchyní [4, 5, 6].

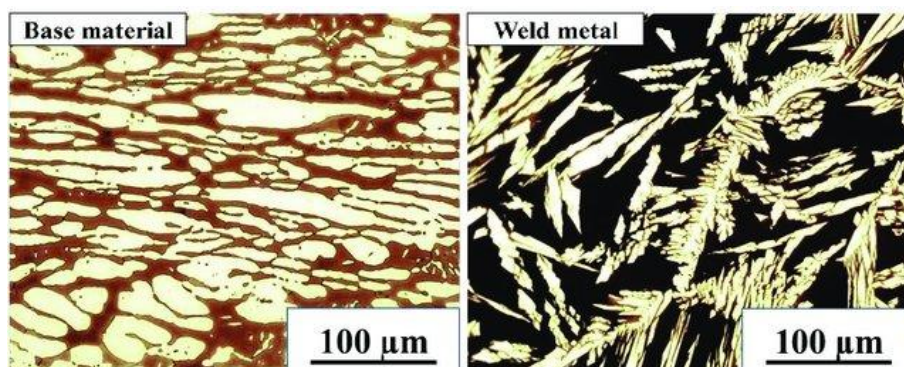
Martenzitické korozivzdorné oceli:

Chromové martenzitické oceli obsahují $13 - 17 \text{ hm. \% Cr}$ a $0,15 - 0,25 \text{ hm. \% C}$. Hlavním problémem je vysoká prokalitelnost a náchylnost ke tvorbě trhlin za studena. Svařuje se přídavnými materiály stejného chemického složení, nebo austenitickými elektrodami. Oceli se svařují zásadně s předehřevem cca $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Je nutné je neprodleně po svaření žíhat na teplotu $600 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$ pro popuštění martenzitu a snížení pnutí. Pokud není možné zařadit po svařování žíhání, doporučuje se svařovat elektrodami s menším průměrem na více vrstev, aby každá následující housenka vyžihala tu předchozí. Typickou aplikací jsou např. chirurgické nástroje a nože [5, 6].

Duplexní korozivzdorné oceli:

Podstatou duplexních ocelí je mikrostruktura složená ze dvou fází. Pravděpodobně nejčastější jsou oceli austeniticko - feritické. Mikrostruktura je tvořena feritickou (ferit delta) maticí ($40 - 70 \text{ \%}$), v níž je zbytek austenitický. Jejich výhodou je vyšší pevnost ve srovnání s čistě austenitickými či feritickými oceli při zachování velmi příznivé korozivzdornosti. U těchto ocelí téměř nedochází ke vzniku trhlin za tepla, jelikož krystalizují jako oceli feritické. Svařuje se většinou bez předehřevu, případně u silnostěnných svařenců s předehřevem do $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Po svaření se tepelně nezpracovávají. Při svařování bez přídavného materiálu (plazma, el. odpor, laser,...) obsahuje svarový kov a TOO vysoké množství feritu, což je na úkor korozivzdornosti [4, 6].

Příklad mikrostruktury duplexní oceli a jejího svaru je na obrázku níže, přičemž na obrázku vlevo je základní materiál a vpravo svarový kov; feritická matrice (tmavá fáze) a austenit (světlá fáze) [7].



Obr. 2: Mikrostruktura duplexní oceli; vlevo ZM, vpravo svarový kov [7]

2.1 Svařování austenitických ocelí

Austenitické oceli krystalizují v FCC mřížce, jejich mikrostruktura je austenitická. Jejich korozní odolnost je vyšší než u ocelí feritických a martenzitických. Jedná o hojně využívané materiály v široké škále aplikací.

Hlavní legujících prvky jsou vždy Cr a Ni. Pro empirické určení výsledné mikrostruktury svarového spoje Cr – Ni austenitických ocelí s nízkým obsahem dusíku se využívá Schaefflerův diagram uvedený na obrázku níže. Diagram je možné použít za předpokladu svařování bez přehřevu a zároveň rychlého ochlazení spoje při rychlém ochlazení z rozpouštěcí (austenitizační) teploty na pokojovou teplotu. Výsledná mikrostruktura se odvíjí od tzv. chromového a niklového ekvivalentu. Tyto ekvivalenty v podstatě vyjadřují vztah mezi austenitotvornými prvky (Ni, C, Mn, N), které rozšiřují oblast austenitu, a feritotvornými prvky (Cr, Mo, W, V, Si, Nb, Ti), které rozšiřují oblast feritu. Ekvivalenty se vypočítají podle vztahů níže [1, 4].

$$\text{Cr ekv.} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 0,5\% \text{W} + \% \text{V} + 1,5\% \text{Si} + 0,5\% \text{Nb} + \% \text{Ti}$$

$$\text{Ni ekv.} = \% \text{Ni} + 30\% \text{C} + 0,5\% \text{Mn} + 50\% \text{N}$$

Pro ocel 316L, kterou se tato práce zabývá, je tedy možné vypočítat ekvivalenty při uvažování chemického složení podle normy ČSN EN 10088-2 (uvažování středních hodnot) [8].

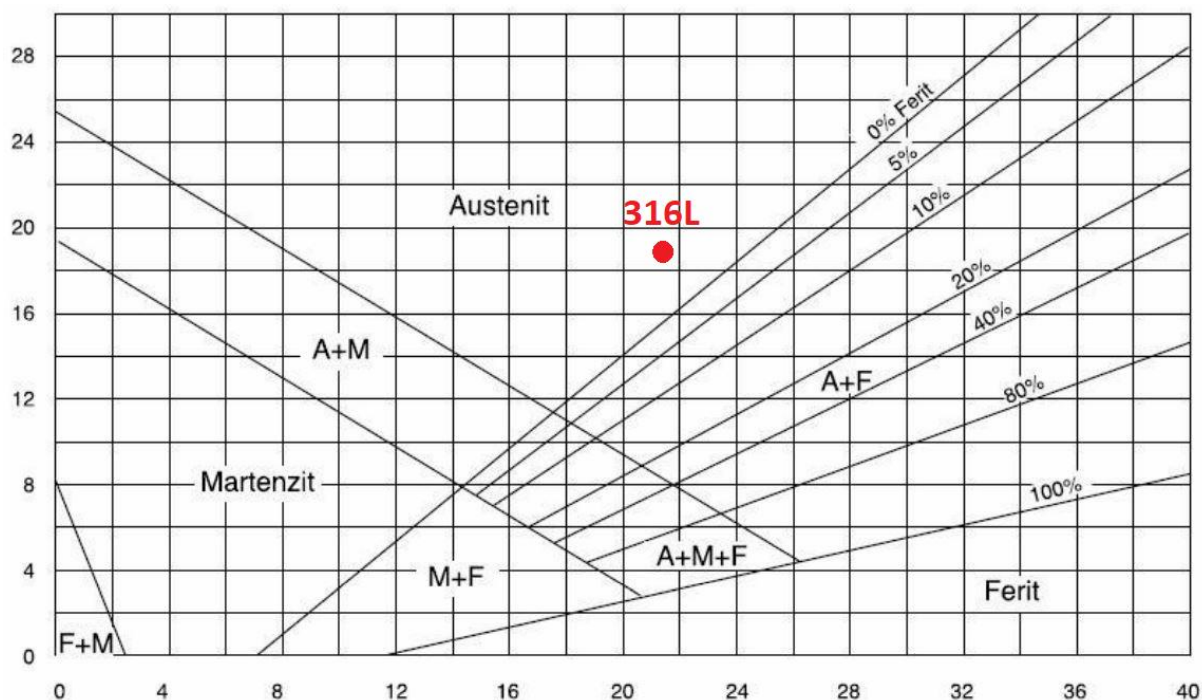
Tab. 1: Chemické složení oceli 316L v hmotnostních % [8]

Značka	číslené ozn.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Cu	Ostatní
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	0,03	1,0	2,0	0,045	0,03	16,5 - 18,5	2,0 - 2,5	10,0 - 13,0	0,1	-	-

$$\text{Cr ekv.} = 17,5 + 2,25 + 1,5 \cdot 1,0 = \mathbf{21,25}$$

$$\text{Ni ekv.} = 11,5 + 30 \cdot 0,03 + 0,5 \cdot 2,0 + 50 \cdot 0,1 = \mathbf{18,4}$$

Po vypočtení těchto hodnot je možné vyznačit ocel 316L v Schaefflerově diagramu. Na ose x je Cr ekvivalent a na ose y Ni ekvivalent. Ocel 316L je tedy svou mikrostrukturou čistě austenitická.



Obr. 3: Schaefflerův diagram s vyznačením oceli 316L [9]

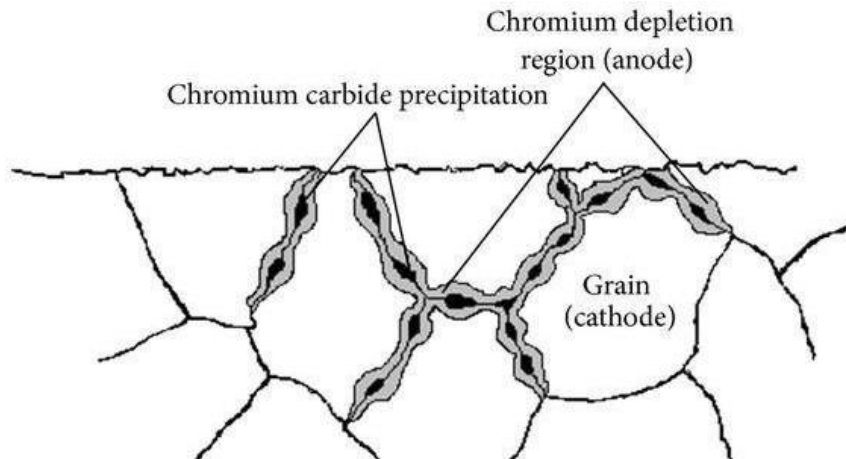
Upřesňujícím diagramem pro Schaefflerův diagram je De Longův diagram. Tento diagram uvažuje navíc dusík jako důležitý austenitotvorný prvek. Je přesný pro oceli s nízkým obsahem feritu a manganu [4].

Nejdůležitější faktory mající vliv na svařitelnost jsou sklony ke vzniku trhlin za tepla, precipitace karbidů chromu, které vedou k mezikrystalové korozi a náchylnost ke zkřehnutí při vzniku σ – fáze. Austenitické oceli jsou vysokolegované oceli, které mají vyšší tepelnou roztažnost cca o 50% a 30% nižší tepelnou vodivost ve srovnání s konstrukčními feritickými oceli, což se při vytváření svarových spojů projevuje většími deformacemi; zároveň jsou však více tažné a houževnaté. [4].

2.2 Problémy při svařování austenitických ocelí

Problémem souvisejícím se svařováním austenitických ocelí je vznik tzv. pásma zcitlivění, což je oblast v TOO vznikající především u ocelí s obsahem $C > 0,05\%$. Vznik pásma zcitlivění je způsoben precipitací karbidů, typicky $Cr_{23}C_6$. Teplotními procesy při svařování atomy uhlíku v tepelně ovlivněné oblasti rychle difundují na hranice zrn, kde sloučením s chromem vznikne karbid, čímž dojde k nežádoucímu ochuzení austenitického zrna o chrom. Toto pásmo se nevyskytuje v TOO hnedka hranicí ztavení, ale až v místech s nižší maximální dosaženou teplotou v intervalu $650 - 870$ °C. V tomto pásmu dochází k mezikrystalové korozi (MKK). Na hranicích zrn dochází ke vzniku oblastí výrazně ochuzených o chrom, které se stanou anodickými vůči svému okolí a jsou přednostně napadány korozním prostředím [10].

Obrázek níže schématicky znázorňuje tento jev. Po hranicích zrn vznikají karbidy chromu a v těchto místech následně vznikají zóny ochuzené o chrom [60].



Obr. 4: Precipitace karbidů chromu v pásmu zcitlivění [60]

Šířka pásma zcitlivění je spjatá s obsahem uhlíku, kdy při stejném vneseném tepla se se zvyšujícím obsahem C rozšiřuje i pásmo zcitlivění. Dalším faktorem je množství vneseného tepla. Při stejném obsahu uhlíku platí, že čím větší vnesené teplo, tím rozsáhlejší pásmo. Vzniku tohoto jevu se dá předcházet především vhodným teplem zpracováním základního materiálu před svařováním, a to rozpouštěcím žháním v intervalu teplot 1000-1100 °C s následným ochlazením ve vodě. Dále je vhodné volit ocel s nižším obsahem C, např. ocel 316 s obsahem C max. 0,08% je ke vzniku pásma zcitlivění mnohem více náchylná, než ocel 316L s obsahem C max. 0,03. Při snížení obsahu C pod 0,02% již ke vzniku nežádoucích karbidů nedochází. [4, 10].

Další možností je legování oceli stabilizačními prvky, což jsou legury s vyšší afinitou k uhlíku, než chrom. Jedná se o titan, niob a případně i tantal. Přídavné svařovací dráty pro austenitické oceli by měly být legovány niobem [4, 10].

2.3 Praxe svařování austenitických ocelí

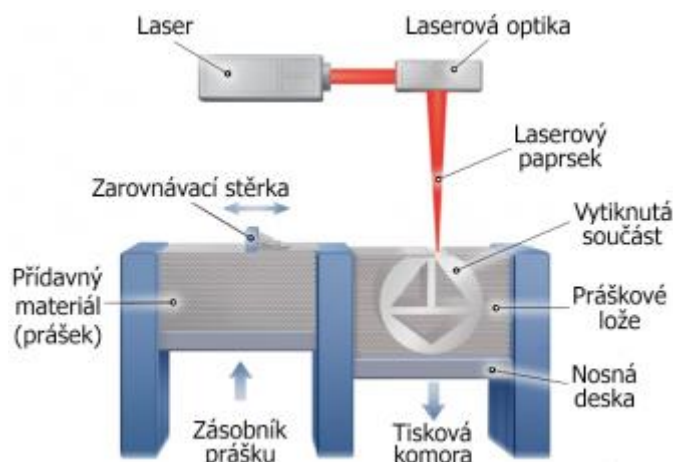
Svařování austenitických ocelí se provádí výhradně bez předehřevu. Hodnota vneseného tepla by měla být maximálně $1,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$. Mezihousesková teplota (teplota interpass) by měla být max. 150 °C; dále poměr šířky a hloubky svarové lázně by měl být max. 1,5. Doporučená metoda svařování je TIG stejnosměrným proudem s – pólem na elektrodě. Důležitý je také dostatečný odvod tepla z místa svarového spoje. Přídavné materiály se většinou volí tak, aby byl jejich obsah chromu a molybdenu vyšší, než u základního materiálu [6].

3 Svařování aditivně vyrobených ocelí

3.1 Princip technologie PBF

Powder Bed Fusion (PBF) je aditivní technologie využívající laserový paprsek, který s vysokou přesností roztavuje tenké vrstvy jemného kovového prášku umístěného na pracovním loži po vrstvách. Jednotlivé vrstvy postupně staví na sebe, čímž vzniká 3D objekt. V CAD programu se nejprve vymodeluje požadovaný tvar a následně je součást v programu rozdělena do jednotlivých vrstev pro výrobu. Laser vytvoří roztavením práškového materiálu jednu vrstvu. Po ztuhnutí roztavených částic poklesne nosná deska o tloušťku vrstvy a celý proces se opakuje, dokud není vytvořena celá součást. Zbylý neroztavený prášek v tiskové komoře slouží jako podpora konstrukce součásti a po vytvoření součásti je odstraněn a znovu

použit při další výrobě. Vzniklá struktura je homogenní s nízkou pórovitostí a dobrými mechanickými vlastnostmi. Princip metody PBF je na obrázku níže [12, 13, 14].



Obr. 5: Princip metody PBF [14]

Metodou PBF se vyrábí široká škála kovových materiálů; běžně oceli různých tříd, niklové a titanové slitiny. Některé kovy jako např. hliník jsou kvůli své vysoké tepelné vodivosti a oxidační vlastnostem obtížné na výrobu metodou PBF a jejich výroba je technologicky náročnější [12].

Mezi metodami aditivní výroby je tzv. Powder Bed Fusion – PBF (jiným názvem Laser Powder Bed Fusion – LPBF, či Selective Laser Melting - SLM) tou pravděpodobně nejběžnější a nejpoužívanější díky schopnosti produkovat tvarově komplexní součásti s příznivými mechanickými hodnotami. Jedním z limitů technologie je maximální vyrobitelná velikost součásti odvíjející se od velikosti pracovní komory stroje [15].

Při svařování aditivně vyrobených součástí je zásadní co největší možné udržení jemnozrné struktury pro zachování mechanických vlastností. Díky nízkému množství vneseného tepla je laserové svařování pravděpodobně nejvhodnější technologií. Výzkumy laserového svařování aditivně vyrobené nerezové oceli ukazují, že při správně zvládnuté technologii je možné dosáhnout stejných hodnot pevnosti u svařených dílů, jako u dílů vyrobených aditivně v jednom kuse [16].

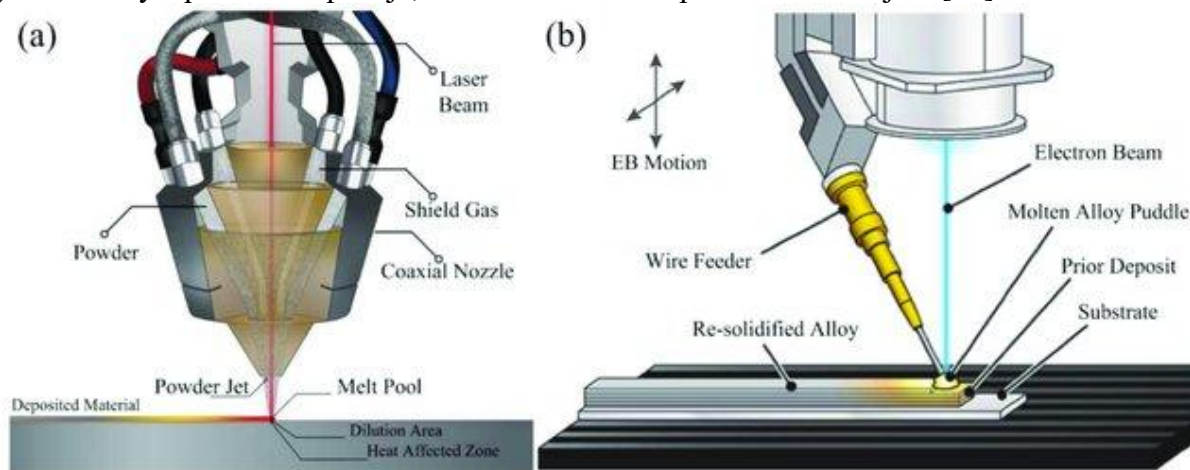
Svařování aditivně vyrobených materiálů je vzhledem k masivnímu rozvoji těchto technologií velmi aktuální téma. Svařování takto vyrobených dílů by mohlo vyřešit problém s omezenou velikostí součásti u PBF. Při rozvoji technologie pro svařování aditivně vyrobených součástí by bylo možné rozdělit značně rozměrný výrobek na několik menších, které by se vešly do komory. Následně by se sestavily a svařily, čímž by se vyřešil problém s omezenou velikostí vyráběných komponent.

3.2 Princip technologie DED

Direct Energy Deposition (DED) je moderní aditivní technologie laserového navařování pro kovy, keramiku a jejich směsi. Navařováním vrstev materiálu, kdy je jako přídavný materiál použit prášek nebo drát je možné vytvářet 3D objekty, případně opravovat a povlakovat díly vyrobené jinou, např. konvenční technologií. Své použití nachází např. při opravách lopatek turbín, navařením funkčních ploch specifických vlastností, nebo při vytváření vrstev chránících proti korozi. Pro tuto technologii se často užívá také označení LMD (Laser Metal Deposition), DMD (Direct Metal Deposition), nebo Laser Cladding [17].

Velkou výhodou této technologie je možnost 3D tisku rozměrných dílů, jelikož pracovní prostor není omezený práškovým ložem, tak jak je tomu u technologie PBF [18].

Princip technologie je na obrázku níže. Na obrázku vlevo je použití laserového paprsku jako zdroje tepla a navařovacího prášku; na obrázku vpravo je použit elektronový paprsek a přídavný drát. Přiváděný přídavný materiál je roztavován paprskem o vysoké hustotě energie na povrchu součásti a vytváří v podstatě tenké svarové housenky v jedné rovině. Po dokončení jedné vrstvy se navařovací hlava, nebo pracovní stůl posune o výšku jedné vrstvy a proces se opakuje, čímž vzniká vrstvu po vrstvě 3D objekt [19].

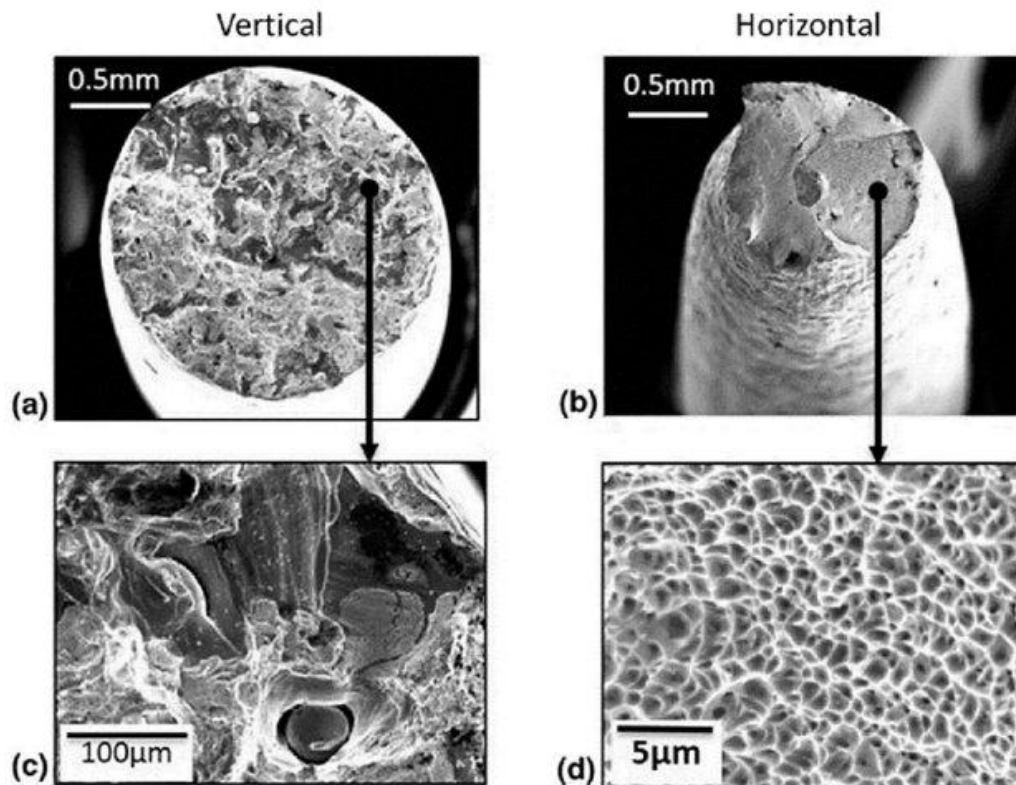


Obr. 6: Princip technologie DED, vlevo použití prášku, vpravo drátu [19]

3.3 Vlastnosti oceli 316L vyrobené metodou DED

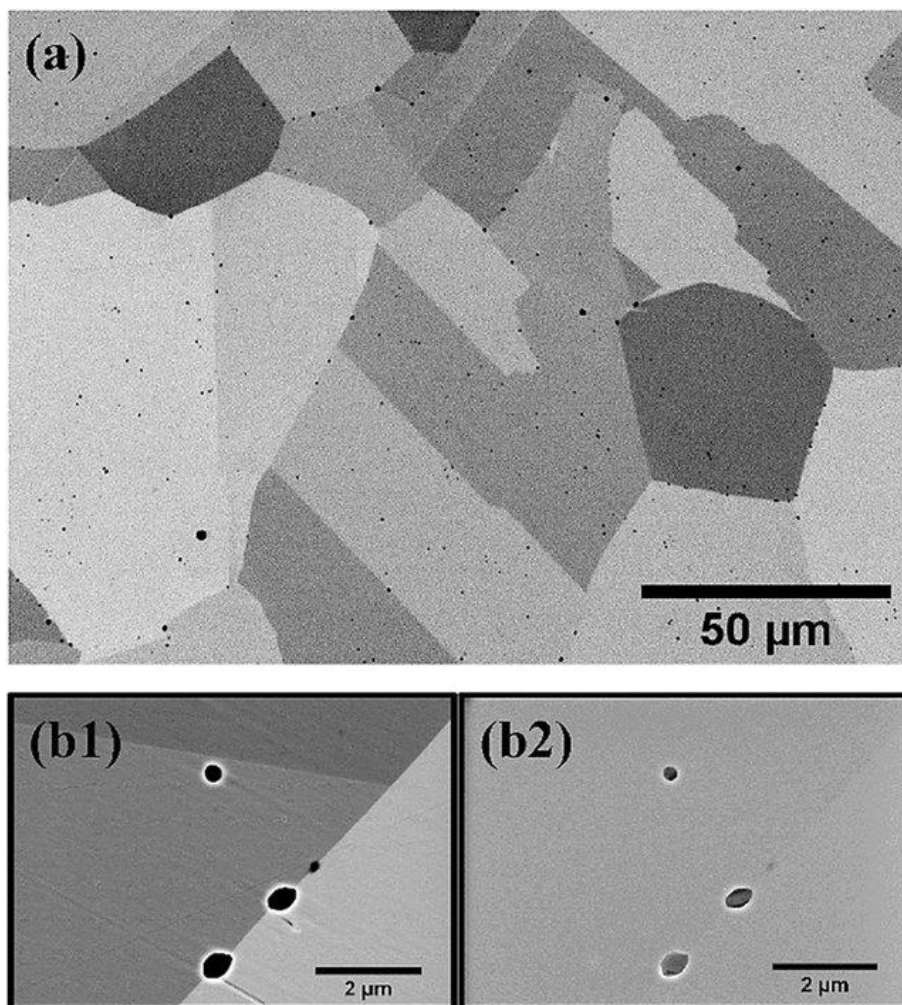
Na vlastnosti aditivně vyrobené oceli má vliv mnoho parametrů procesu, jako je množství použitého výkonu, čistota prášku (popř. drátu), tloušťka vrstev, typ ochranného plynu, rychlost depozice, kvalita svazku (laserového, elektronového), a další. Technologie DED se vyznačuje velmi vysokými rychlostmi ochlazování; pro ocel jsou typické kolumnární a buněčné struktury. Vysoké rychlosti ochlazování vytvářejí jemné dendrity, což dává oceli vysoké hodnoty mechanických vlastností. Obecně má tato ocel nižší hodnoty tažnosti ve srovnání s konvenčně vyrobenou válcovanou ocelí [20].

Ocel 316L vyrobená metodou DED vykazuje anizotropické chování. Obvykle se však provádí tepelné zpracování (u austenitické oceli 316L rozpouštěcí žíhání), které vlastnosti homogenizuje. Vliv na mechanické vlastnosti má také směr depozice, resp. směr mechanického namáhání součásti ve vztahu k orientaci deponovaných vrstev. Porovnání snímků lomové plochy vertikálně a horizontálně vyrobeného dílu z řádkovacího elektronového mikroskopu (SEM) je na obrázku níže. Vertikální směr znamená, že součást je zatěžována ve stejné rovině, ve které byla tištěna. Horizontální orientace je naopak taková, že zatěžování probíhá kolmo na směr depozice. Lepších mechanických hodnot (mez kluzu, mez pevnosti) se dosahuje při horizontální orientaci; vertikální vzorky vykazují značně nižší tažnost. Rozdíl v orientaci je patrný při zkoumání lomové plochy. Horizontální vzorky mají tendenci k výrazné tvorbě krčku, zatímco vertikální jen minimální, viz obrázek níže [20].



Obr. 7: Porovnání horizontálně a vertikálně zatěžované DED oceli 316L [20]

Na obrázku níže je fotografie mikrostruktury aditivně vyrobené oceli 316L. Mikrostruktura DED oceli 316L je austenitická s malým množstvím delta feritu. Na horním snímku jsou patrné oxidické vměstky rozmístěné po hranicích i uvnitř austenitických zrn. S největší pravděpodobností se jedná o oxidy křemíku nebo manganu. Tyto oxidy se u oceli 316L vyrobené metodou DED vyskytují i přes použití ochranného inertního plynu. U DED ocelí však mají tyto oxidy ve srovnání s konvenčně vyrobenými oceli mnohem menší negativní vliv na mechanické vlastnosti, jelikož jsou většinou malé a mají oblý tvar; mohou mít však negativní vliv na korozní odolnost oceli [20].

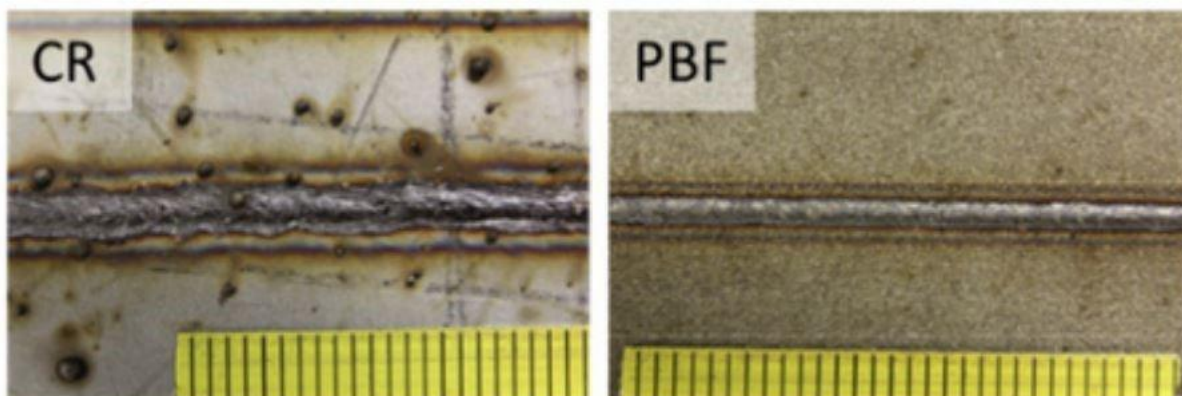


Obr. 8: Austenitická mikrostruktura oceli 316L vyrobené metodou DED [20]

3.4 Svařování aditivně vyrobených ocelí laserovým paprskem

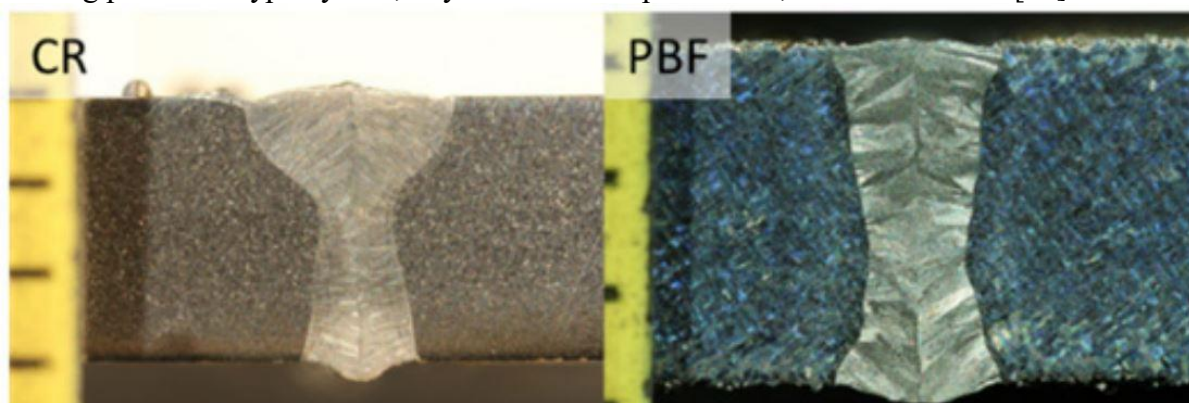
Experiment [21] se zabýval rozdíly mezi PBF aditivně vyrobenou a válcovanou austenitickou ocelí 316L svařenou laserem při stejných parametrech.

Při vizuální zkoušce svarů byl patrný značný rozstřík u všech válcovaných plechů, zatímco u PBF plechů se tato vada nevykytovala, viz obrázek níže [21].



Obr. 9: Porovnání svaru válcované a PBF vyrobené oceli 316L [21]

Při makroskopickém hodnocení svarů byl jasně patrný rozdíl mezi válcovaným a PBF materiálem. Tvar svaru u válcovaného materiálu odpovídal běžným představám o keyhole welding, tedy postupně se zužující tvar svarové housenky. Oproti tomu PBF měl pro keyhole welding poměrně atypický tvar, kdy svar měl tvar písmene X, viz obrázek níže [21].



Obr. 10: Makroskopické hodnocení svaru válcované (CR – vlevo) a aditivně vyrobené (PBF - vpravo) oceli 316L [21]

Rozdíl mezi svary je vysvětlitelný rozdílnými schopnostmi materiálů absorbovat energii z laserového záření. Jelikož je povrch PBF oceli mnohem drsnější a tedy více pohltivý, může se keyhole svar snadněji formovat a vytvářet pravidelnější tvar. Je tedy možné dosáhnout lepších průvarů s použitím menšího výkonu laseru, než v případě válcované oceli [21].

Experiment [15] se rovněž zabýval porovnáním válcované a PBF oceli 316L. Ocel byla svařena laserem stejnými parametry a na vzorcích byly provedeny zkoušky tvrdosti podle Vickerse a tahové zkoušky. Rozdíly mezi svařovanými materiály ukazuje tabulka níže [15].

Tab. 2: Porovnání válcované a PBF vyrobené oceli 316L [15]

Materiál	Válcovaný plech	Svařený válcovaný plech	PBF plech	Svařený PBF plech
Tvrdość základního materiálu [HV1]	164 +- 5	166+-6	241+-5	238+-6
Tvrdość v oblasti svaru [HV1]	—	190+-8	—	197+-5
Pevność v tahu [MPa]	602+-2	598+-3	568+-5	568+-2
Poměrné prodloužení [%]	73+-6	56+-3	51+-1	42+-14
Místo lomu	základní materiál	svarový kov	základní materiál	základní kov

K lomu došlo u válcovaného plechu v oblasti svaru, zatímco u PBF plechu v základním materiálu. Svařování mělo minimální vliv na pevnost v tahu obou materiálů, nicméně u válcovaného materiálu došlo k výraznějšímu poklesu tažnosti, než u PBF. Zajímavé je zjištění, že tvrdość v oblasti svaru se u válcovaného materiálu zvýšila o 14%, zatímco u PBF se snížila o 17% [15].

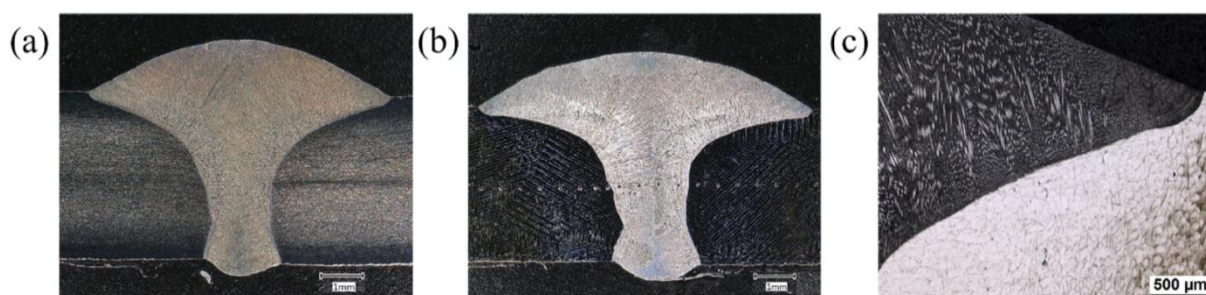
Ze studia literatury a provedených experimentů v odborných člancích vychází závěr, že svařování laserovým paprskem je pro svařování dílů vyrobených metodou PBF velice vhodné a je možné dosáhnout vysoce kvalitních svarových spojů. Pevnost v tahu svařenců z PBF plechů dosahuje hodnot základního materiálu.

3.5 Svařování aditivně vyrobených ocelí obloukovými metodami

Článek [22] se hodnocení svarových spojů mezi aditivně vyrobenou ocelí metodou laser powder bed fusion (L-PBF = PBF) a klasickou tvářenou ocelí 316L při využití metody TIG. Jedním z výsledků experimentu bylo, že vytvořený přechodový spoj aditivní – tvářená ocel dosahoval nižší meze kluzu o 12,59% a o 36,02% nižší tažnosti než referenční spoj tvářená – tvářená ocel. Experiment dále zahrnoval vliv korozního prostředí (solného roztoku) na mechanické vlastnosti přechodových svarů. Autoři uvádějí, že z 12 nezkorodovaných vzorků došlo u 9 vzorků k přetržení zkušebního tělesa při tahové zkoušce ve svaru; pouze u 3 vzorků v základním tvářeném materiálu. Pro zkorodovanou sérii 8 vzorků došlo ve všech 8 případech k porušení ve svaru. Článek došel k závěru, že je možné vytvořit svarový spoj mezi ocelí vyrobenou metodou PBF a tvářenou, přičemž mez pevnosti i kluzu bude více než 80% oproti základnímu materiálu. To podporuje domněnku dobré svařitelnosti aditivně vyrobené oceli [22].

Článek [23] se podobně jako výše uvedený experiment věnoval svařování aditivně vyrobené oceli 316L metodou laser powder bed fusion s použitím metody svařování MIG. Experiment se věnoval porovnání lomové houževnatosti a odolnosti proti únavovému porušování při uvažování rozdílných směrů depozice vrstev. Jedna série vzorků byla deponována paralelně se svarem mezi plechy a druhá kolmo na svar; třetí série vzorků byla z válcovaného plechu jako referenční. Aditivní vzorky vykazovaly vyšší tvrdost v základním materiálu v oblasti svaru a nižší hodnoty vrubové houževnatosti. Směr depozice ve vztahu ke svaru měl velký vliv především na mez pevnosti a mez kluzu. Kolmo deponované vzorky vykazovaly vyšší hodnoty pevnosti a nižší tažnosti v porovnání s paralelními vzorky, které měly nejnižší mez pevnosti. Nejvyšší tažnosti dosáhly válcované vzorky. Vzorky s paralelní orientací též vykazovaly vyšší mez únavy než vzorky kolmo deponované. Tím bylo potvrzeno anizotropické chování svařenců z LPBF oceli [23].

Obrázek níže porovnává makro strukturu válcované a aditivně vyrobené oceli s detailem na hranici ztavení LPBF oceli. U LPBF oceli jsou ve svarovém kovu viditelné hrubé dendrity a velmi tenká hranice ztavení [23].



Obr. 11: Makro struktura svarů a) válcovaný, b) PBF, c) detail hranice ztavení PBF [23]

Experiment [24] porovnával svařitelnost aditivních dílů vyrobených metodou powder bed fusion s konvenčními válcovanými trubkami z oceli 316L s použitím metody svařování TIG. Vzorky přechodového svaru mezi aditivní a tvářenou ocelí dosahovali pevnosti cca 580 MPa a ve všech případech došlo k tvárnému porušení v základním tvářeném materiálu [24].

Největší rozdíly mezi materiály byly při porovnání vrubové houževnatosti pro TOO při snížené teplotě -101 °C. Zde tepelně ovlivněná oblast tvářené oceli dosáhla hodnoty 62 J, zatímco PBF ocel pouze 21 J, ovšem u základní teplem neovlivněné oblasti PBF oceli byla naměřena hodnota 24 J; vlivem svařování tedy došlo jen k malému poklesu vrubové houževnatosti. Dále byla hodnocena odolnost TOO obou ocelí proti koroznímu napadení. Výstupem z článku z článku [24] tedy bylo, že ocel 316L vyrobená aditivně metodou PBF je metodou TIG svařitelná s dobrými výsledky s omezeními pro použití v kryogenních teplotách [24].

Při sumarizaci poznatků z výše uvedené literatury lze konstatovat, že ocel 316L vyrobená aditivní metodou PBF je obloukovými metodami TIG a MIG dobře svařitelná. O svařitelnosti DED oceli 316L, kterou se tato diplomová práce zabývá, však v současnosti neexistuje příliš relevantních publikací, a proto je jedním z cílů experimentu této práce zhodnocení svařitelnosti této oceli metodou TIG.

3.6 Výpočet vneseného tepla pro obloukové metody svařování

Průběhy výše popsaných svařovacích procesů by měl být zaznamenán do záznamů svařování (welding rekord). Aby bylo možné provést výpočet vneseného tepla, musí být pro každou housenku měřen čas. Při známých parametrech procesu je pak možné vnesené teplo vypočítat podle následujícího vzorce:

$$Q = \eta * \frac{U * I * 60}{v * 1000}$$

- Q – Tepelný příkon (vnesené teplo) [kJ/mm]
- U – Napětí [V]
- I – Proud [A]
- v – rychlost svařování [mm/min]
- η – koeficient tepelné účinnosti – pro metodu TIG je obecně používána hodnota 0,6 [-]

$$\eta = \frac{Q_{\text{vnesená}}}{Q_{\text{celková}}}$$

- $Q_{\text{vnesená}}$ – Energie vnesená do svarového spoje
- $Q_{\text{celková}}$ – Celková energie oblouku [25]

4 Technologie laserového svařování

4.1 Svařování bez přídavného drátu

Laserový paprsek je charakteristický vysokou energií a značnou hodnotou výkonové hustoty, a proto je laserové svařování považováno za vysoce pokročilý způsob spojování materiálů. Pomocí LBW (z angličtiny „Laser Beam Welding“) je možné provádět svařování vysokými rychlostmi, dosahovat hlubokých průvarů a též je tato technologie vhodná pro aplikace vyžadující vysokou rozměrovou preciznost [26].

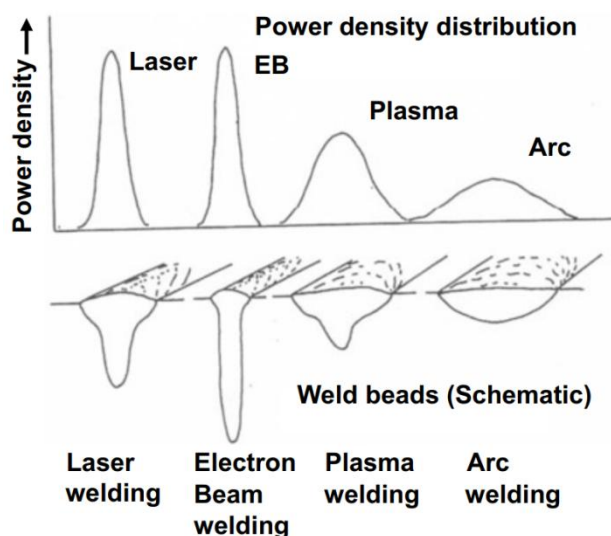
Technologií laserového svařování je možné zpracovávat široké množství materiálů různých tloušťek; kovy a polymery od desítek mikrometrů až po plechy tloušťky několik desítek milimetrů. Technologie LBW se vyznačuje vysokou kvalitou svaru, vysokou přesností, účinností, rychlostí a především menší tepelně ovlivněnou oblastí, než je tomu např. u obloukového svařování [27].

Základní fyzikální vlastnosti ovlivňující proces laserového svařování jsou tepelná vodivost, hustota, měrná tepelná kapacita, teplotní roztažnost a teplota tání. Nerovnoměrné vedení tepla mezi kovy (slitinami) u heterogenních svarů s odlišnou tepelnou vodivostí může vést k vytvoření nevyhovujícího svaru. Díky značně vyšší výkonové hustotě ve srovnání s konvenčními technologiemi svařování však může být laserové svařování ideálním řešením pro tyto spoje [28].

Klíčovým požadavkem při LBW je vytvoření stabilní svarové lázně požadované velikosti. Pokud je objem svarové lázně příliš velký nebo malý, nebo pokud dochází k přílišnému vypařování roztaveného kovu, svar bude obsahovat defekty. Při procesu často dochází k přerušování paprsku mezi zdrojem a materiálem kvůli vznikajícím horkým plynům, které se mohou za určitých podmínek přeměnit v plazma a vážně utlumit účinek laserového paprsku [29].

Technologie laserového svařování je v mnohých ohledech podobná svařování elektronovým paprskem, kdy je pro obě technologie charakteristická vysoká hustota výkonu. U obou technologií je možné vytvořit značně hluboký a úzký svar tzv. keyhole. Oproti tomu pro svařování elektrickým obloukem a svařování plazmou je typická menší hloubka průvaru a větší šířka svaru [26].

Znázornění vlivu výkonové hustoty a rozložení energie ve svaru je na obrázku níže. V horní části schématu je na ose y poměr výkonové hustoty a na ose x rozložení výkonové hustoty na ploše svařovaného materiálu. Níže na obrázku jsou zobrazeny typické profily svarových housenek pro jednotlivé svařovací technologie [26].



Obr. 12: Porovnání laserového, elektronového, plasmového a obloukového svařování [27]

Svařování laserovým paprskem se dělí na kondukční a hloubková (tzv. keyhole – z angl. Klíčová dírka). Hlavním rozdílem je množství použité výkonové hustoty. Pro svařování se používá výkonová hustota v rozmezí 10^4 až 10^8 $W \cdot cm^{-2}$, přičemž pro řezání laserem přibližně 10^{10} $W \cdot cm^{-2}$. Pro kondukční svařování je charakteristická výkonová hustota menší než přibližně $0,5 \cdot 10^6$ $W \cdot cm^{-2}$. Pro kondukční svařování je typická malá hloubka průvaru a větší šířka svarového kovu, přibližně v poměru hloubka/šířka = 1/1. Pro svařování typu Keyhole nabývá výkonová hustota obvykle hodnot větších než $1,5 \cdot 10^6$ $W \cdot cm^{-2}$ a poměru hloubka/šířka $> 1,5$. Většina svarů v průmyslových aplikacích je typu keyhole [30, 31].

Při známé energii laseru, době trvání pulzu a ploše dopadu je možné vypočítat výkonovou hustotu pro pulzní laser podle následující rovnice [32].

$$\text{Výkonová hustota} = \frac{\text{Energie [J]}}{\text{doba pulzu [s]} \times \text{plocha dopadu [cm}^2\text{]}} \left[\frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right]$$

Z uvedené rovnice vyplývá, že se výkonová hustota dá zvýšit použitím laseru s vyšší energií, nebo snížením doby pulzu, popřípadě zmenšením plochy dopadu [32].

Jak již bylo zmíněno výše, pro laserové svařování typu Keyhole je potřebný svazek o vysoké výkonové hustotě, čímž se dosahuje extrémně rychlého ohřevu materiálu v místě interakce paprsku s povrchem. Dochází k částečnému vypařování materiálu a vzniklé páry začnou formovat hlubokou dutinu přibližně válcovitého tvaru, která se šíří spolu s pohybem laserového svazku podél svarového spoje. Materiál je roztavován na přední straně dutiny (na čele) a tavenina se přesouvá dutinou k zadní stěně, kde následně tuhne a vzniká svarový kov [33].

4.2 Laserové svařování s přídavným drátem

Při svařování dílů větších tloušťek je většinou nutné použití přídavného drátu, a to z několika důvodů. Tím hlavním je především maximální použitelný výkon laseru, kdy energie paprsku nedokáže protavit celou tloušťku plechů sesazených natupo bez úkosu. U hlubokých a úzkých svarů (keyhole) dokáže přídavný drát zajistit vhodné promíšení kovu v celé oblasti svarového kovu, což je velice vhodné pro vytváření heterogenních spojů, kdy je na legování přídavného drátu kladen značný důraz [34].

Jednou z nevýhod laserového svařování jsou vysoké nároky na přípravu, slícování a rozměrové tolerance svařovaných ploch. Použitím přídavného drátu dochází k jistému snížení těchto požadavků, a tím ke zvýšení produktivity a aplikovatelnosti laserové svařování v různých průmyslových odvětvích [35].

Metoda laser Cold wire (anglicky „studený drát“) je technologie svařování využívající přídavný drát přidávaný do svarové lázně, který je natavovaný stejným laserovým svazkem jako základní materiál. Označení studený drát znamená, že přídavný drát není až do okamžiku kontaktu s laserem nijak předehříván.

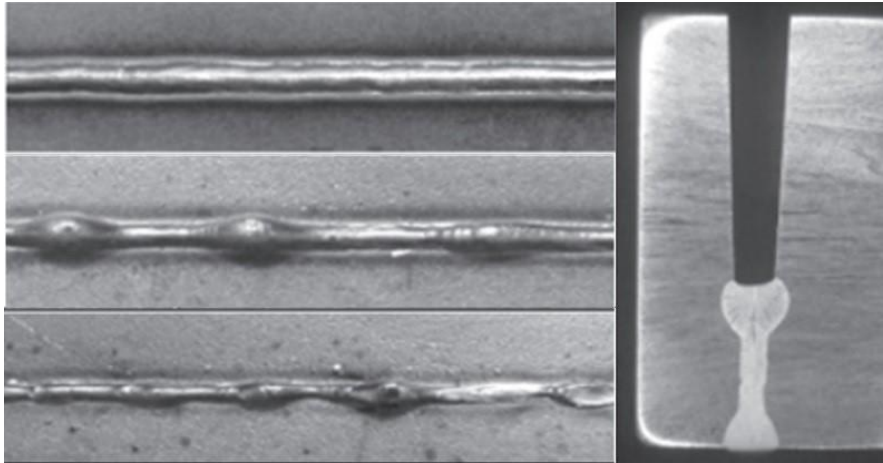
Laserové svařování s přídavným drátem cold-wire se pro plechy větších tloušťek provádí jako vícevrstvé (tzv. multi-pass), přičemž se svařuje buď z jedné strany, nebo z obou stran. Důležitým aspektem je tvar (geometrie) drážky. Její tvar se často navrhuje tak, že kořenová plocha je bez otupení a plechy spolu v kořeni lícují. První kořenová vrstva se tedy při tomto provedení svařuje většinou bez drátu, kdy laser zcela protaví kořenovou partii a drát se použije až na další výplňové svarové housenky. Tím vzniká velmi kvalitní kořen a zároveň se šetří přídavným drátem. Čím menší je úhel rozevření drážky, tím menším je množství použitého drátu. Detaily této technologie jsou popsány v následujících podkapitolách.

4.2.1 Svařování kořenové vrstvy

Při svařování kořene je zásadní, aby laserový paprsek dosáhl spodní strany plechu a nenatavoval při tom úkos, což může být problém především u plechů větších tloušťek. Z toho důvodu je pro svařování silnějších plechů potřebný úzký laserový paprsek [27].

Příklad problematiky technologie svařování kořenové partie je z publikace [27] při svařování plechů tloušťky 30 mm s výškou kořenové partie 10 mm. Při použití výkonu 6 kW a rychlosti svařování 0,5 m/min byl kořen provařen v celé délce svaru. Při zvyšování rychlosti na 0,75 m/min a ponechání výkonu 6 kW docházelo k nenatavení kořene. Toto zjištění vedlo

logicky k pokusu o zvýšení výkonu, avšak při použití 8 kW a rychlosti svařování 0,8-1,2 m/min docházelo k nerovnoměrnému a přílišnému protavení materiálu a kořen obsahoval vruby; byl tedy vyhodnocen jako nevyhovující. Výsledky experimentu jsou na obrázku níže. Vlevo nahoře je kořen pro 6 kW a 0,5 m/min, uprostřed 8 kW a 0,8 m/min, dole 8 kW a 1,2 m/min. Vpravo je makrosnímek kořene pro jedinou vyhovující konfiguraci 6 kW a 0,5 m/min [27].



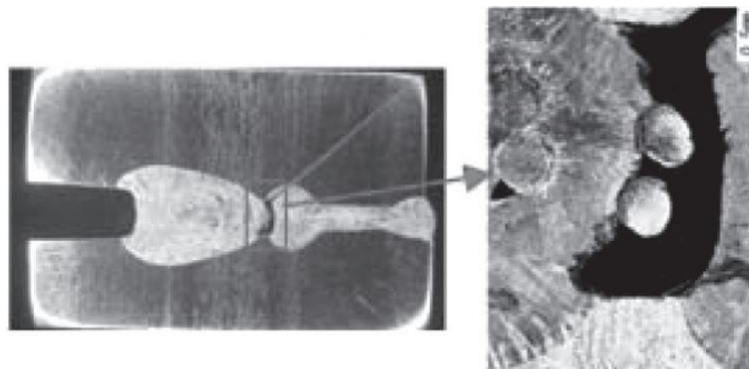
Obr. 13: Rozdílné parametry při svařování kořene [27]

4.2.2 Svařování výplňové a krycí vrstvy

Podstatným problémem při laserovém svařování s přídavným drátem na více vrstev je vyhovující natavení hran materiálu a zároveň svarových housenek mezi sebou. Nedostatečné natavení (angl. lack of fusion) je obtížné z procesu eliminovat, jelikož závisí na více parametrech, než neprotavený kořen; do procesu totiž vstupuje drát a jeho správně načasované podávání a tavení souběžně se základním materiálem.

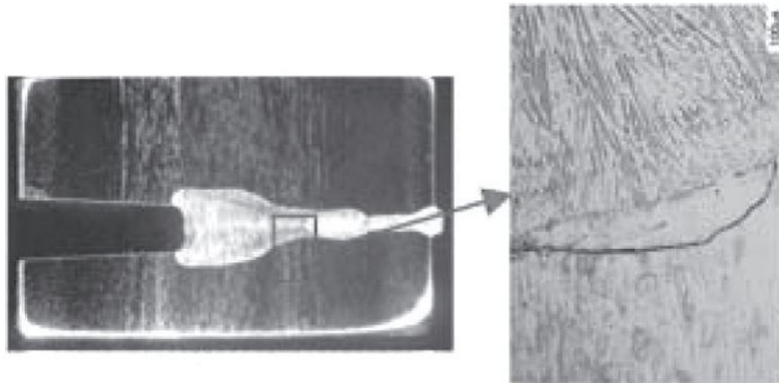
Nedostatečné natavení (studený spoj) je možné rozdělit na 2 vznikající typy při nevhodně zvoleném poměru výkonové hustoty a množství přidávaného drátu (v angličtině pojem tzv. deposited area; deposited metal); typ A a typ B, viz níže [27].

Typ A většinou vzniká, pokud je nízká výkonová hustota a velká natavovaná plocha, odvíjející se od rychlosti a průměru drátu. Nejčastěji k tomuto typu studeného spoje dochází mezi kořenovou vrstvou a první housenkou výplňové vrstvy, kdy nedojde k natavení kořene, nebo se naopak nenataví drát. Příčinou je tedy nadměrné množství přiváděného drátu s nedostatečnou mírou výkonové hustoty. Obrázek níže je příkladem této vady svaru [27].



Obr. 14: Studený spoj typu A [27]

Typ B často vznikne při použití příliš vysoké výkonové hustoty. Množství přidávaného drátu je nedostatečné, což způsobuje přílišné natavování předchozí housenky a dochází ke vzniku příliš úzké a hluboké keyhole. Nevhodný tvar klíčové dírky tedy způsobuje studené spoje mezi přidavným materiálem a základním materiálem. Při vývoji procesu a konfiguraci parametrů je tedy podstatné najít optimální poměr mezi výkonovou hustotou a množstvím přidávaného drátu. Obrázek níže demonstuje tento typ studeného spoje. [27].



Obr. 15: Studený spoj typu B [27]

4.2.3 Typy laserů

Základní typy laserů používaných pro svařování jsou Nd:YAG, diodový, vláknový a diskový laser.

Pevnolátkový Nd:YAG lasery se dělí na pulzní a kontinuální. Mají vysokou energii pulzu až 70 Joulů a především v pulzním režimu jsou velmi často používány. Diodové lasery se používají především pro navařování a kalení, jelikož mají většinou větší průměr svazku; mají vysokou účinnost, nízkou hmotnost a malé rozměry. Vláknové lasery mají velmi vysokou kvalitu svazku a mohou dosahovat vysokých výkonů (i 50 kW) při kompaktních rozměrech. Diskové lasery jsou modifikací Nd:YAG laserů. Jejich hlavní předností je vysoká kvalita výstupního paprsku [59].

4.2.4 Ochranný plyn

Funkce ochranného plynu je především ochrana svarová lázně před plyny o okolí a zabránění vzniku oxidů, nitridů a pórů. Zároveň plyn odstraňuje vznikající plazma z oblasti nad svarem. Nejpoužívanější inertní plyny jsou argon a helium. V závislosti na svařovaném materiálu se používají i aktivní plyny a jejich směsi, nejčastěji CO_2 , O_2 , H_2 [37].

Experiment [37] zkoumal rozdíl mezi Ar a He při svařování oceli S355 a austenitické oceli. Výsledkem bylo, že rozdíl vlivu Ar a He na mechanické vlastnosti spoje je minimální. Při hodnocení hloubky závaru však byl patrný rozdíl, a sice helium vyšlo jako lepší plyn [37].

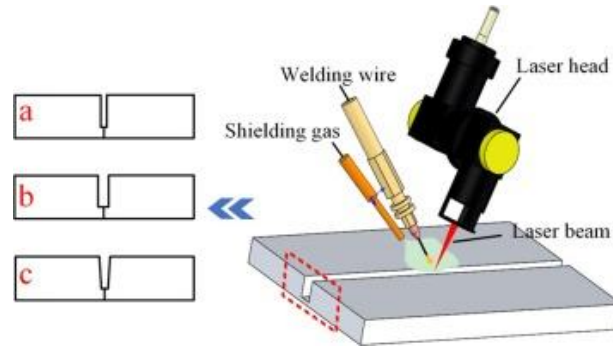
Při navrhování technologického procesu je však nutné posoudit i ekonomickou stránku, protože helium je ve srovnání s argonem výrazně dražší.

4.2.5 Tvar a šířka drážky

Správně navržený tvar a rozměry drážky jsou naprosto zásadní pro vytvoření kvalitního svaru. Při nevhodně zvolené drážce může docházet k odrazení laserového paprsku při průchodu drážkou ke kořenu a tím k nechtěnému předčasnému natavování hran, což může způsobit různé vady svarů, např. studené spoje (nenatavení materiálu), či pórovitost.

Při svařování do úzké drážky je většinou snaha o co nejužší možnou drážku. Publikace [38] se zabývala laserovým svařování austenitické oceli s přídavným drátem metodou cold wire. Svařované plechy byly tloušťky 8 mm.

Obrázek níže popisuje použité rozměry drážky. Drážka (a) byl rovná se šířkou 1,4 mm, drážka (b) byla také rovná se šířkou 1,6 mm a drážka (c) byla rozšiřující se z 1,4 mm u kořene na 1,6 na povrchu. Tloušťka kořenové partie byla u všech vzorků 2 mm. Průměr použitého drátu byl 1 mm, výkon laseru 1,2 kW a rychlost svařování 8 mm/s [38].

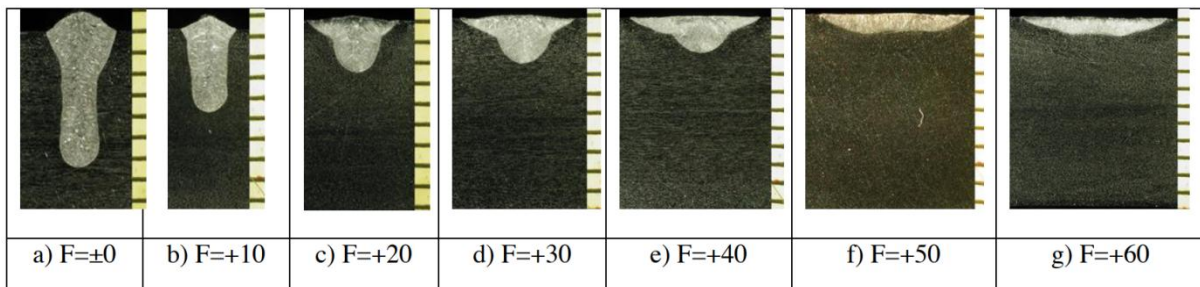


Obr. 16: Svařování metodou Cold wire pro různé rozměry drážky [38]

Experiment ukázal, že pro drážku 1,4 mm došlo v průběhu svařování po několika housenkách vlivem ohřátí k natolik významnému smrštění (z 1,4 mm na 0,9 mm), že drát jednoduše nebylo možné do drážky dále dodávat a vzorek byl tedy vyhodnocen jako nevyhovující. U drážky 1,6 mm docházelo k nepřesnému natavování přídavného materiálu, kdy se drát vychyloval z ohniska, a vznikaly studené spoje. Pro svařování do úzké mezery byla vyhodnocena jako nejlepší rozšiřující se drážky (c). Při použití tohoto typu drážky byl svar bez defektů, studených spojů a drát byl plynule přiváděn pro všechny svarové housenky [38].

4.2.6 Poloha ohniska laserového svazku

Správně zvolená poloha ohniska (místo fokusace laserového svazku) je klíčová pro správné natavování základního materiálu a přídavného drátu. Ohnisko může být umístěno mírně před materiál, přímo na povrch materiálu (drážky), nebo mírně pod povrch materiálu. Experiment [39] se věnoval vlivu polohy ohniska na svařování s přídavným drátem austenitických ocelí. Obrázek níže zobrazuje vliv polohy ohniska při přejezdu laserového svazku přes materiál bez drážky a přídavného drátu. Výkon byl 3 kW a rychlost svařování 0,4 m/min [39].



Obr. 17: Porovnání různých poloh ohniska; vlevo fokusace na povrch, vpravo +60 mm nad povrchem [39]

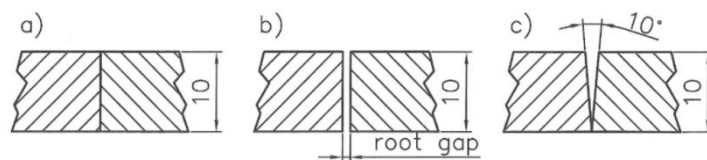
Rozdíly v makrosnímčích se odvíjejí od odlišné výkonové hustoty, kdy při fokusaci na povrch materiálu byl průměr svazku v místě dopadu 0,6 mm a výkonová hustota více než $1 \cdot 10^6$ m/cm² (což je jakási hranice pro keyhole svar) a hloubka nataveného materiálu byla více než 6 mm. Při oddalování ohniska od povrchu se postupně průměr svazku zvyšoval a tím

pádem klesala výkonová hustota. Při ohnisku 60 mm nad povrchem (g) byl průměr svazku 7,0 mm a výkonová hustota klesla na $0,8 \cdot 10^4$, což dle snímku výše nedokázalo natavit ocel do hloubky větší než 1 mm. Tento poznatek je následně podstatný při rozdíleném svařování kořenové a výplňové vrstvy. Pro svaření kořene se použije fokusace na povrch ($F=0$), kdy dojde k úplnému provaření. Při svařování výplňových vrstev je ohnisko umístěno mírně nad povrch (nad housenku) tak, aby docházelo k natavení přídavného drátu, předchozí housenky i základního materiálu a poměr nataveného materiálu byl více do stran a méně do hloubky [39].

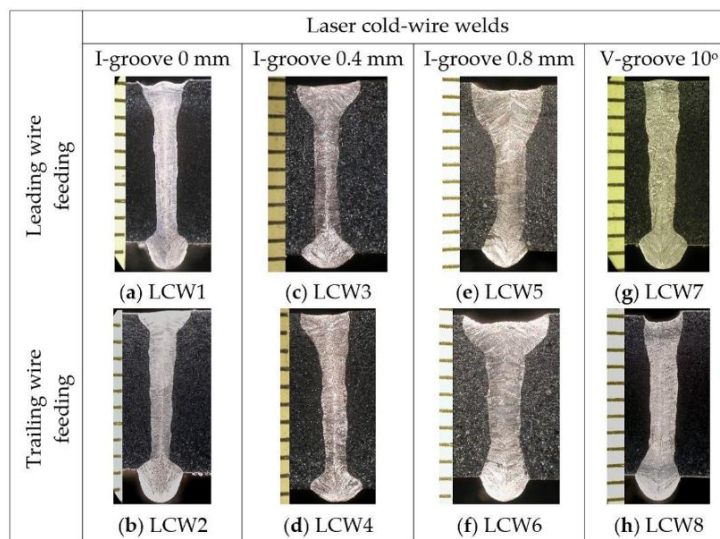
4.2.7 Pozice přídavného drátu

Další proměnnou vstupující do technologie laserového svařování s přídavným drátem je pozice přídavného drátu, a to sice zda bude podavač přídavného drátu umístěn před laserový paprsek a pohyb drátu je proti směru posuvu svařovací hlavy (leading wire), a nebo umístěn za laserový paprsek a do svaru dodáván ve směru posuvu (trailing wire). Toto uskupení má značný vliv na promíšení svarového kovu a tedy i kvalitu svaru.

Publikace [34] se zabývala vlivem umístění drátu a zároveň tvaru drážky pro laser – hybrid a laser – cold wire welding. Na experiment byly použity plechy o tloušťce 10 mm z austenitické oceli 316L. Byly zvoleny 3 tvary drážky, viz. obrázek níže; natupo bez mezery (a), natupo s mezerami 0,4 a 0,8 mm (b) a tvar V s úhlem rozevření 10° . Obrázek níže ukazuje tvary drážek [34].



Obr. 18: Tvary drážek použité v experimentu [34]



Obr. 19: Vliv umístění přídavného drátu [34]

Z makrosnímků výše je patrné, že nejlepší výsledky byly dosaženy při zvolené drážky typu V a drátu umístěného před laserem. Drážka typu V taktéž dosahovala nejlepšího promíšení přídavného a základní materiálu [34].

4.3 Výpočet vneseného tepla

Pro výpočet vneseného tepla u laserového svařování je nutné znát výkon laseru a rychlost svařování. Vnesené teplo se pak vypočte podle vzorce:

$$Q = \eta * \frac{P}{v}$$

- Q – Tepelný příkon (vnesené teplo) [kJ/mm]
- v – Rychlost svařování [mm/min]
- η – koeficient tepelné účinnosti [-]

$$\eta = \frac{Q_{\text{vnesená}}}{Q_{\text{celková}}}$$

- $Q_{\text{vnesená}}$ – Energie vnesená do svarového spoje
- $Q_{\text{celková}}$ – Celková energie laserového paprsku

Pro svařování laserovým paprskem je poměrně obtížné určit koeficient tepelné účinnosti, jelikož se odvíjí od mnoha faktorů, viz řešeršní část této práce. Pro výpočty v experimentální části této práce byla použita hodnota **0,5** dohledaná v literatuře [25].

5 Návrh experimentální části

Prvním cílem experimentální části této diplomové práce je porovnání svařitelnosti aditivně vyrobené oceli 316L metodou Direct Energy Deposition (DED) s konvenčně vyrobenou, za tepla válcovanou ocelí 316L.

Druhým cílem je porovnání vhodnosti metod svařování pro tyto oceli. Z klasických obloukových metod svařování byla zvolena metoda TIG. Další použitá metoda byla svařování laserovým paprskem. Třetí metodou je svařování laserovým paprskem s přídavným drátem, tzv. metoda „Cold wire“.

Cílem práce bude vyhodnocení svařitelnosti aditivně vyrobené oceli a zároveň porovnání metod mezi sebou.

Hodnocení svarů:

- Tahové zkoušky
- Ohybové zkoušky
- Průběhy tvrdosti
- Metalografické hodnocení
- NDT zkoušení – VT, PT, UT/RT

6 Experiment - část první: Svařování aditivně vyrobené a válcované oceli 316L

6.1 Značení vzorků a metod svařování

Pro každou metodu byla svařena sada tří vzorků o různých materiálových kombinacích s označením:

- **Válcovaný:** svar mezi dvěma válcovanými ocelmi, tedy **válcovaná - válcovaná**
- **DED:** svar mezi dvěma aditivními ocelmi, tedy **DED – DED**
- **Přechod:** svar mezi válcovanou a aditivní ocelí, tedy **válcovaná – DED**

Vybrané metody svařování byly oblouková metoda TIG, metoda svařování laserovým paprskem a svařování laserovým paprskem s použitím přídavného drátu bez předehřevu, tzv. „Cold wire“. Metody byly označeny s přihlédnutím k ČSN EN ISO 4063 [57].

- **141:** Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu; TIG svařování
- **521:** Svařování pevnolátkový laserem (bez přídavného drátu)
- **521 Cold wire:** Svařování pevnolátkovým laserem s přídavným drátem

6.2 Popis základního materiálu

- **Aditivně vyrobený materiál**

Za přípravu vzorků aditivně vyrobené oceli v rámci projektu CANUT-II by autor tímto rád poděkoval společnosti COMTES FHT a.s.

Zvoleným aditivně vyrobeným materiálem byla austenitická korozivzdorná ocel AISI 316L od firmy Sandvik, šarže 23D0604. Chemické složení prášku a základní desky, na níž tisk probíhal, viz tabulka níže [40].

Tab. 3: Chemické složení oceli 316L v hmotnostních % [40]

Součást	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	P	S
Prášek	Bal.	17,6	14,0	2,7	1,5	0,39	0,018	0,01	0,01
Deska	Bal.	17,78	14,43	2,77	1,53	0,38	0,017	-	-

Depozice probíhala na stroji InnTek MX-600. Tisk probíhal ve vertikální poloze. Parametry depozice jsou uvedeny níže. K tisku byla použita technologie Direct Energy Deposition (DED) [40].

Parametry depozice:

- Modul: SDM1600
- Průměr svazku laseru: 1600 μm
- Výška vrstvy: 600 μm
- Rychlost tisku: 850 mm/min
- Výkon laseru: DMT mód (900-1150 W)
- Množství prášku: 5,6/min
- Množství ochranného plynu: 23 l/min
- Strategie depozice: ZigZag CFC+CF

Po laserové depozici bylo na oceli provedeno rozpouštěcí žíhání ve vakuové peci. Režim tepelného zpracování byl následující: ohřev na 450 °C, výdrž 45 min; ohřev na 650 °C,

výdrž 35 min; ohřev na 850°C, výdrž 25 min; ohřev na 1090 °C, výdrž 60 min; ochlazení přetlakem dusíku 0,9 MPa na 30 °C [40].

Materiál byl ve všech případech svařen tak, že orientace svaru byla rovnoběžná s rovinou, ve které byla ocel deponována. Následný směr zatěžování při statické tahové zkoušce je tedy kolmý k rovině tisku i svaru, viz. článek [20] – horizontální zatěžování.

- **Tvářený materiál**

Zvoleným tvářeným materiálem pro experimentální část této práce byla za tepla válcovaná austenitická korozivzdorná ocel 316L; ekvivalent dle tříd ČSN 17 349.

Tabulka níže uvádí chemické složení použité oceli změřené ručním spektrometrem.

Tab. 4: Chemické složení oceli 316L v hmotnostních % změřené ručním spektrometrem

Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	V	Co	Cu
68,64	16,921	10,193	2,079	1,05	0,62	0,12	0,289	0,087

Jedná se o konstrukčně velmi často využívanou ocel vhodnou pro stavbu chemických zařízení, včetně tlakových nádob. Ocel je odolná vůči mezikrystalové korozi i v oblasti svarových spojů při dlouhodobém působení vysokých teplot, až do 350 °C [41].

Dle normy TNI CEN ISO/TR 15608 Svařování – Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin je ocel zařazena do materiálové skupiny 8.1 – Austenitické korozivzdorné oceli s $Cr \leq 19\%$ [42].

6.3 Svařování metodou 141 (TIG)

Dodané vzorky válcované oceli byly hranoly o rozměrech 230x20x6 mm; hranoly o rozměrech 130x20x6 mm pro DED ocel. Při předběžném posuzování a plánování experimentu bylo možné dojít k předpokladu, že velikost vzorků nebude pravděpodobně pro svařování metodou TIG vyhovující především kvůli množství vnášeného tepla a teplotním deformacím vzorků. Bylo též přihlédnuto k normě ČSN EN ISO 15614-1 *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin nikl*. Norma uvádí, že při svařování tupého spoje s plným průvarem je minimální šířka plechu 150 mm a minimální délka 350 mm [43].

Jako přídatný materiál byl zvolen drát ESAB OK TIGROD 316L Ø 2,0 mm. Jedná se o chrom-nikl-molybdenový svařovací neobalený drát vhodný pro svařování austenitických nerezových ocelí typu 18% Cr – 8% Ni a 18% Cr – 10% Ni – 3% Mo. Slitina má velmi nízký obsah uhlíku a je tím velmi vhodná pro předcházení vzniku mezikrystalové koroze. Tento svařovací drát je hojně využívaný v chemickém a potravinářském průmyslu, ale též např. při stavbě lodí a na různých typech fasádních konstrukcí. Tabulka níže uvádí typické složení drátu dle výrobce ESAB [44].

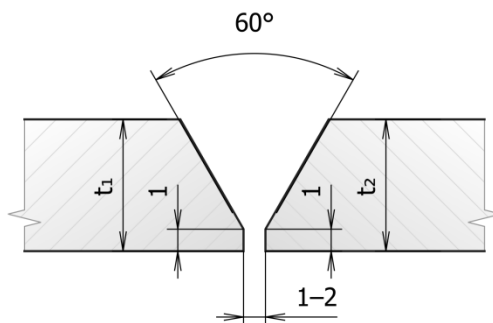
Tab. 5: Chemické složení přídatného drátu ESAB OK TIGROD 316L dle výrobce v hm. % [44]

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	N
0,01	1,7	0,4	12,0	18,2	2,6	0,04

Svařování probíhalo v poloze PA. Vzorky byly sestehovány s použitím přídatných plíšků na krajích vzorků a delších válcovaných plechů byly vytvořeny bodové svary uprostřed vzorku. Pro svařování kořenové vrstvy bylo nutné použít inertní formovací plyn. Byl použit argon, konkrétně Argon 4.6, což je Argon o čistotě 99,996%.

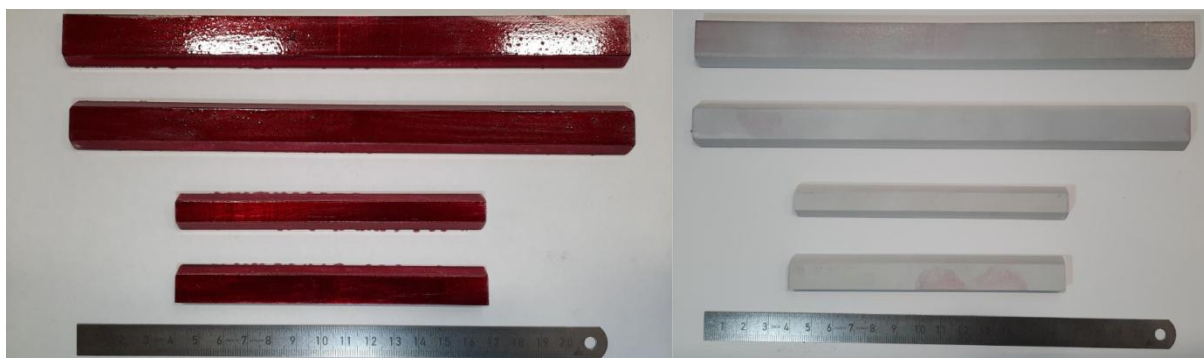
- **Příprava vzorků**

Na plechách tloušťky 6 mm byly zhotoveny úkosy na CNC obráběcím stroji, protože vzhledem k dodaným rozměrům nebylo možné materiál upnout do běžné průmyslové úkosovačky. Byl zvolen úkos typu V s úhlem rozevření 60° a otupením, viz obrázek níže.



Obr. 20: Příprava vzorků pro svařování metodou TIG

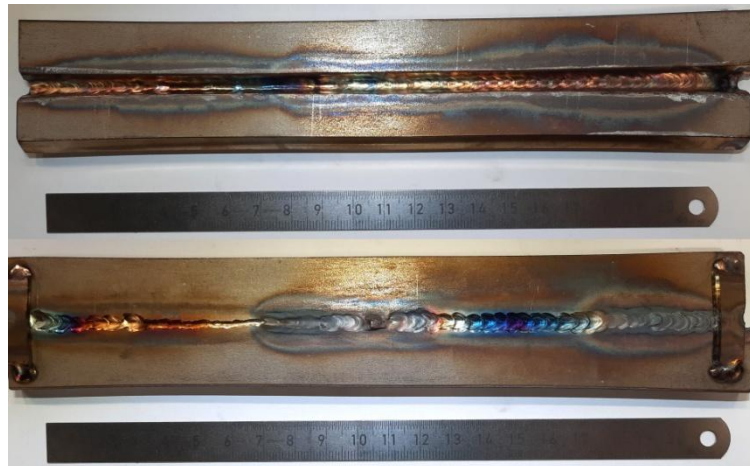
Frézované úkosy byly následně podrobeny kapilární zkoušce, aby bylo ověřeno, že povrch materiálu po obrobení nevykazuje žádné vady, které by mohly ovlivnit proces svařování. Fotografie průběhu a vyhovujícího výsledku penetrační zkoušky je na obrázku níže.



Obr. 21: Průběh a vyhodnocení kapilární zkoušky úkosů; delší plechy – válcovaná ocel, kratší plechy – DED ocel

- **Průběh svařování: Válcovaná ocel**

Po svaření kořenové vrstvy byla patrná značná deformace svařence, kdy došlo k výraznému prohnutí ve střední části plechu směrem k ose svaru, viz fotografie níže. Tato deformace je způsobena malými rozměry vzorku. Kvůli tomuto stažení plechů k sobě nebylo možné správné provaření kořene, což je nejvíce patrné právě ve střední části vzorku, kde bylo stažení největší a tudíž se nejvíce zmenšila mezera mezi plechy.



Obr. 22: Kořenová vrstva válcované oceli, nahoře pohled z lící strany, dole pohled na kořenovou stranu

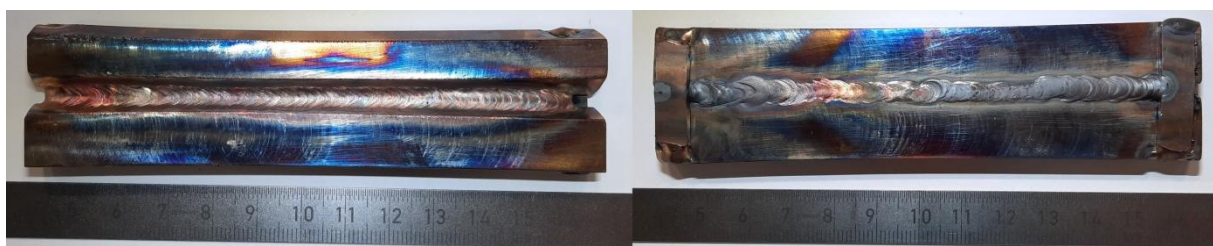
Maximální mezihouseňková (interpass) teplota byla stanovena na 150 °C, ovšem vzhledem k malým rozměrům plechů se raději pokračovalo ve svařování až poté, co teplota vzorku klesla pod 50 °C. Po kořenové vrstvě byly zavařeny dvě výplňové a jedna krycí vrstva. Výsledný svařenec z válcované oceli je na fotografii níže. Celý proces je detailně zaznamenán ve welding recordu (záznamu svařování) viz přílohy. Z fotografie je při porovnání s přiloženým pravítkem patrné značné prohnutí plechu.



Obr. 23: Svarový spoj – válcovaná ocel 316L; metoda 141

- **Průběh svařování: ocel vyrobená metodou DED**

Po svaření kořenové vrstvy na první pohled opět došlo k výrazné deformaci, jako tomu bylo u válcovaných plechů. Vizuálním zhodnocením kořene se došlo k závěru, že je kořen vyhovující, viz fotografie níže.



Obr. 24: Kořenová vrstva DED oceli; vlevo pohled z lící strany, vpravo pohled z kořenové strany

Stejně jako v předchozím případě se ve svařování pokračovalo až při zchladnutí vzorku na teplotu pod 50 °C. Po svaření druhé vrstvy se provedla letmá kontrola vzorku ze všech stran a bylo překvapivě zjištěno, že došlo k protečení materiálu na stranu kořene. Při druhé vrstvě již nebyl použit plyn pro formování kořene, jelikož se takovéto protečení nepředpokládalo. Protečený materiál na straně kořene byl tedy bez ochranné atmosféry, a tak došlo k přetvoření kořene na nevhovující, viz fotografie níže.



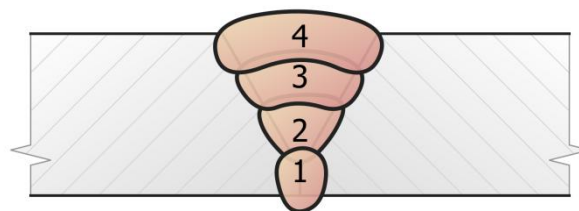
Obr. 25: Nevyhovující kořen svaru DED oceli

I přes očividně nevyhovující zoxidovaný kořen svaru se pokračovalo ve svařování a vzorek byl svařen dalšími dvěma housenkami, tedy stejným počtem jako v případě válcovaného materiálu. Po dokončení krycí vrstvy bylo patrné značné přehřátí vzorku; očividně totiž asi polovina materiálu vyzařovala červenou barvu v důsledku vysoké teploty. Dotykovým teploměrem byla naměřena teplota 732 °C v oblasti konce svaru přibližně 10 vteřin po ukončení svařování. Fotografie níže zobrazuje dokončený svarový spoj.



Obr. 26: Svarový spoj DED oceli

Poněvadž došlo u obou vzorků k výrazným deformacím, nebylo možné vytvořit spoj typu válcovaná – aditivně vyrobená ocel, proto se tyto vzorky dále nesvařovaly k sobě. Schéma níže zobrazuje provedení svarových spojů válcované i DED oceli; obě byly svařeny na 4 housenky, viz schéma níže.



Obr. 27: Schéma svaru metody 141 (TIG)

Jelikož bylo patrné tepelné ovlivnění a nebylo možné vytvořit přechodový svar, nebyly tyto dva svary dále uvažovány a hodnoceny, pouze na nich bylo provedeno NDT zkoušení a makro snímek.

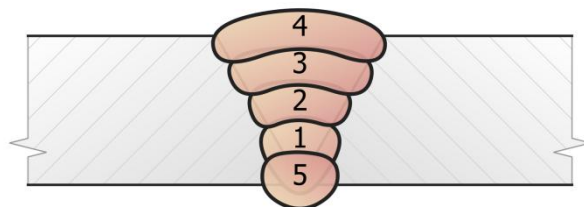
6.4 Svařování metodou 141 (TIG) – opakování experimentu

Vzhledem k nedokonalostem při předchozím výše popsaném svařování (především malá velikost vzorků a tudíž i přílišné tepelné ovlivnění a nemožnost vytvořit přechodový spoj) byly vyrobeny nové a větší zkušební plechy.

Dodané plechy oceli 316L vyrobené aditivní metodou DED měli v tomto případě rozměry 155x75x6 mm a válcované plechy 230x150x6 mm. Stejně jako v předchozím případě byl pro svar typu V použit úkos 5x60° s otupením kořene 1 mm. Frézované plochy byly též podobeny kapilární zkoušce pro vyloučení vad v úkosu. Byl použit stejný svařovací drát a ochranný plyn jako v prvním případě. Stejně byly i mezihousenkové teploty, kdy se ve svařování pokračovalo až při klesnutí teploty svařence pod 50 °C.

- **Průběh svařování: válcovaná ocel**

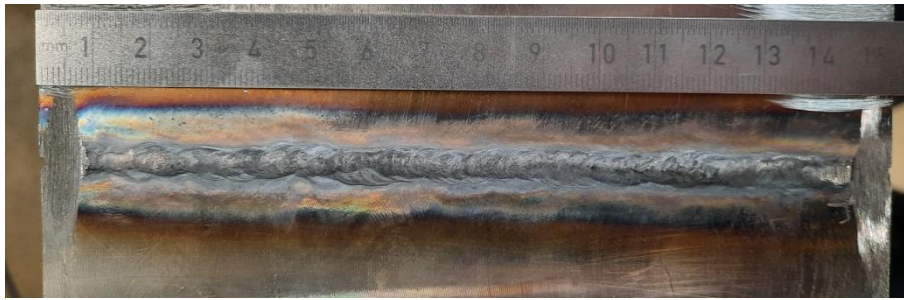
Očištěné a odmaštěné plechy byly sestehovány a z kořenové strany vyztuženy pomocnými plechy z austenitické oceli pro zabránění deformacím (pomocné plechy byly po svaření odřezány). Byly dodrženy stejné postupy jako ve výše popsaném případě při prvním svařování menších vzorků. Plnoprůvarový svar typu byl svařen na 4 housenky. Při kontrole první vrstvy bylo zjištěno zoxidování kořene, zřejmě chybou nedostatečného přívodu formovacího inertního plynu. Proto byla použita kořenová protivrstva, kdy byl původní kořen přebroušen a následně byla bruskou vytvořena drážka tvaru U o hloubce 2 mm a šířce v nejširším místě cca 5 mm. Následně byla vytvořena tato kořenová protivrstva; počet housenek použitých na tento svar byl tedy 5, viz schéma níže. Kompletní záznam svařování viz přílohy.



Obr. 28: Schéma svaru opakované metody 141

- **Průběh svařování: DED ocel**

Připravené plechy byly stejně jako v případě válcované oceli vyztuženy pomocnými plechy ze strany kořene pro zamezení stažení plechu. Kořen se vizuálně zkontroloval po první vrstvě a byl vyhovující. Z předchozích zkušeností s protékáním materiálu byl formovací plyn použit i u druhé vrstvy a znovu došlo k přetvoření kořene a jeho protečení; v tomto případě však díky použití inertního plynu již byl zoxidování. Pro jistotu byl formovací plyn aplikován i při třetí vrstvě; zde došlo k protečení a přetvoření již jen lokálně v malé míře a u poslední (krycí) vrstvy již k protečení nedocházelo. Snímek vyhovujícího kořene je na obrázku níže.



Obr. 29: Vyhovující kořen svaru DED oceli při opakování metody 141

Přestože byl kořen vyhovující, bylo rozhodnuto o vybroušení kořene a vytvoření stejné protivrstvy jako u válcované oceli z důvodu lepší porovnatelnosti výsledků.

- **Průběh svařování: Válcovaná – DED ocel (přechod)**

Svařené DED a válcované plechy byly sestaveny a stejně jako v předchozích případech sestaveny pomocnými plechy. K protékání kořene u přechodového spoje při druhé vrstvě nedocházelo, a tak byl svar dokončen na čtyři housenky, a stejně jako v předchozích dvou případech byla svařena kořená protivrstva pro lepší porovnání výsledků. Obrázky níže zobrazují hotový svařenec.



Obr. 30: Svařenec opakované metody 141, vlevo líc, vpravo kořen; kratší plechy DED, delší válcovaná ocel

6.5 Svařování laserem bez přídavného drátu (metoda 521)

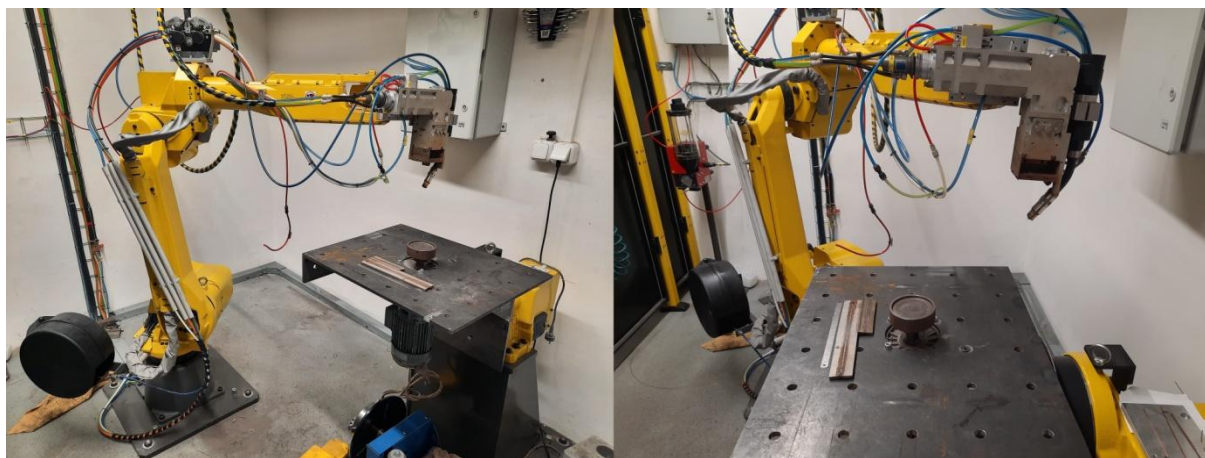
- **Popis pracoviště**

Svařování probíhalo v prostorách ZČU v místnosti laserového pracoviště. Ke svařování byl použit pevnolátkový diskový laser značky TRUMPF s označením TruDisk 4006. Specifikace parametrů viz níže.

Parametry diskového laseru:

- Max. výkon laseru: 4000 W
- Typická stálost výkonu: $\pm 0,5\%$
- Nastavitelný výkon: 80 W – 4000 W
- Kvalita svazku (hodnota BPP): 25 mm*mrad
- Numerická apertura: 0,1
- Vlnová délka: 1030 nm
- Minimální průměr laserového vlákna: 0,6 mm [45]

Samotné pracoviště je pak vybaveno šestiosým manipulátorem značky FANUC, na kterém je upevněna laserová svařovací hlava s hubicí pro přívod drátu, která slouží zároveň k přivádění ochranného plynu. K upnutí slouží pracovní stůl, který je polohovatelný ve dvou osách. Fotografie pracoviště s detailem viz níže.



Obr. 31: Konfigurace pracoviště pro laserové svařování

• Popis vzorků

Dodané vzorky válcované oceli byly hranoly o rozměrech 190x20x6 mm; hranoly o rozměrech 115x15x6 mm pro DED ocel. Při návrhu experimentu bylo podobně jako u obloukové metody přihlédnuto k příslušné normě pro kvalifikaci postupů svařování ČSN EN ISO 15614-11: Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 11: Elektronové a laserové svařování. Norma uvádí, že zkušební těleso musí mít dostatečnou minimální velikost, aby byl zajištěn adekvátní odvod tepla, a dále stanovuje, že pro lineární tupý svar musí být minimální rozměry zkušebního plechu 150x300 mm [46].

Tyto rozměry nebyly bohužel vzhledem k nedostatku materiálu dodrženy, ovšem při uvážení řádově vyšší výkonové hustoty a značně odlišného vneseného tepla se pro svařování laserem nejvíce malé rozměry vzorků jako tak výrazný problém při porovnání s metodou TIG.

• Příprava vzorků

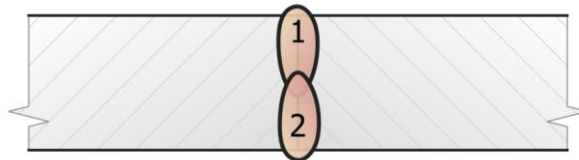
Pro svařování plechů laserem bez přídavného drátu byl zvolen tupý lineární svar. Plochy se tedy nijak neupravovaly, pouze se před svařováním odmastily.



Obr. 32: Příprava plechů pro laserové svařování bez přídavného drátu

- **Průběh svařování: Válcovaná ocel**

Odmaštěné plechy byly položeny na pracovní stůl, slícovány k sobě pro dosažení nulové mezery a upnuty pomocí stolních svěrek. Jelikož by i při použití maximálního výkonu laseru 4 kW pravděpodobně nedošlo k úplnému provaření plechu tloušťky 6 mm, byl zvolen postup svaření nejprve z jedné strany, a poté z druhé strany, viz obrázek níže. Rychlost svařování byla na základě zkušeností zvolena 70 cm/min a byl použit maximální výkon, tedy 4000 W. Ve všech případech bylo ohnisko fokusováno na povrch plechu. Kompletní záznam svařování viz přílohy.



Obr. 33: Schéma svaru metodou 521

- **Průběh svařování: DED ocel**

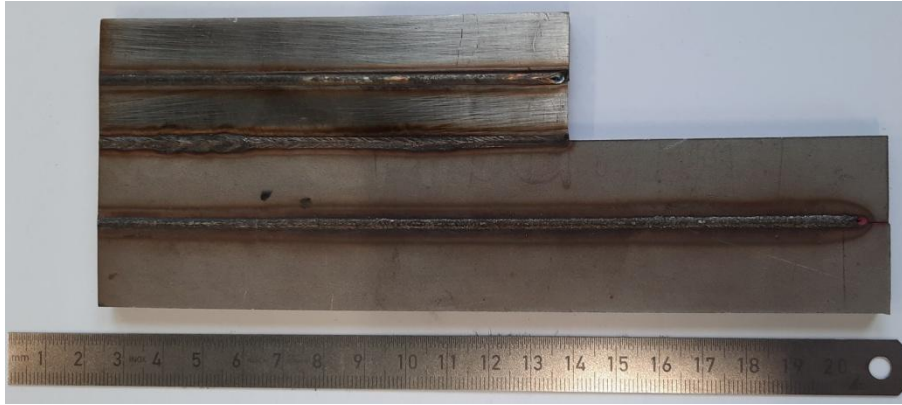
Stejně jako v předchozím případě byly svařované plechy položeny na pracovní stůl, slícovány a upnuty stolními svěrkami. Parametry procesu byly zvoleny stejné jako v případě válcované oceli, tedy rychlost svařování 70 cm/min a výkon 4000 W. Byl opět zvolen postup svaření na dvě vrstvy s jednou vrstvou z každé strany. Po vytvoření svaru z první strany (strana A) byl vzorek otočen a svařen z druhé strany (strana B).

- **Průběh svařování: Válcovaná – DED ocel (přechod)**

Po svaření nejprve válcovaného a poté aditivně vyrobeného plechu se tyto svařence očistily a odmastily, načež se slícovaly k sobě a upnuly svěrkami. Byl zvolen stejný postup jako v předchozích dvou případech, tedy svaření na dvě vrstvy z obou stran při rychlosti 70 cm/min a výkonu 4000 W.

Pro všechny tři případy bylo ohnisko laserového paprsku umístěno na povrch vzorků. Maximální mezihousenková teplota nesměla převýšit 150 °C, po zavaření první vrstvy a po otočení každého z kusů se teplota zkontrolovala dotykovým teploměrem a v žádném ze tří případů nepřevyšovala 50 °C.

Fotografie svařených vzorků je na obrázku níže; kratší plechy jsou aditivně vyrobené a delší válcované. Všechny 3 svary byly provedeny se stejnými parametry.



Obr. 34: Strana A vzorků svařených natupo metodou 521



Obr. 35: Strana B vzorků svařených natupo metodou 521

6.6 Svařování metodou 521 Cold wire

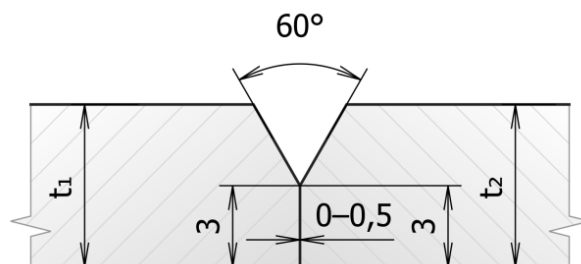
Pro svařování laserovým paprskem s přídavným drátem byl zvolen přídavný drát OK Autrod 316L Ø 1,0 mm. Chemickým složením je tento drát totožný se svařovacím drátem OK Tigrod 316L popsaným v kapitole předchozí kapitole.

- **Popis vzorků**

Zkušební plechy válcované oceli byly v tomto případě hranoly o rozměrech 255x20x6 mm a 130x15x6 mm u aditivně vyrobené oceli 316L. I v tomto případě se s přihlédnutím k ČSN EN ISO 15614-11 došlo k názoru, že rozměry zkušebních těles nejsou ideální z důvodu odvodu tepla.

- **Příprava vzorků**

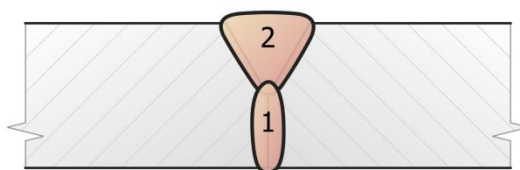
Pro svařování metodou Cold wire bylo nutné připravit požadované úkosy. Byl zvolen úkos o velikosti 3x30°. Cílem bylo vytvořit plnopřvarový spoj tvaru Y, kdy se kořen zavaří bez přídavného drátu a úkos se vyplní na jednu vrstvu.



Obr. 36: Příprava vzorků pro svařování metodou 521 Cold wire

- **Průběh svařování – Válcovaná ocel**

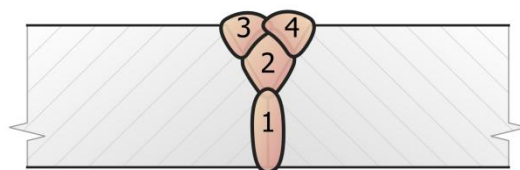
Očištěné a odmaštěné plechy byly sestehovány laserem přibližně 1 mm od kraje s délkou stehu 3 mm. Stehy byly provedeny ze strany kořene, aby neovlivňovaly úkos. Nejprve byl svařen kořen výkonem 4000 W a rychlostí 600 mm/min; ohnisko paprsku se nastavilo na vrchol úkosu, tedy 3 mm pod povrchem plechu. Poté byla svařena výplňová vrstva s přidavným drátem. Byl použit nižší výkon – 3600 W a též menší rychlost svařování – 500 mm/min; rychlost podávání drátu byla 6 m/min. Nižší rychlost i výkon byly použity proto, aby došlo ke správnému natavení hran úkosu i přidavného drátu. Obrázek níže zobrazuje schematicky popsany svarový spoj. Kompletní záznam svařování viz přílohy.



Obr. 37: Schéma svaru 521 Cold wire pro válcovanou ocel

- **Průběh svařování – DED ocel**

Očištěná a odmaštěná aditivně vyrobená ocel byla sestehována stejně jako v případě válcované oceli, viz výše. Pro svaření kořene byl opět jako v případě válcované oceli použit výkon 4000 W a rychlost svařování 600 mm/min. Pro svaření výplňové vrstvy se použily stejné parametry jako pro válcovanou ocel, tedy 3600 W, rychlost 500 mm/min a rychlost podávání drátu 6 m/min. Při následném vizuálním prozkoumání svařence bylo zřejmé, že se nepodařilo zcela vyplnit úkos a po obou stranách úkosu zůstala mezi housenkou a základním materiálem mezera. Z toho důvodu byly přidány další dvě výplňové vrstvy, pro které bylo nutné snížit výkon (3200 W) i rychlost podávání drátu (5 m/min) a zvýšit rychlost svařování (1000 a 1500 mm/min). Schéma svarového spoj je na obrázku níže. Kompletní záznam svařování viz přílohy.



Obr. 38: Schéma svaru 521 Cold wire pro DED ocel

- **Průběh svařování: Válcovaná – DED ocel (přechod)**

Svařené vzorky válcované a DED oceli byly očištěny, odmaštěny a sestehovány stejně jako v předchozích případech. Pro svařování byly použity totožné parametry jako pro svařování válcované oceli, viz výše a přílohy. Fotografie výsledného svařence je na obrázku níže.



Obr. 39: Svařec; metoda 521 Cold wire; líc svaru



Obr. 40: Svařec; metoda 521 Cold wire; kořen svaru

Ve všech případech byl přídatný drát umístěn před laserový paprsek a směr svařování byl takový, že byl drát tlačěn před svarovou lázní, kdy se dosahuje lepších výsledků průvaru. Tato zkušenost vychází z experimentu diplomové práce [47].

Maximální mezihousenková teplota byla opět 150 °C. Před každou provedenou svarovou housenkou byla teplota kontrolována dotykovým teploměrem a v žádném ze tří případů nepřevyšovala 50 °C.

7 Experiment – část druhá: Hodnocení svarových spojů

7.1 NDT – vizuální zkouška

Všechny výše popsané svařence byly po očištění podrobeny nejprve vizuální kontrole. Metodika zkoušky byla provedena dle normy ČSN EN ISO 17637. Hodnocení laserem svařených vzorků se provedlo dle normy ČSN EN ISO 13919-1, a pro obloukovou metodu TIG dle normy ČSN EN ISO 5817. Kvalifikace vad byla dle ČSN EN ISO 6520-1 [48, 49, 50, 58].

Všechny výsledky vizuální zkoušky se zjištěnými defekty jsou uvedeny v tabulkách níže.

Tab. 6: Výsledky vizuální zkoušky; metoda 141

Označení svaru	Metoda svařování	Délka svaru	Zjištění
Válcovaný	141	230	<u>Líc</u>
			Bez defektů - OK
			<u>Kořen</u>
			0 - 230 mm defekt č. 515 - Hubený kořen
DED	141	130	<u>Líc</u>
			Bez defektů - OK
			<u>Kořen</u>
			0 - 130 mm defekt č. 504 - Nadměrný průvar

Tab. 7: Výsledky vizuální zkoušky; metoda 141 - opakování

Označení svaru	Metoda svařování	Délka svaru	Zjištění
Válcovaný	141	230	<u>Líc</u>
			Bez defektů - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez defektů - OK
DED	141	155	<u>Líc</u>
			Bez defektů - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez defektů - OK
Přechod	141	155	<u>Líc</u>
			Bez defektů - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez defektů - OK

Tab. 8: Výsledky vizuální zkoušky; metoda 521

Označení svaru	Metoda svařování	Délka svaru	Zjištění
Válcovaný	521	185	<u>Strana A</u>
			Bez defektů - OK
			<u>Strana B</u>
			Bez defektů - OK
DED	521	115	<u>Strana A</u>
			Bez defektů - OK
			<u>Strana B</u>
			Bez defektů - OK
Přechod	521	115	<u>Strana A</u>
			Bez defektů - OK
			<u>Strana B</u>
			Bez defektů - OK

Tab. 9: Výsledky vizuální zkouška; metoda 521 Cold wire

Označení svaru	Metoda svařování	Délka svaru	Zjištění
Válcovaný	521 Cold wire	140	<u>Líc</u>
			0 - 140 mm defekt č. 502 - Nadměrné převýšení
			<u>Kořen</u>
			0 - 100 mm defekt č. 602 - Rozstřík
DED	521 Cold wire	125	<u>Líc</u>
			5 - 10 mm defekt č. 510 - Díra
			<u>Kořen</u>
			5 - 10 mm defekt č. 510 - Díra
Přechod	521 Cold wire	125	<u>Líc</u>
			Bez defektů - OK
			<u>Kořen</u>
			0 - 125 mm defekt č. 402 - Neprůvar

Poznámka: U válcovaného spoje metoda 521 Cold wire bylo hodnoceno jenom 140 mm svaru

7.2 NDT – kapilární zkouška

Po vizuální zkoušce byla na každém svaru provedena kapilární zkouška dle metodiky ČSN EN ISO 3452-1 s vyhodnocením dle ČSN EN ISO 23277. Pro povrchové zkoušení svarů se ještě nabízí zkouška magnetická prášková metoda, ovšem vzhledem k tomu, že svařovaný materiál je austenitický a tudíž paramagnetický, nebyla by tato zkouška proveditelná, a proto musela být použita kapilární zkouška [51, 52].

Tab. 10: Výsledky kapilární zkoušky; metoda 141

Označení svaru	Metoda svařování	Délka svaru	Zjištění
Válcovaný	141	230	<u>Líc</u>
			Bez indikací - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez indikací - OK
DED	141	130	<u>Líc</u>
			Bez indikací - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez indikací - OK

Tab. 11: Výsledky kapilární zkoušky; metoda 141 - opakování

Označení svaru	Metoda svařování	Délka svaru	Zjištění
Válcovaný	141	230	<u>Líc</u>
			Bez indikací - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez indikací - OK
DED	141	155	<u>Líc</u>
			Bez indikací - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez indikací - OK
Přechod	141	155	<u>Líc</u>
			Bez indikací - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez indikací - OK

Tab. 12: Výsledky kapilární zkoušky; metoda 521

Označení svaru	Metoda svařování	Délka svaru	Zjištění
Válcovaný	521	185	<u>Líc</u>
			Bez indikací - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez indikací - OK
DED	521	115	<u>Líc</u>
			Bez indikací - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez indikací - OK
Přechod	521	115	<u>Líc</u>
			Bez indikací - OK
			<u>Kořen</u>
			Bez indikací - OK

Tab. 13: Výsledky kapilární zkoušky; metoda 521 Cold wire

Označení svaru	Metoda svařování	Délka svaru	Zjištění
Válcovaný	521 Cold wire	140	<u>Líc</u>
			30 - 70 mm Nelineární indikace
			<u>Kořen</u>
DED	521 Cold wire	125	Bez indikací - OK
			<u>Líc</u>
			5 - 10 mm Nelineární indikace
Přechod	521 Cold wire	125	<u>Kořen</u>
			5 - 10 mm Nelineární indikace
			<u>Líc</u>
Přechod	521 Cold wire	125	0 - 60 mm Lineární indikace
			<u>Kořen</u>
			0 - 125 mm Lineární indikace

7.3 NDT – Radiografická zkouška

Pro objemové zkoušení svarů byla použita rentgenová zkouška. Provedení bylo dle normy ČSN EN ISO 17636-1, třída B. Pro zkoušku byl použit rentgenový generátor Baltospot LLX200-DA s velikostí ohniska 1x1 mm; použité napětí 140kV a proud 4,1 mA. Pracovní vzdálenost zdroj – film byla 500 mm; expoziční čas 50 sekund. Expoziční uspořádání bylo podle obr.1 – prozařování rovinných objektů přes jednu stěnu dle normy ČSN EN ISO 17636-1. Následující fotografie jsou rentgenové snímky zhotovených svarových spojů [53].

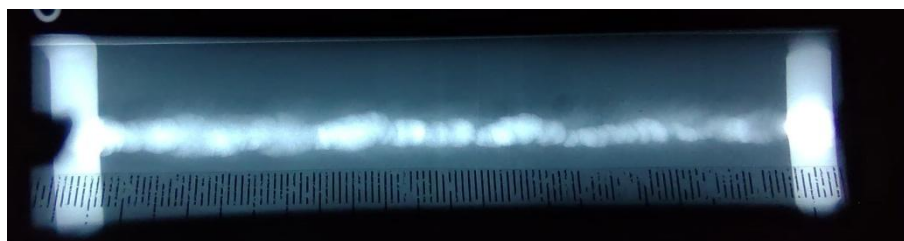
- **Metoda 141:**

Na snímku je v pravé části svařence studený spoj (nenatavená hrana) o délce přibližně 3 mm, viz detaily níže; kromě toho se na snímku nenacházejí jiné imperfekce.



Obr. 41: Svar válcované oceli, metoda 141

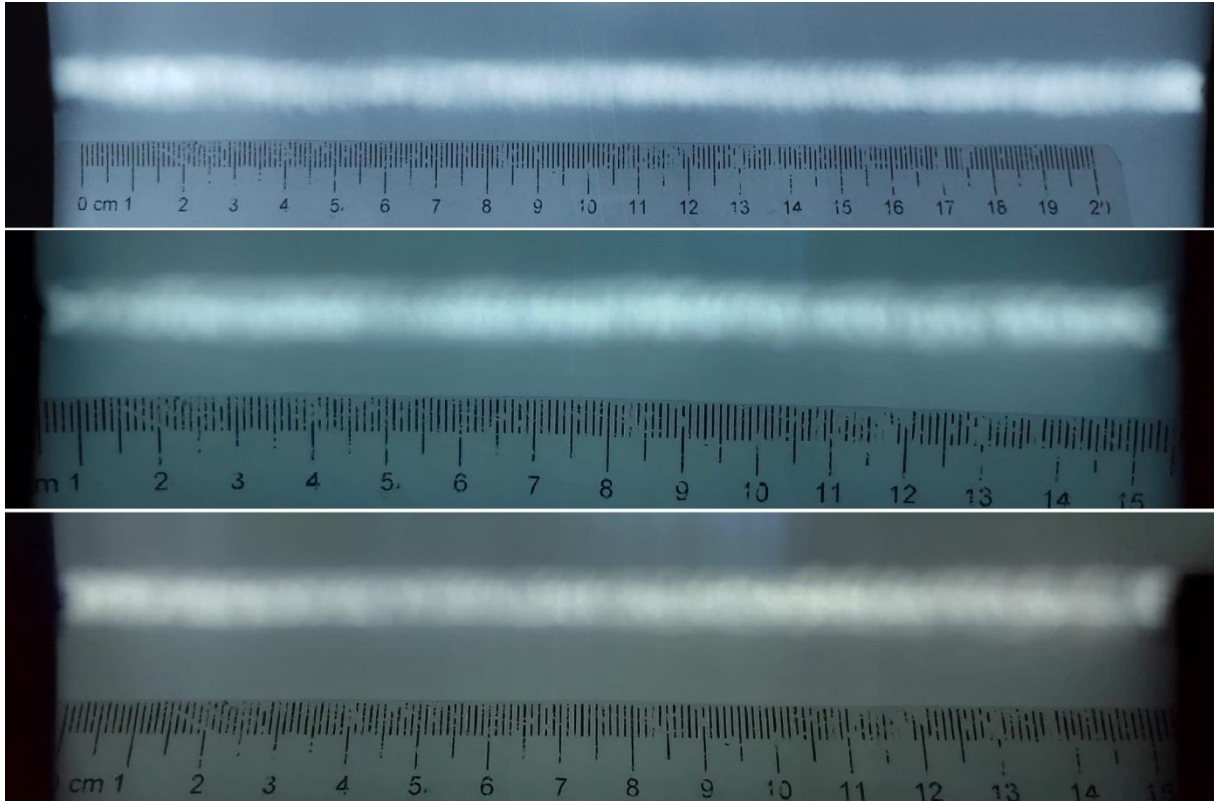
Na RTG snímku svarového spoje DED oceli níže se nenacházely žádné imperfekce.



Obr. 42: Svar DED oceli; metoda 141

- **Metoda 141 – opakování svařování:**

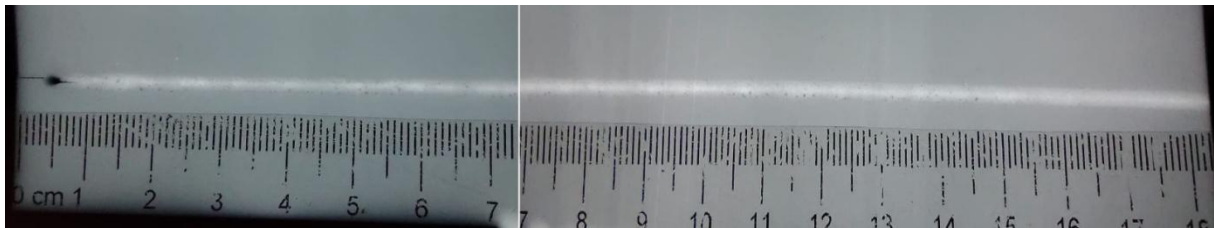
Všechny tři svary opakované metody TIG byly vyhodnoceny jako vyhovující; na žádném ze svarů nebyla nalezena žádná imperfekce, viz obrázek níže. Horní snímek je válcovaný spoj, uprostřed DED a spodní RTG snímek je přechodový spoj.



Obr. 43: Shora válcovaný, DED a přechodový spoj

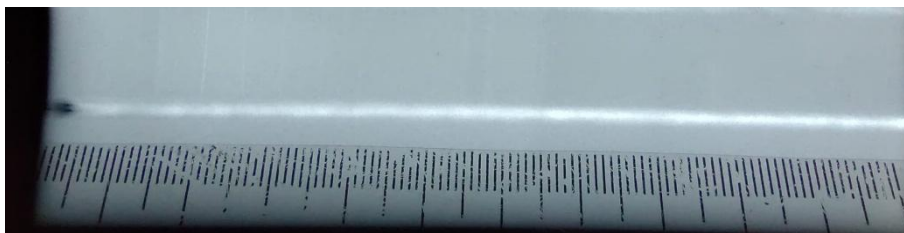
- **Metoda 521:**

Svarový spoj válcované oceli vytvořený laserem bez přídavného drátu obsahoval velké množství pórů, které se vyskytovaly po celé délce svaru a jsou dobře patrné z obrázku níže.



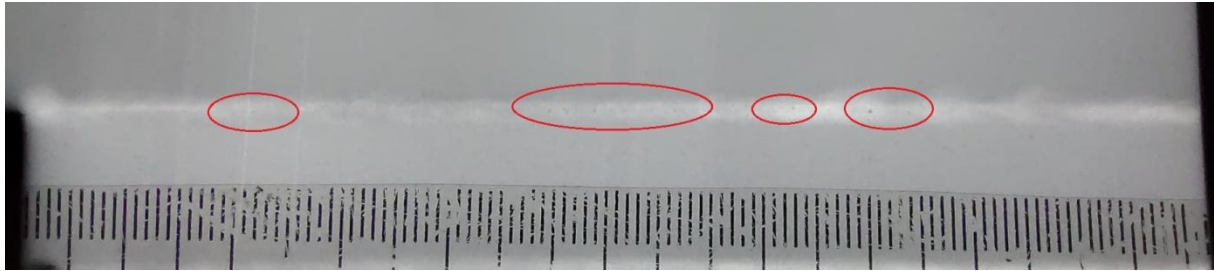
Obr. 44: Svar válcované oceli; metoda 521

Snímek DED oceli na obrázku níže je zcela bez imperfekcí.



Obr. 45: Svar DED oceli; metoda 521

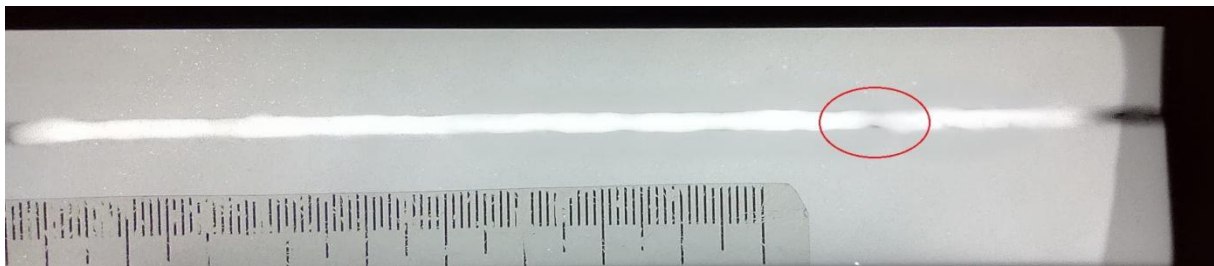
Přechodový svarový spoj mezi válcovanou a DED ocelí obsahoval póry, které se nacházely především ve střední části vzorku. Množství pórů je o poznání menší, než u válcovaného vzorku, viz výše.



Obr. 46: Přechodový spoj; zvýrazněné póry; metoda 521

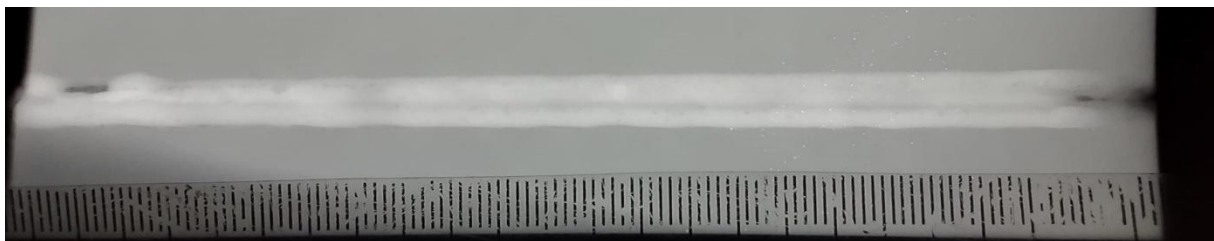
- **Metoda Cold wire:**

Na snímku je v pravé části zvýrazněný studený spoj o délce přibližně 2 mm; kromě toho se na snímku nenacházejí žádné imperfekce.



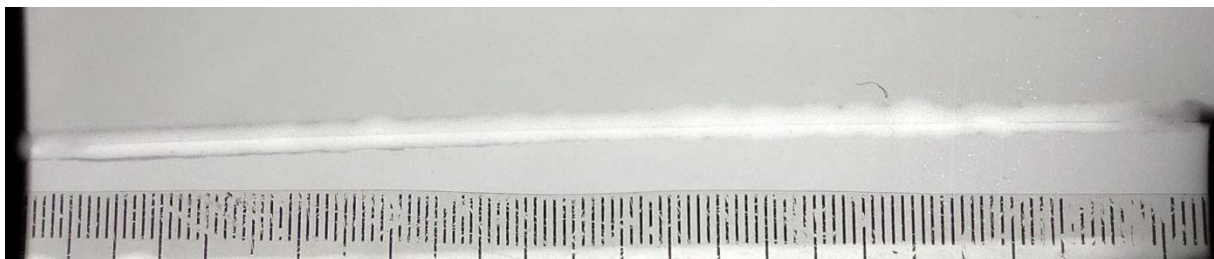
Obr. 47: Svar válcované oceli; metoda 521 Cold wire

Na snímku svarového spoje DED oceli je v levé části zřejmá díra o délce přibližně 5 mm, která byla patrná již při vizuální zkoušce. V pravé přibližně 7 mm od konce se nachází pravděpodobně studený spoj mezi housenkami.



Obr. 48: Svar DED oceli; metoda 521 Cold wire

Na snímku přechodového spoje DED – válcovaná ocel je zřejmá ostrá rovná indikace uprostřed svaru. S největší pravděpodobností je jedná o neprovařený kořen, který byl pozorován již při vizuální zkoušce.



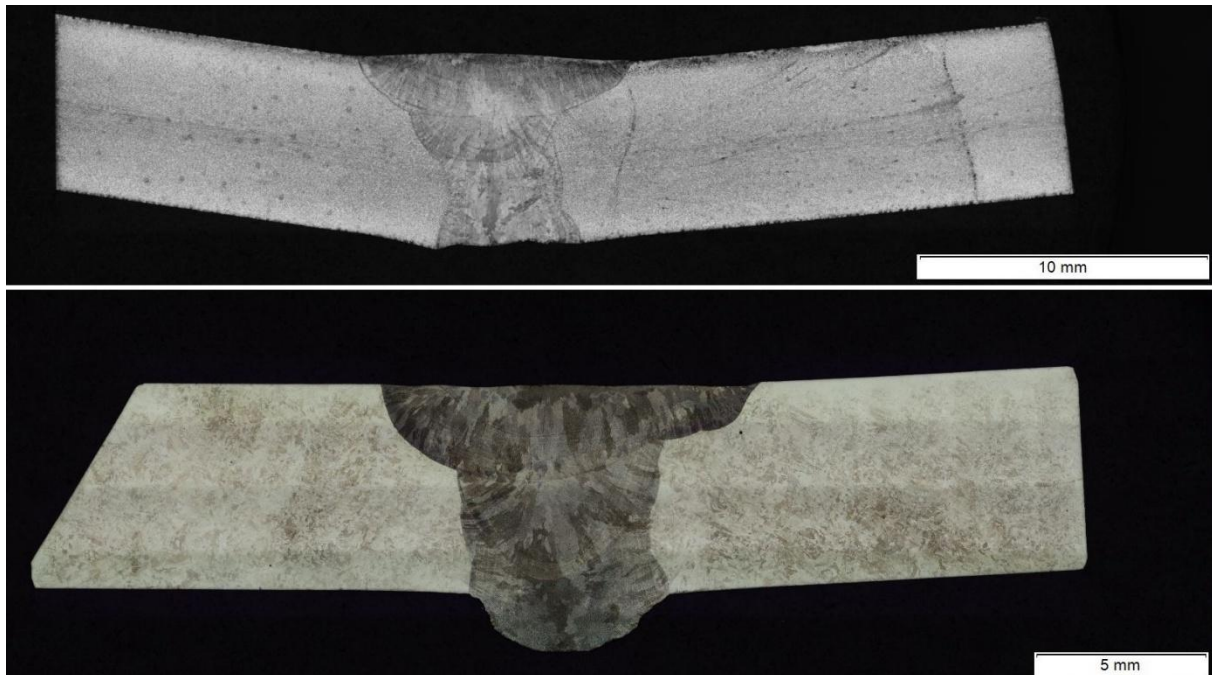
Obr. 49: Přechodový spoj; metoda 521 Cold wire

7.4 Makroskopická zkouška svarů

Všechny svařené vzorky byly nařezány, vybroušeny a vyleštěn na metalografické brusce a naleptány směsí kyseliny dusičné a kyseliny chlorovodíkové.

- **Metoda 141:**

Na snímku makrostrukturu válcované oceli svařené metodou TIG níže není viditelná žádná imperfekce. Na snímku DED oceli je viditelné nadměrné převýšení kořene způsobené protečením druhé vrstvy, avšak mimo to se ve svaru nenacházejí žádné imperfekce. Svary neobsahují póry, ani studené spoje mezi housenkami, či základním materiálem a svarovým kovem.



Obr. 50: Svar metody 141; nahoře válcovaný, dole DED; zvětšeno 50x

- **Metoda 141 – opakované svařování:**

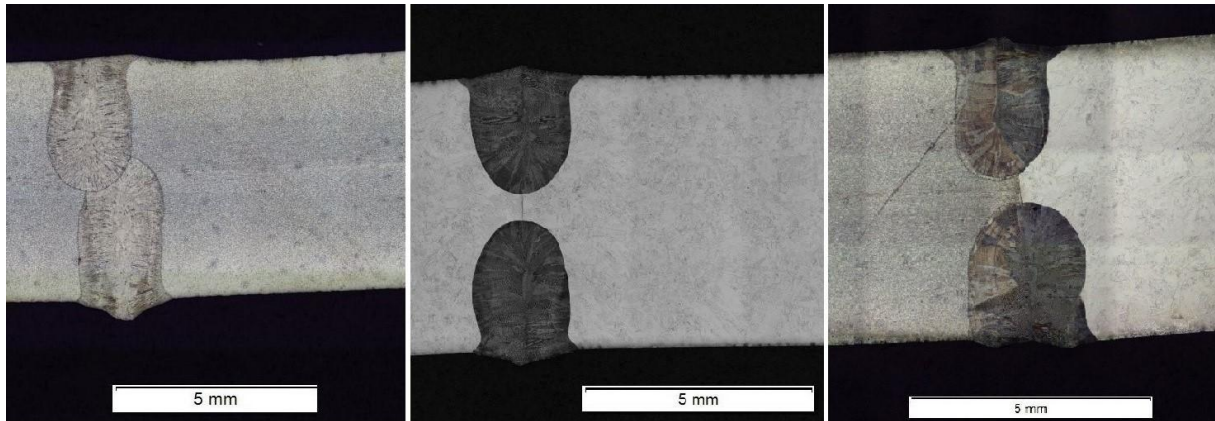
Na makro snímcích svarů opakované metody 141 jsou patrné rozdíly v mikrostruktuře mezi aditivní a válcovanou ocelí. Na snímcích není viditelná žádná vada; je zde dobře znatelné použité kořenové protivrstvy, tedy výrazně široká housenka ze strany kořene.



Obr. 51: Metoda 141; nahoře válcovaný, uprostřed DED, dole přechodový spoj; zvětšeno 50x

- **Metoda 521:**

Na snímcích svarových spojů zhotovených laserovým paprskem je u dvou ze tří vzorků (DED a přechod) patrné nenatavení základního materiálu mezi housenkami uprostřed svaru. V obou případech je velikost vady přibližně 0,5 mm. Spoj válcované oceli je zcela bez vad. Na první pohled je zde patrné odlišné chování aditivního a tvářeného materiálu při svařování laserem. Při stejných parametrech procesu svařování došlo k natavení válcovaného spoje v celém průřezu, zatímco u DED a přechodového svaru se vyskytovalo takto významné nenatavení.



Obr. 52: Metoda 521; vlevo válcovaná, uprostřed DED, vpravo přechodový spoj; zvětšeno 50x

- **Metoda Cold wire:**

U svarových spojů vytvořených metodou Cold wire jsou Svary válcované a DED oceli bez imperfekcí. Natavení materiálu mezi kořenem a výplňovou vrstvou je v pořádku. Přechodový spoj má ovšem značně nevyhovující kořen, kdy přibližně 1,3 mm od spodní hrany plechu je zcela nenatavený materiál.

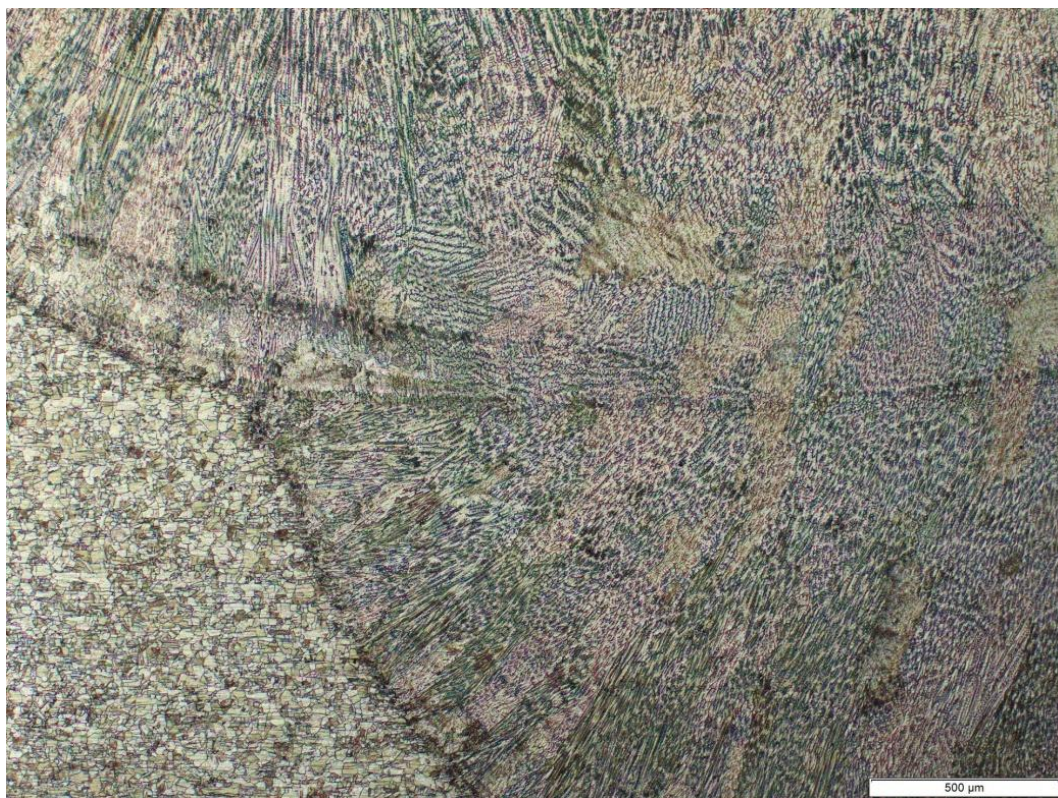


Obr. 53: Metoda 521 Cold wire; vlevo válcovaná, uprostřed DED, vpravo přechodový spoj; zvětšeno 50x

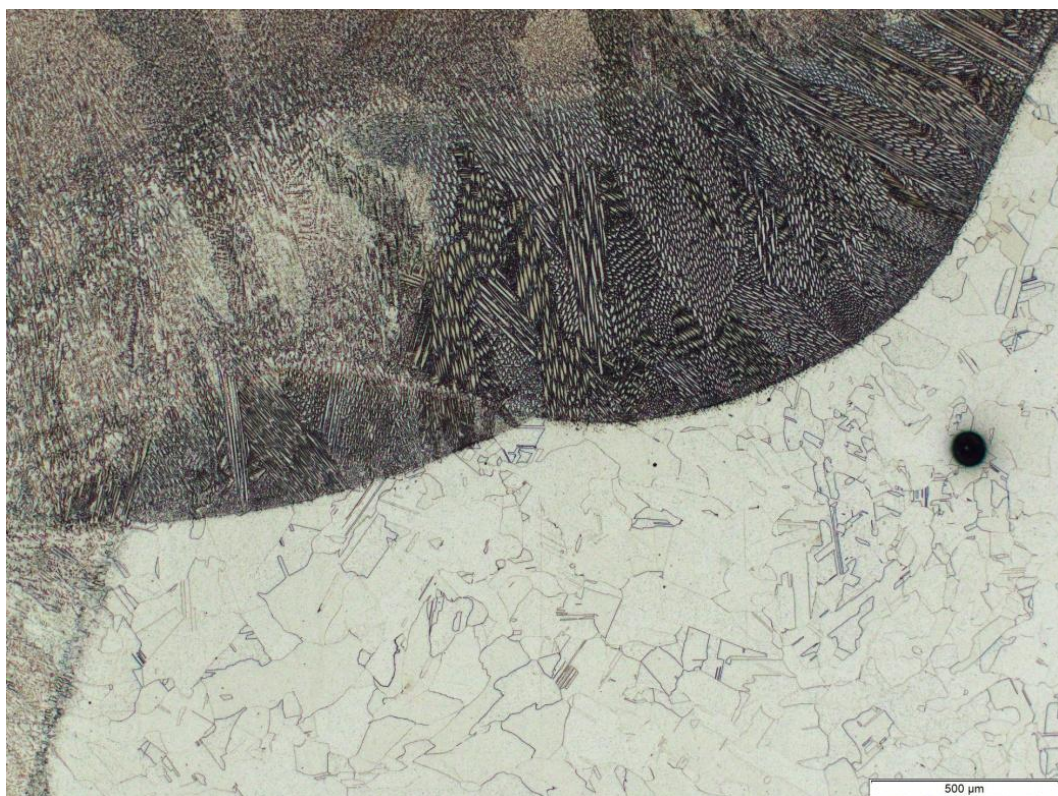
7.5 Mikrostruktura svarových spojů

- **Metoda 141:**

Na obrázku níže je porovnání austenitické mikrostruktury válcované a DED oceli. Na fotografiích je vidět základní materiál, hranice ztavení i svarový kov. U tvářené oceli jsou patrná protažená zrna ve směru válcování. U DED oceli je patrný pór v pravé části snímku. Hranice ztavení je u DED oceli patrnější než u válcované. U válcované oceli je patrná úzká zóna jemných rovnoosých zrn na hranici ztavení, zatímco u DED oceli se tato struktura téměř nevyskytuje a základní materiál přechází na linii ztavení rovnou to hrubé dendritické struktury. Stejná struktura byla pozorována i u opakovaného svařování metodou 141.

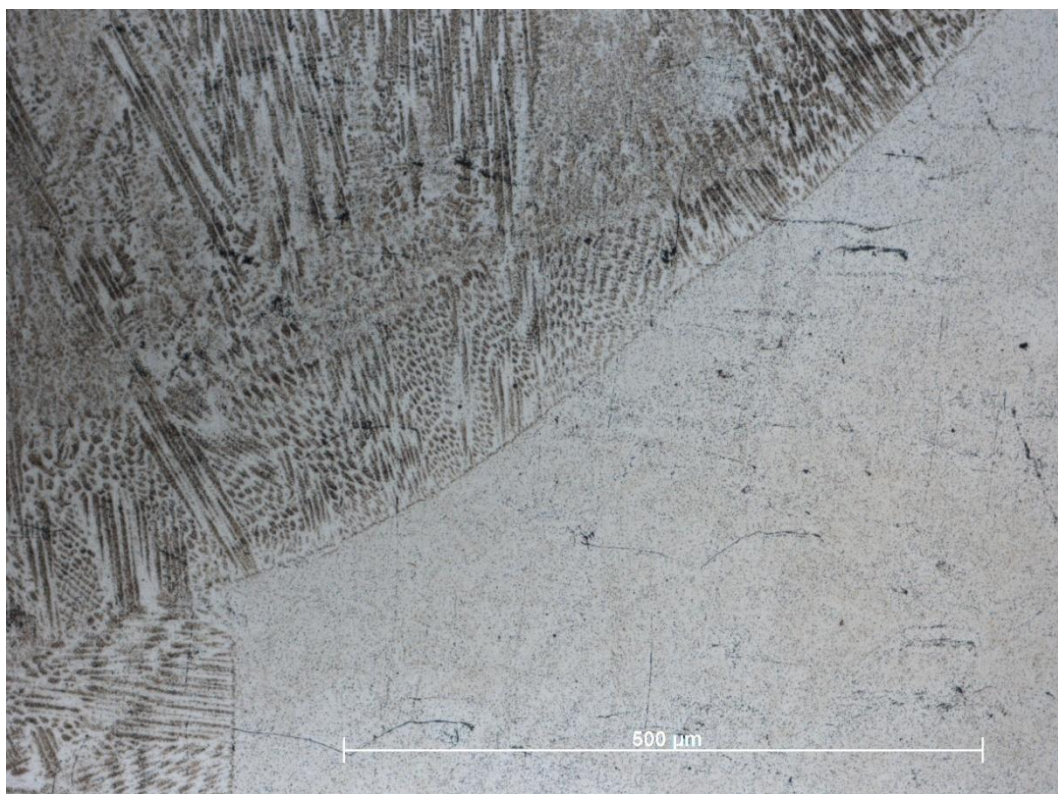


Obr. 54: mikrostruktura hranice ztavení svaru válcované oceli; metoda 141; zvětšeno 50x



Obr. 55: mikrostruktura hranice ztavení svaru DED oceli; metoda 141; zvětšeno 50x

- **Opakování metody 141:**



Obr. 56: Detail hranice ztavení svaru DED oceli; metoda 141; zvětšeno 100x



Obr. 57: Detail hranice ztavení svaru válcované oceli; metoda 141; zvětšeno 200x

- **Metoda 521:**

U válcovaného spoje je patrná širší hranice ztavení s jemnými rovnoosými zrny, která přechází v dendritickou strukturu. U DED a přechodového spoje je na straně aditivně vyrobené oceli patrná velmi hrubá dendritická struktura s dlouhými kolumnárními zrny. Nejvíce je to patrné u přechodového spoje, kde se v místě slícování plechů setkávají dvě značně odlišné struktury svarového kovu. Takto výrazný skokový rozdíl ve strukturách je nežádoucí, protože na svar bude působit jako vrub.



Obr. 58: Mikrostruktura svaru válcované oceli; metoda 521; zvětšeno 50x



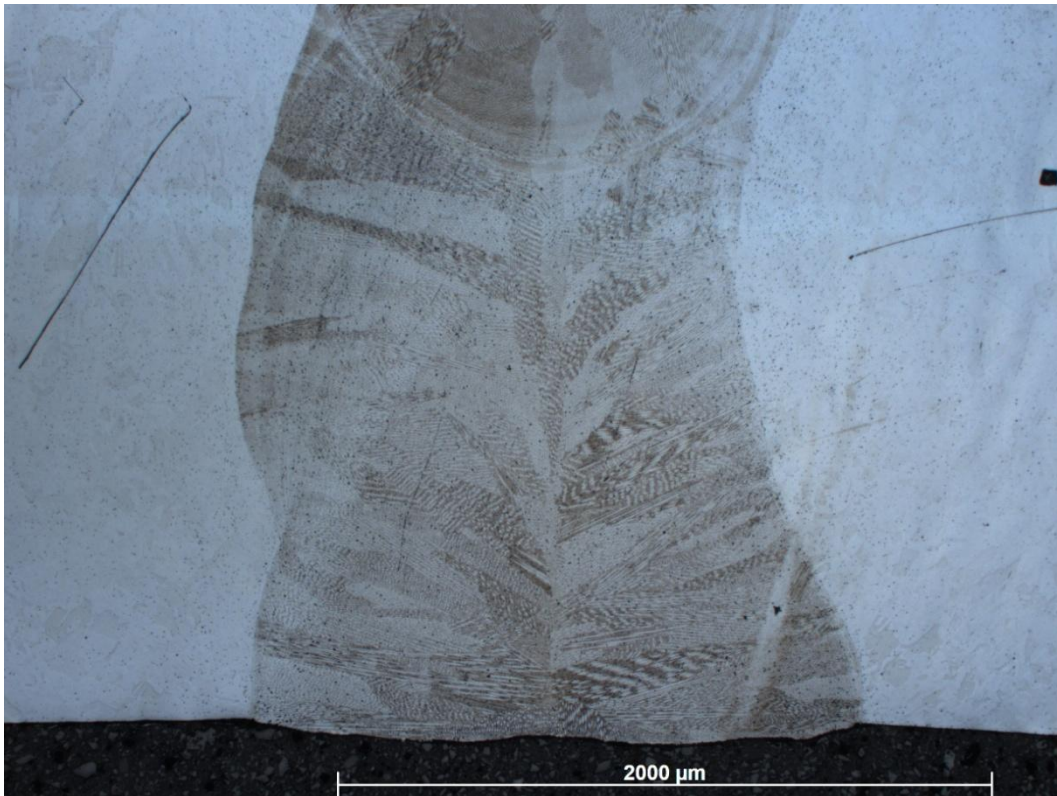
Obr. 59: Mikrostruktura svaru DED oceli; metoda 521; zvětšeno 50x



Obr. 60: Mikrostruktura přechodového svaru; metoda 521; zvětšeno 50x

- **Metoda 521 Cold wire:**

U metody 521 Cold wire je znatelný rozdíl především na obrázku níže, kdy kořen svařený bez přídavného drátu obsahuje dlouhá zrna. Při použití drátu dochází k určitému zjemnění této struktury.



Obr. 61: Mikrostruktura svaru DED oceli; metoda 521 Cold wire; zvětšeno 25x



Obr. 62: Detail hranice ztavení svaru válcované oceli; metoda 521 Cold wire; zvětšeno 200x

- **Určení velikost zrna**

Pro stanovení velikosti zrna obou základních materiálů byla použita norma ČSN EN ISO 643 pomocí planimetrické metody. Počet zrn na mm^2 byl u válcované oceli 5190, čímž byla stanovena velikost zrna G9. Tato velikost odpovídá střednímu průměru zrna 0,0156 mm. U aditivně vyrobené oceli byl počet zrna na mm^2 258, což odpovídá velikosti zrna G5; střední průměr zrna u DED oceli je tedy 0,0625 mm [54].



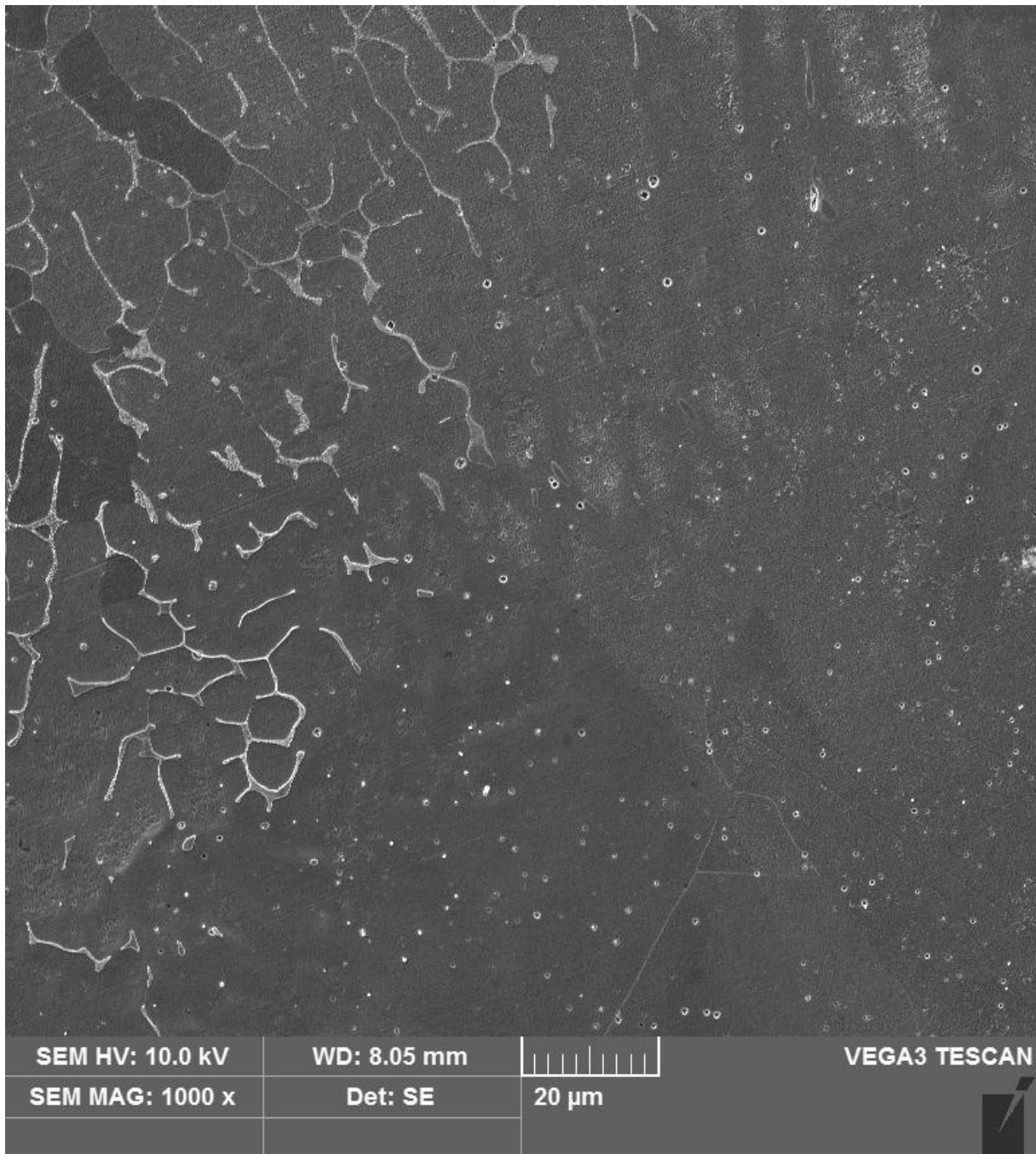
Obr. 63: Základní materiál; vlevo válcovaná, vpravo DED ocel; zvětšeno 200x

Zrno aditivně vyrobené oceli je tedy v porovnání se za tepla válcovanou ocelí přibližně 4x větší. Tento výsledek je velice překvapivý a při dalším rozšiřování experimentu (v rámci projektu CANUT-II) bude tento výsledek kontrolován pomocí rentgenové difrakce, nebo EBSD analýzy.

7.6 Pozorování mikrostruktury na řádkovacím elektronovém mikroskopu (SEM)

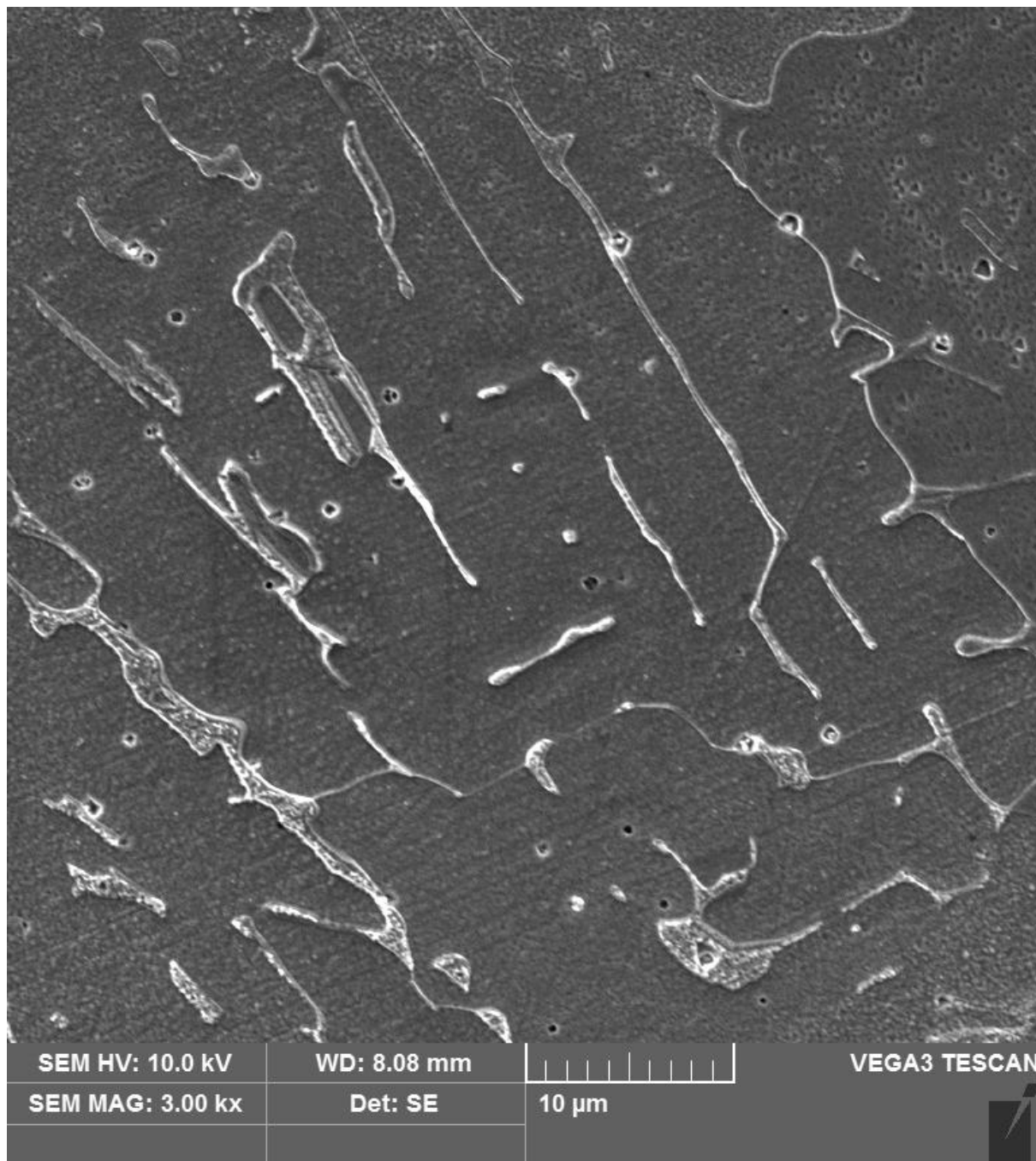
Pro hodnocení mikrostruktury svaru byl vybrán přechodových spoj vytvořený metodou 141. Důvodem bylo to, že neobsahoval dle NDT zkoušení žádné imperfekce a dále měla metoda TIG nejvyšší množství vneseného tepla, čímž byla potenciálně nejzajímavější pro zkoumání mikrostruktury svarového kovu a TOO. Míra vneseného tepla má vliv např. na vznik a šířku pásma zcitlivění, tvorbu karbidů chromu, apod.

Na snímku níže je hranice ztavení, která prochází úhlopříčně z levého dolního rohu do pravého horního mezi svarovým kovem a DED ocelí. Je zde patrný výskyt vměstků, pravděpodobně oxidů.



Obr. 64: Hranice ztavení přechodového spoje (strana DED oceli); metoda 141; zvětšeno 1000x, SEM

Další snímek zobrazuje detail svarového kovu krycí housenky. Jsou zde patrná austenitická zrna, po jejichž hranicích je pravděpodobně delta ferit a sigma fáze. Drobné kulaté jamky jsou nejspíš díry po oxidech, které se odleptaly, jelikož byl vzorek před pozorováním na SEM slabě naleptán lučavkou královskou. Struktura základního materiálu je velice podobná snímku uvedeném v rešeršní části z publikace [20].



Obr. 65: Detail svarového kovu přechodového spoje; metoda 141; zvětšeno 3000x, SEM

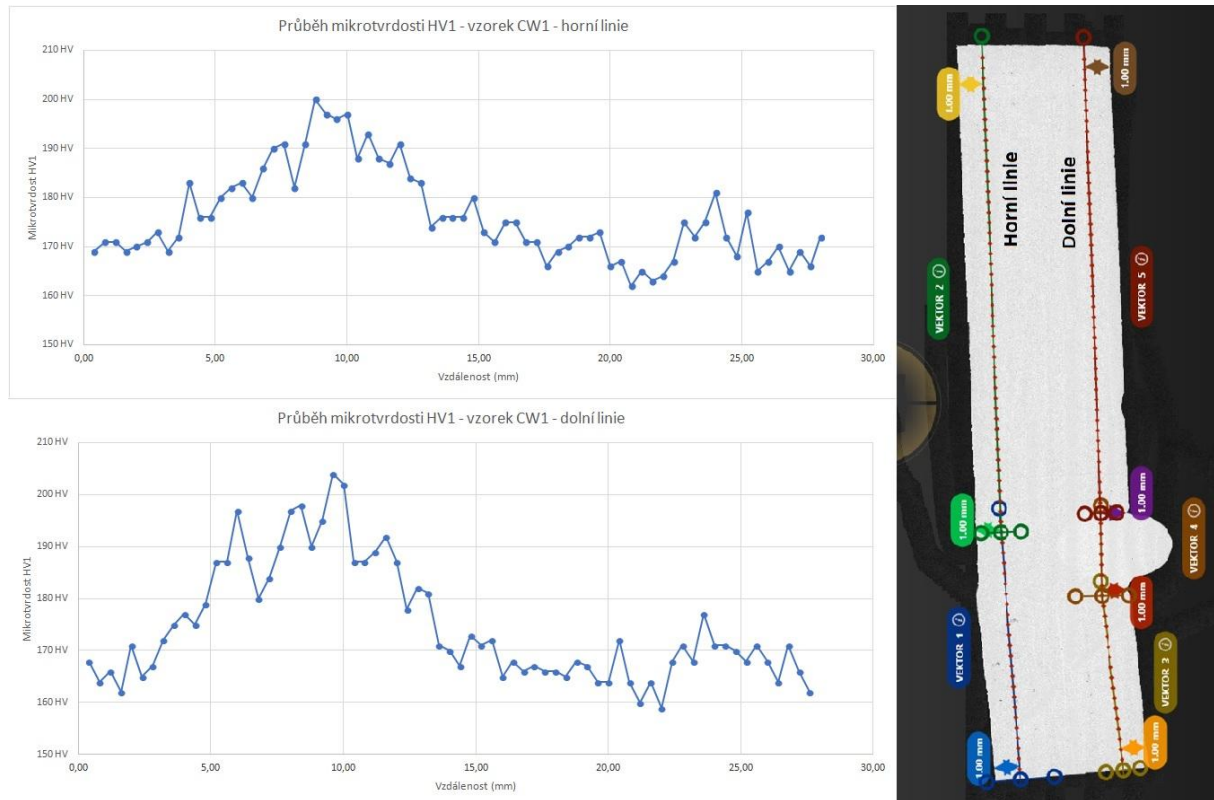
7.7 Měření průběhu mikrotvrlosti

Pro metodu 521 Cold wire bylo provedeno měření mikrotvrlosti HV1. Pro každý ze tří svarů byly provedeny dvě série vtisků, 1 mm od povrchu na straně kořene a na straně líce svaru.

- **Válcovaná ocel**

Tvrдость základního válcovaného materiálu byla 167 HV1. Na grafu průběhu tvrdosti je u horní linie (kořen svaru) naměřena nejvyšší hodnota 200 HV1. V makro měřítku je zde pouze jeden vrchol tvrdosti, což odpovídá profilu svaru, kdy kořen byl svařen natupo bez drátu. Přibližná šířka svarového kovu kořene je 2 mm. Přibližná šířka kořene je od 7,2 do 10,0

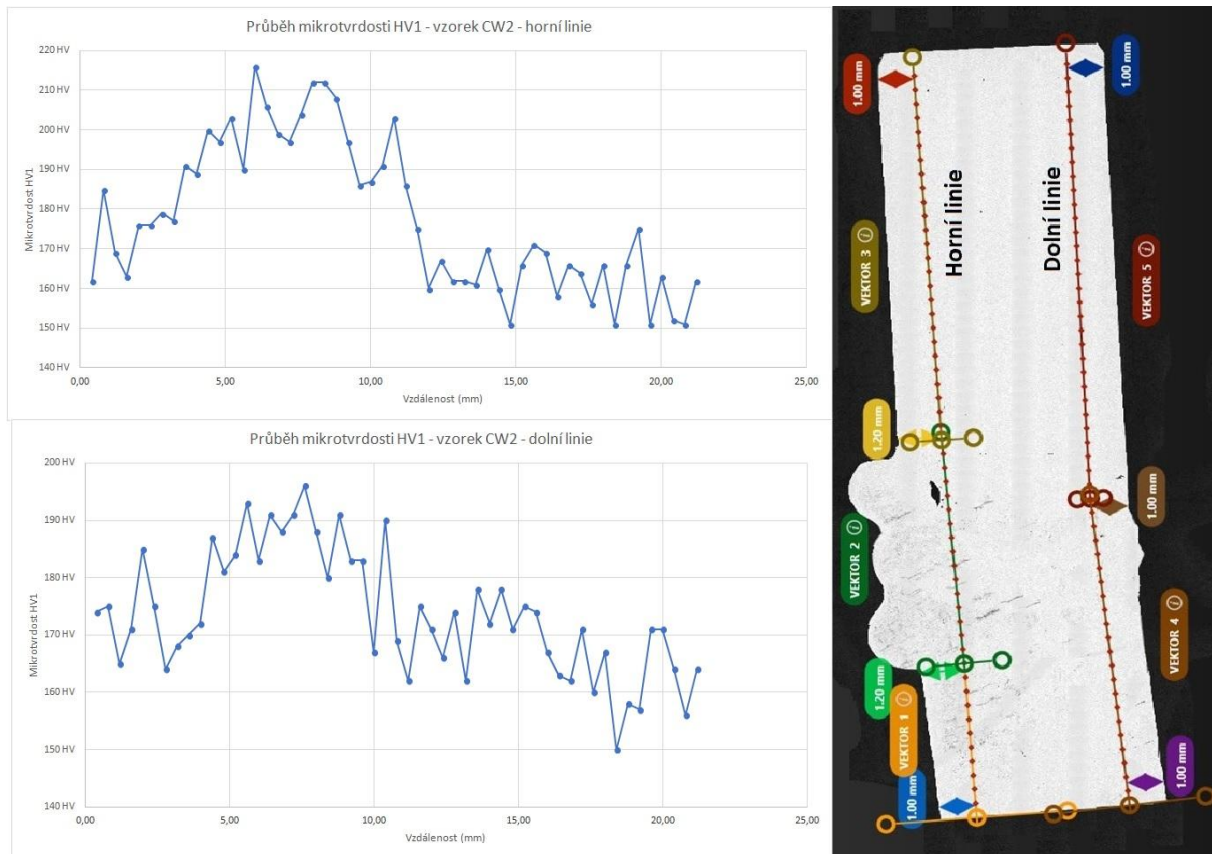
mm od nulového bodu. U dolní linie (líc svaru) je naměřené maximum 204 HV1. Vrcholy jsou zde v podstatě dva, což znovu reflektuje profil svaru, tedy úkos vyplněný drátem. Přibližná šířka svaru včetně TOO je od 6 do 11,6 mm od nulového bodu. Při zhodnocení obou měření je rozdíl mezi maximální (204 HV1) a minimální (159 HV1) 45 HV1.



Obr. 66: Průběh mikrotvrdotí HV1; válcovaná ocel; metoda 521 Cold wire

- **DED ocel**

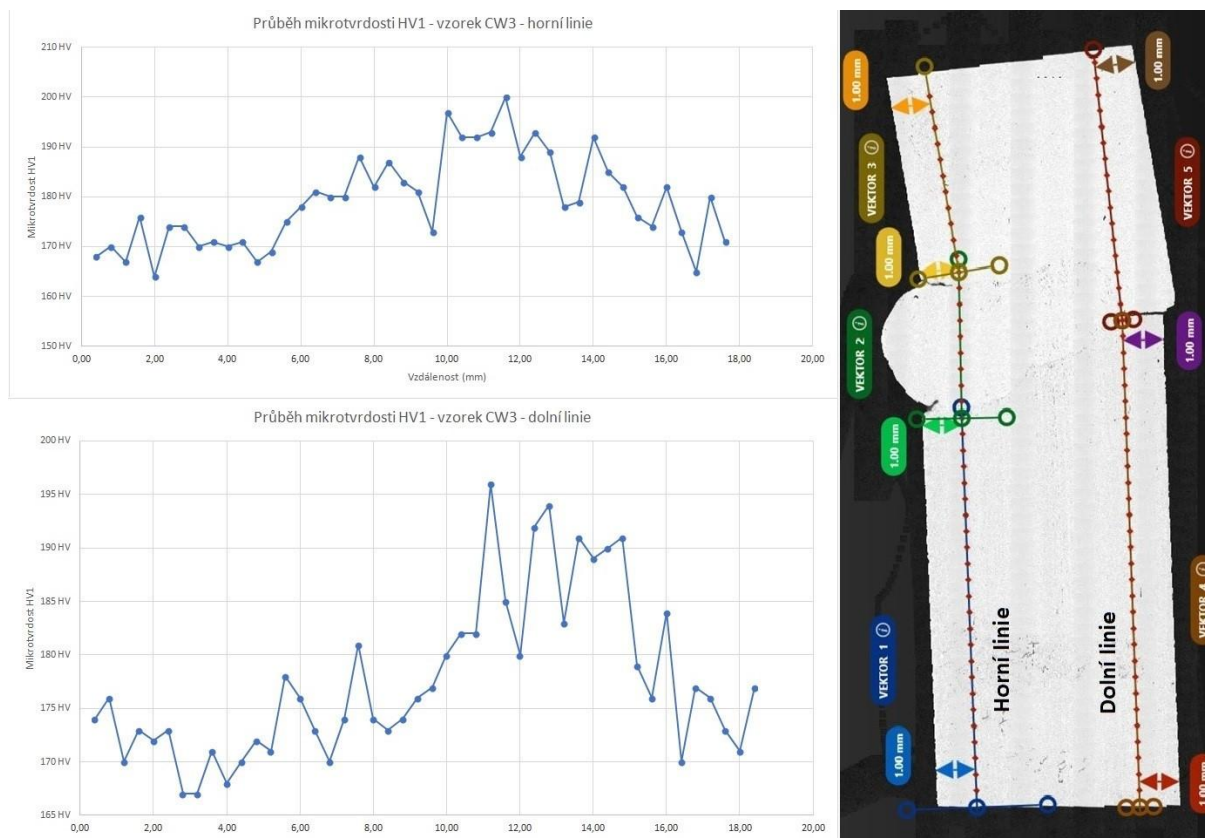
Průměrná naměřená tvrdost základního aditivně vyrobeného materiálu byla 164 HV1, což je podobná hodnota jako u válcované oceli. Horní linie je v tomto případě líc svaru a jsou zde v podstatě tři extrémy (vrcholy), které odpovídají schématu svaru. První vrchol je ve vzdálenosti 6,0 mm od počátku (216 HV1), což odpovídá hranici ztavení, či tepelně ovlivněné oblasti. Druhý vrchol je uprostřed svarové housenky. Třetí vrchol je 10,8 mm a odpovídá druhé hranici ztavení. Dolní linie zde odpovídá kořenu svaru a průběh mikrotvrdotí je nejednoznačný s větším množstvím vrcholů s maximální naměřenou tvrdostí 196 HV1. Rozdíl mezi nejvyšší (216 HV1) a nejnižší (151 HV1) naměřenou z obou řad tvrdostí je 65 HV1.



Obr. 67: Průběh mikrotvrlosti HV1; DED ocel; metoda 521 Cold wire

- **Přechodový spoj**

Horní linie je v případě přechodového spoje lícem svaru, kdy měření (nulový bod) začíná na straně válcované oceli. První vrchol grafu je v 10,0 mm, což odpovídá TOO nebo hranici ztavení. Dalším vrcholem (200 HV1 – maximum) je zhruba střed svarové housenky a třetím vrcholem v 14,0 mm je nejspíše TOO. Dolní linie (kořen) vykazuje podobný trend jako předchozí kořenové partie, přestože je průběh tvrdosti měřen v oblasti nedostatečného natavení kořene. Nejvyšší naměřená hodnota je 196 HV1 a jedná se o TOO v oblasti neprůvaru pod kořenovou housenkou. Rozdíl mezi maximální (196 HV1) a minimální (167 HV1) naměřenou hodnotou z obou měření je 29 HV1.



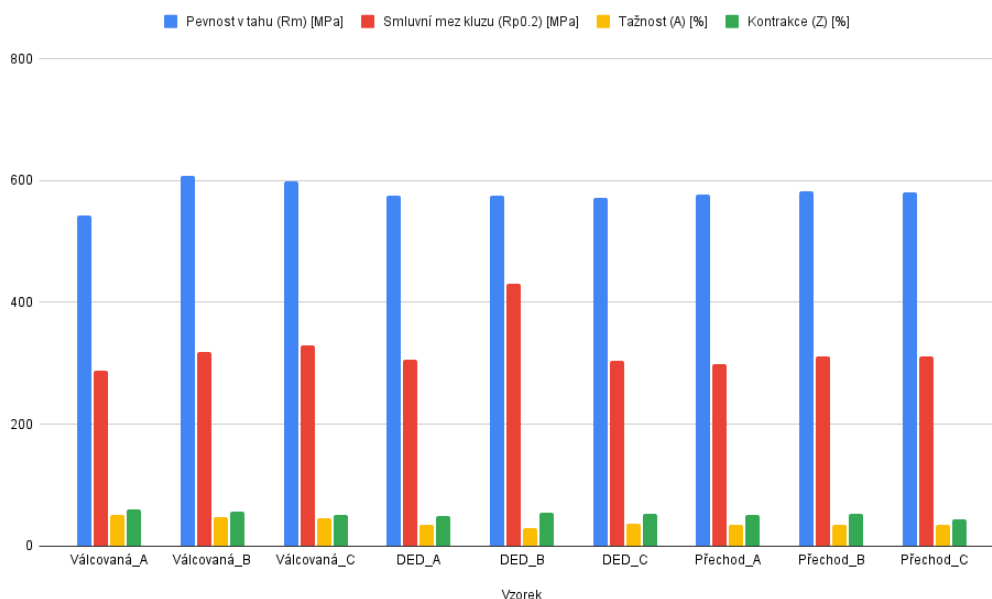
Obr. 68: Průběh mikrotvrlosti HV1; přechodový spoj; metoda 521 Cold wire

7.8 Statická zkouška tahem – opakování metody 141

Statická zkouška tahem byla pro svařenec metody TIG provedena dle ČSN EN ISO 6892-1. Kvůli rozměrům svařence a zkušebních těles bylo možné vyrobít jen tři kusy z každého ze tří svarů. Výsledky zkoušky jsou shrnuty do tabulky a grafu níže. Jendotlivé vzorky byly označeny písmeny A, B, C [55].

Tab. 14: Výsledky statické tahové zkoušky; metoda 141 (opakování)

Vzorek	Pevnost v tahu (Rm) [MPa]	Smluvní mez kluzu (Rp0.2) [MPa]	Tažnost (A) [%]	Kontrakce (Z) [%]
Válcovaná A	542	287	50,2	60,7
Válcovaná B	607	319	47,2	56
Válcovaná C	599	329	46,3	50,5
DED_A	576	306	35,0	48,5
DED_B	576	431	28,5	54,1
DED_C	572	304	36,5	53,1
Přechod A	577	298	34,6	51
Přechod B	583	311	35,1	52,3
Přechod C	580	312	34,3	43,1



Obr. 69: Graf výsledků statické zkoušky tahem; metoda 141 (opakování)

Z grafu je patrné, že se zde nevyskytuje žádná výrazná odchylka, která by značila vadu svaru, či chybu při měření.

7.9 Makroskopické hodnocení lomových ploch – opakovaná metoda 141

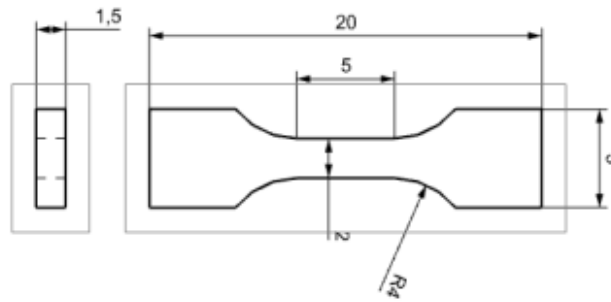
Vzorky po přetržení byly sestavny k sobě a pozorovány pouhým okem. U všech vzorků s výjimkou spoje válcované oceli C došlo k přetržení v základním materiálu. U přechodového svaru nastal lom ve všech třech případech na straně DED oceli. U všech vzorků se vytvořil výrazný krček a došlo k tvárnému lomu.



Obr. 70: Přetržené vzorky po statické tahové zkoušce; metoda 141 (opakování)

7.10 Statická zkouška tahem – metoda 521

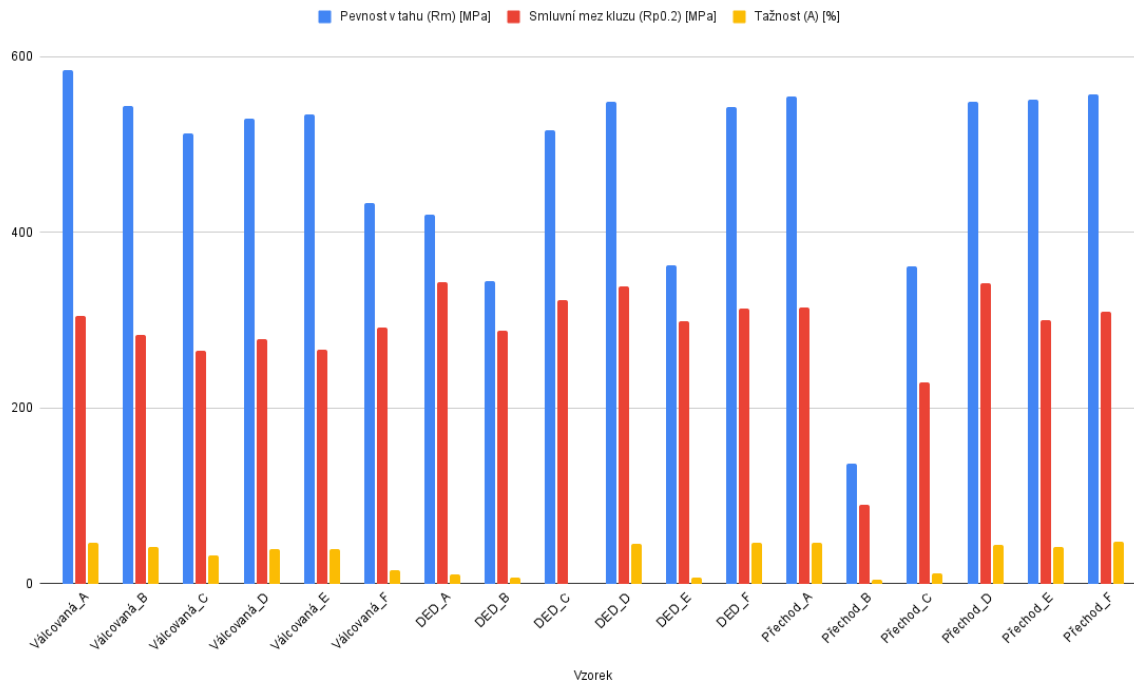
Statická zkouška tahem byla provedena pro svary zhotovené laserem bez přídavného drátu, tedy metodou 521. Z každého ze tří vzorků bylo připraveno šest zkušebních těles pomocí elektroerozivní drátové rezačky. Jelikož kvůli velikosti svařenců nebylo možné provést statické tahové zkoušky o standardních rozměrech, byly vyrobeny zmenšená zkušební tělesa, viz schéma níže.



Obr. 71: Rozměry zmenšených zkušebních těles statické tahové zkoušky

Tab. 15: Výsledky statické tahové zkoušky; metoda 521

Vzorek	Pevnost v tahu (Rm) [MPa]	Smluvní mez kluzu (Rp0.2) [MPa]	Tažnost (A) [%]
Válcovaná A	584	305	46,9
Válcovaná B	544	283	41,6
Válcovaná C	512	265	31,7
Válcovaná D	529	278	38,9
Válcovaná E	534	266	39,7
Válcovaná F	433	291	15,0
DED_A	420	343	10,5
DED_B	344	288	6,5
DED_C	516	323	Chyba stroje
DED_D	548	338	44,8
DED_E	362	299	6,8
DED_F	543	313	46,0
Přechod A	555	314	46,5
Přechod B	136	90	4,3
Přechod C	361	229	11,2
Přechod D	548	342	43,5
Přechod E	551	300	42,1
Přechod F	557	310	47,2



Obr. 72: Graf výsledků statické tahové zkoušky; metoda 521

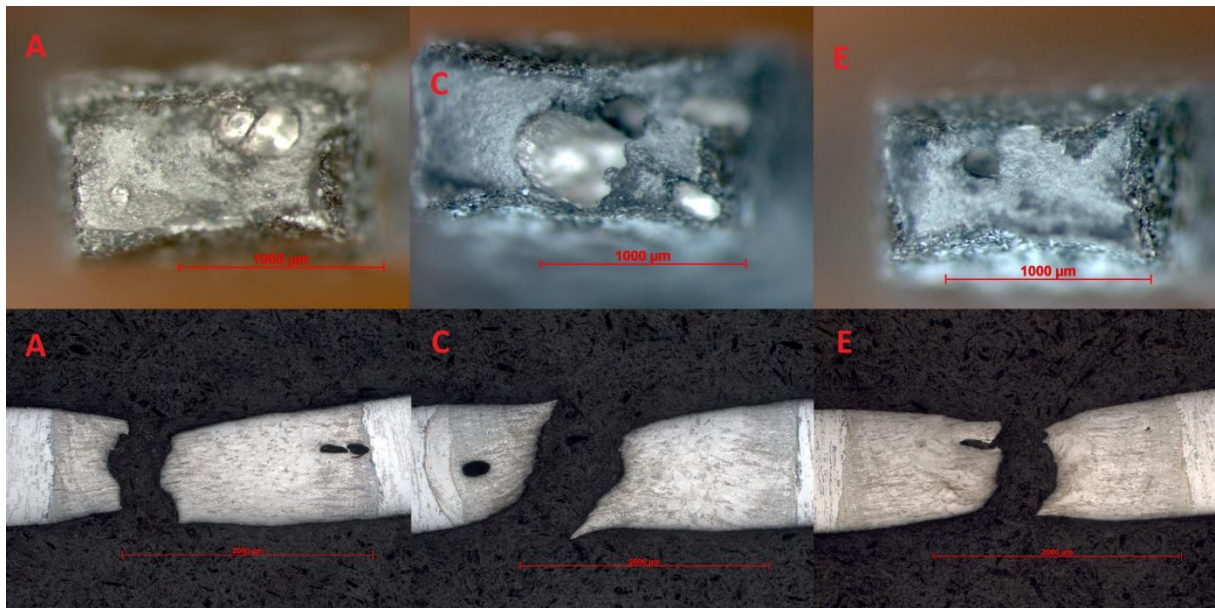
Tabulka a graf výše shrnují tahové zkoušky pro metodu 521. Při porovnání výsledků nemůže být brán v úvahu vzorek Přechod_B, jelikož byl materiál téměř úplně nenatavený (viz dále makro snímky). Při vypočtení průměrné hodnoty pak má válcovaná ocel pevnost v tahu 523 MPa, DED ocel 456 MPa a přechodový spoj 514 MPa. Tažnost je pro válcovanou ocel 35,6%, pro DED 22,9 a 38,2 pro přechod.

7.11 Makroskopické hodnocení lomových ploch – metoda 521

Vzorky po statické tahové zkoušce byly zkoumány na makro lupě pro popis lomů. Dále byly z každé sady tři vzorky zality a byl na nich zhotoven metalografický výbrus pro další hodnocení.

- **Válcovaná ocel**

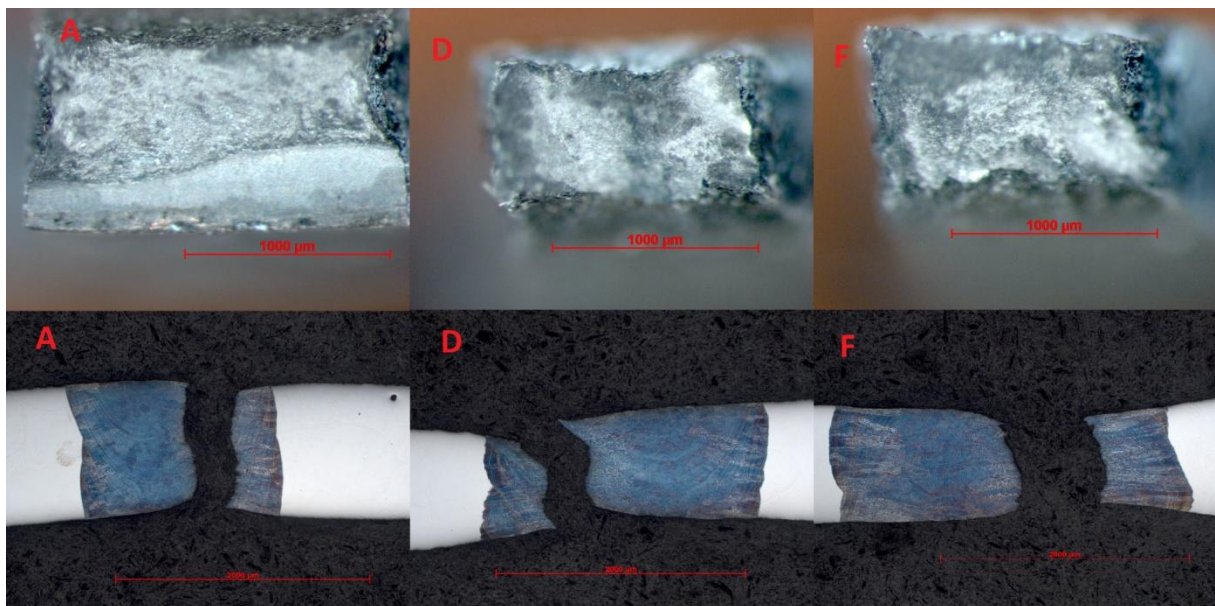
Na makro snímcích svaru válcované oceli je na vzorcích viditelná pórovitost, viz rentgenografické zkoušení. Na obrázku níže jsou lomové plochy tří vzorků A, C, E. U všech vzorků došlo k přetržení v oblasti svaru.



Obr. 73: Lomové plochy svaru válcované oceli; metoda 521

- **DED ocel**

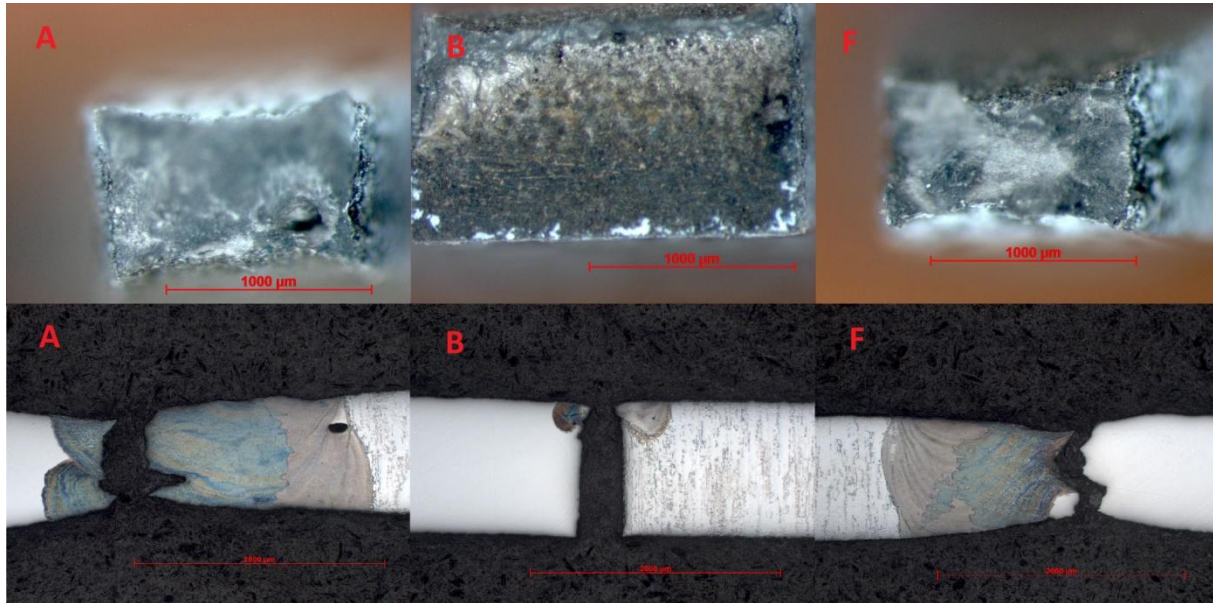
Na makro snímcích svarů DED oceli není ve svaru pozorován žádný pór (kromě póru v základním materiálu na obr A dole), jako tomu bylo u válcované oceli, viz výše. Ke všem lomům došlo ve svaru. U vzorku A je v horních 2/3 vidět tvárné porušení a v spodní části je vidět křehké dolomení.



Obr. 74: Lomové plochy svaru DED oceli; metoda 521

- **Přechodový spoj**

Na svaru A jsou viditelné póry; vzorek B je téměř v celé šířce neprovařený a materiály jsou spojeny pouze v horní části, viz níže. Vzorek B byl tedy odebrán z nenatavené kořenové partie. U vzorku F došlo k přetržení na hranici ztavení na straně DED oceli.



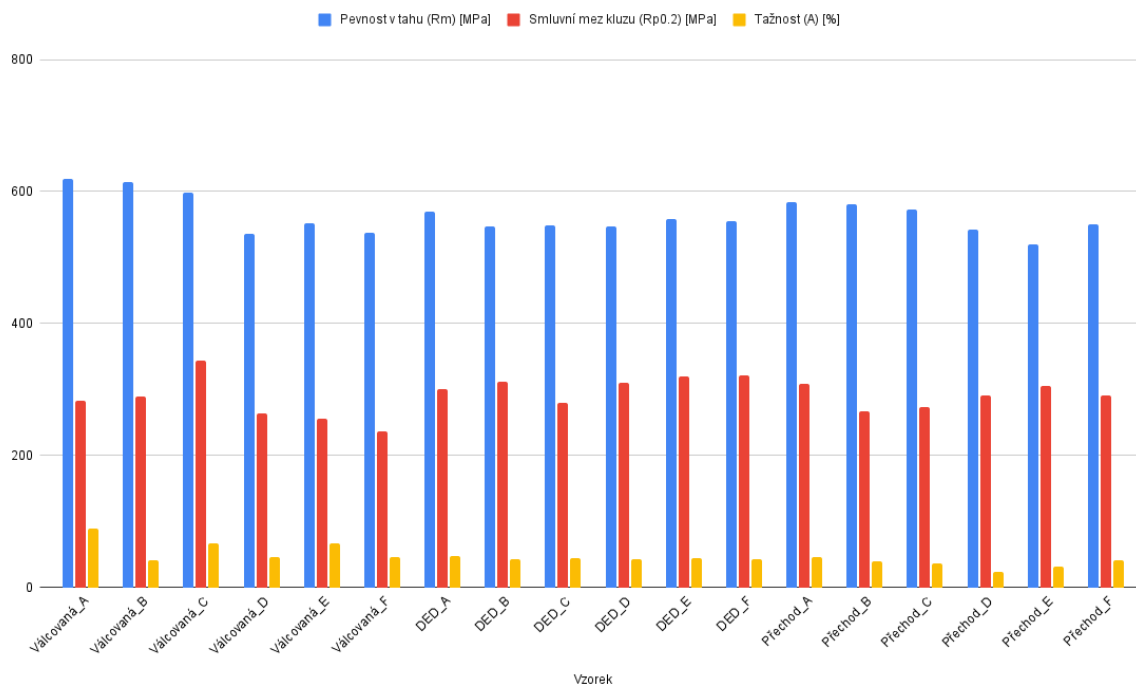
Obr. 75: Lomové plochy přechodového spoje; metoda 521

7.12 Statická zkouška tahem – metoda 521 Cold wire

Statická zkouška tahem provedena rovněž pro svary zhotovené laserem s přídavným drátem, tedy metodou 521 Cold wire. Zmenšená zkušební tělesa byla připravena stejně jako v případě vzorků metoda 521, viz výše. Vzorky byly znovu označeny písmeny A – F, přičemž vzorky A, B, C byly odebrány z lící strany svaru, tedy z části spoje, kde byl použit přídavný drát. Vzorky D, E, F byly odebrány z kořenové partie svaru, kteráž byla svařena bez úkosu, natupo bez přídavného drátu. Tabulka níže uvádí naměřené hodnoty.

Tab. 16: Statická zkouška tahem ; metoda 521 Cold wire

Vzorek	Pevnost v tahu (Rm) [MPa]	Smluvní mez kluzu (Rp0.2) [MPa]	Tažnost (A) [%]
Válcovaná A	619	283	89,4
Válcovaná B	615	289	41
Válcovaná C	599	344	67,4
Válcovaná D	536	264	45,6
Válcovaná E	552	256	67
Válcovaná F	538	237	46,2
DED_A	569	300	48,3
DED_B	547	311	42,2
DED_C	548	280	44
DED_D	547	310	42,6
DED_E	558	319	43,9
DED_F	555	322	42,6
Přechod A	584	308	45,6
Přechod B	580	267	40,2
Přechod C	573	273	35,6
Přechod D	542	291	23,8
Přechod E	520	305	31,6
Přechod F	551	291	41,7



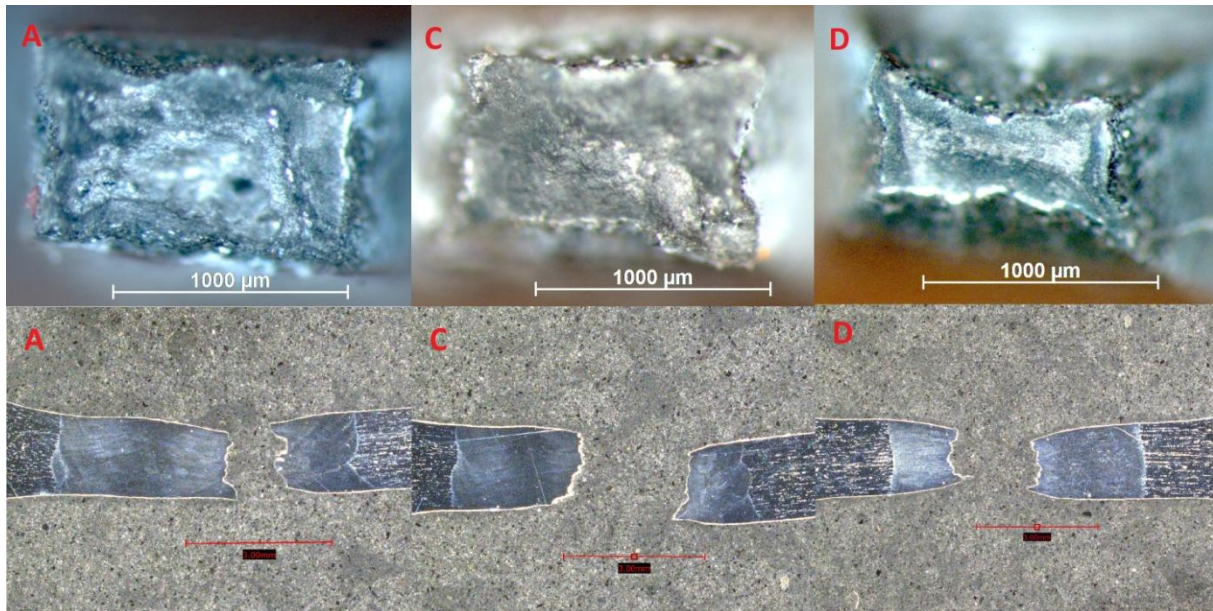
Obr. 76: Graf výsledků statické tahové zkoušky; metoda 521 Cold wire

Tabulka a graf výše shrnují tahové zkoušky pro metodu 521 Cold wire. Na první pohled zde není žádná výrazná odchylka, která by znamenala, že byl některý ze vzorků přechodového spoje nevhodně odebrán z nenatavené části kořene. Při vypočtení průměrných hodnot pak má válcovaná ocel pevnost v tahu 577 a tažnost 59,4 %. Aditivní ocel dosahovala meze pevnosti 554 MPa a tažnosti 43,9 %; přechodový spoj měl průměrnou pevnost 558 MPa a tažnost 36,4 %.

7.13 Makroskopické hodnocení lomových ploch – metoda 521 Cold wire

- **Válcovaná ocel**

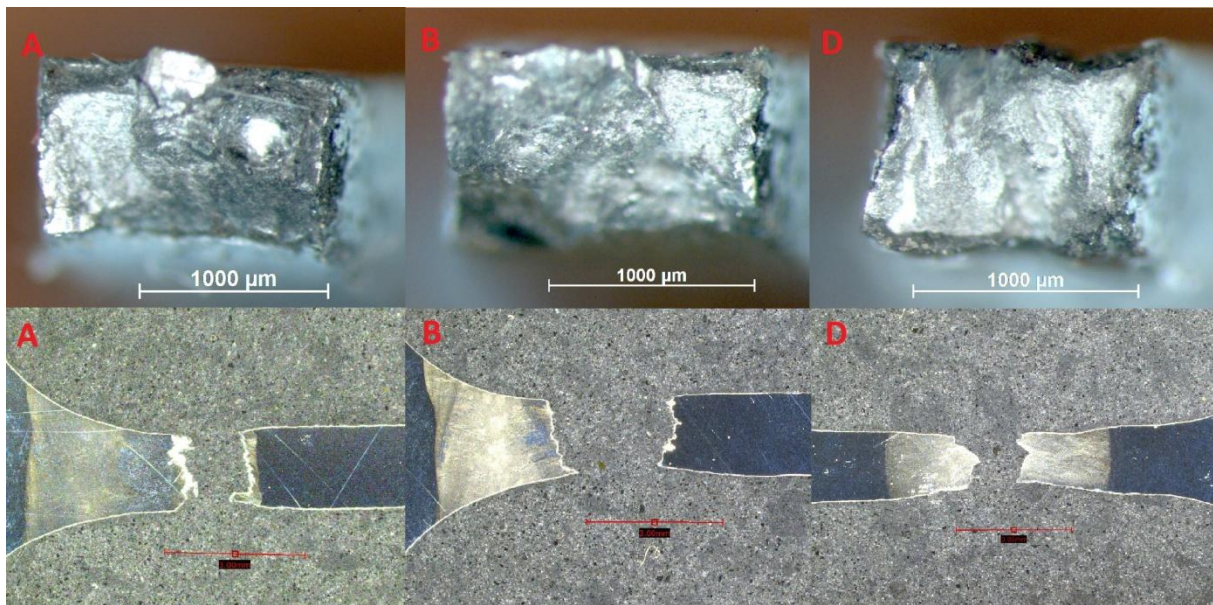
Vzorky válcované oceli po statické tahové zkoušce neobsahovaly dle zkoumání žádné póry, jako tomu bylo v případě válcovaného spoje metody 521. K přetržení došlo ve všech případech v oblasti svarového kovu.



Obr. 77: Lomové plochy svaru válcované oceli; metoda 521 Cold wire

- **DED ocel**

U vzorků DED oceli došlo ve všech případech s výjimkou vzorku B (kde došlo k porušení na hranici ztavení) k přetržení ve svarovém kovu.

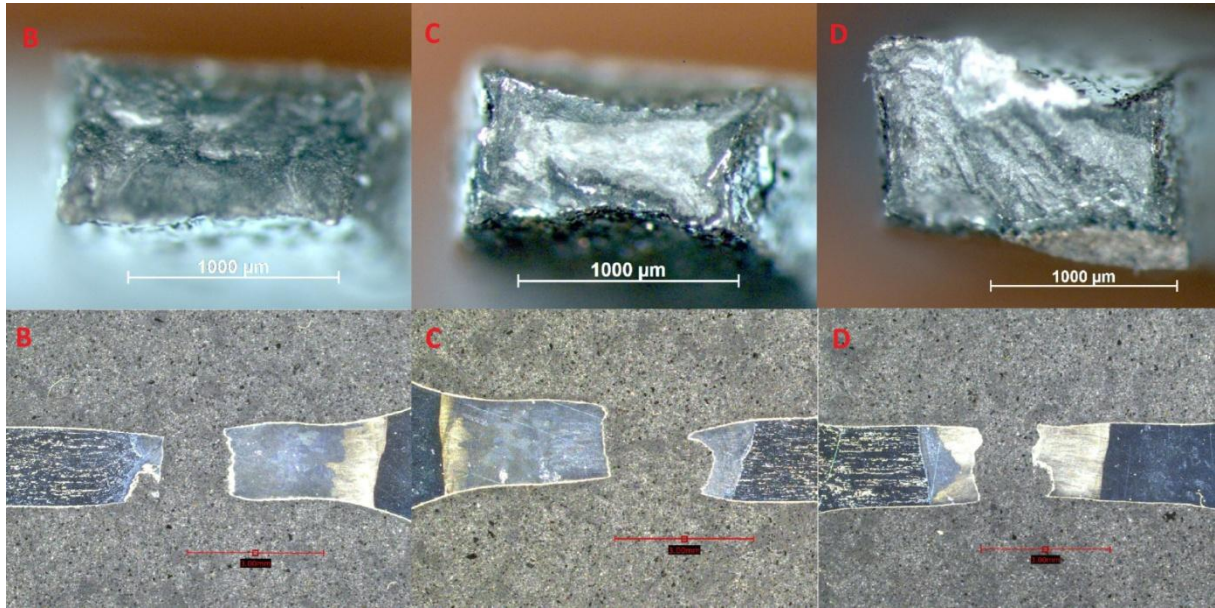


Obr. 78: Lomové plochy svaru DED oceli; metoda 521 Cold wire

- **Přechodový spoj**

U vzorků přechodové spoje rovněž došlo k přetržení v oblasti svarového kovu. Na snímku níže je dobře pozorovatelná rozdílná šířka oblasti svaru, jelikož vzorky B a C jsou

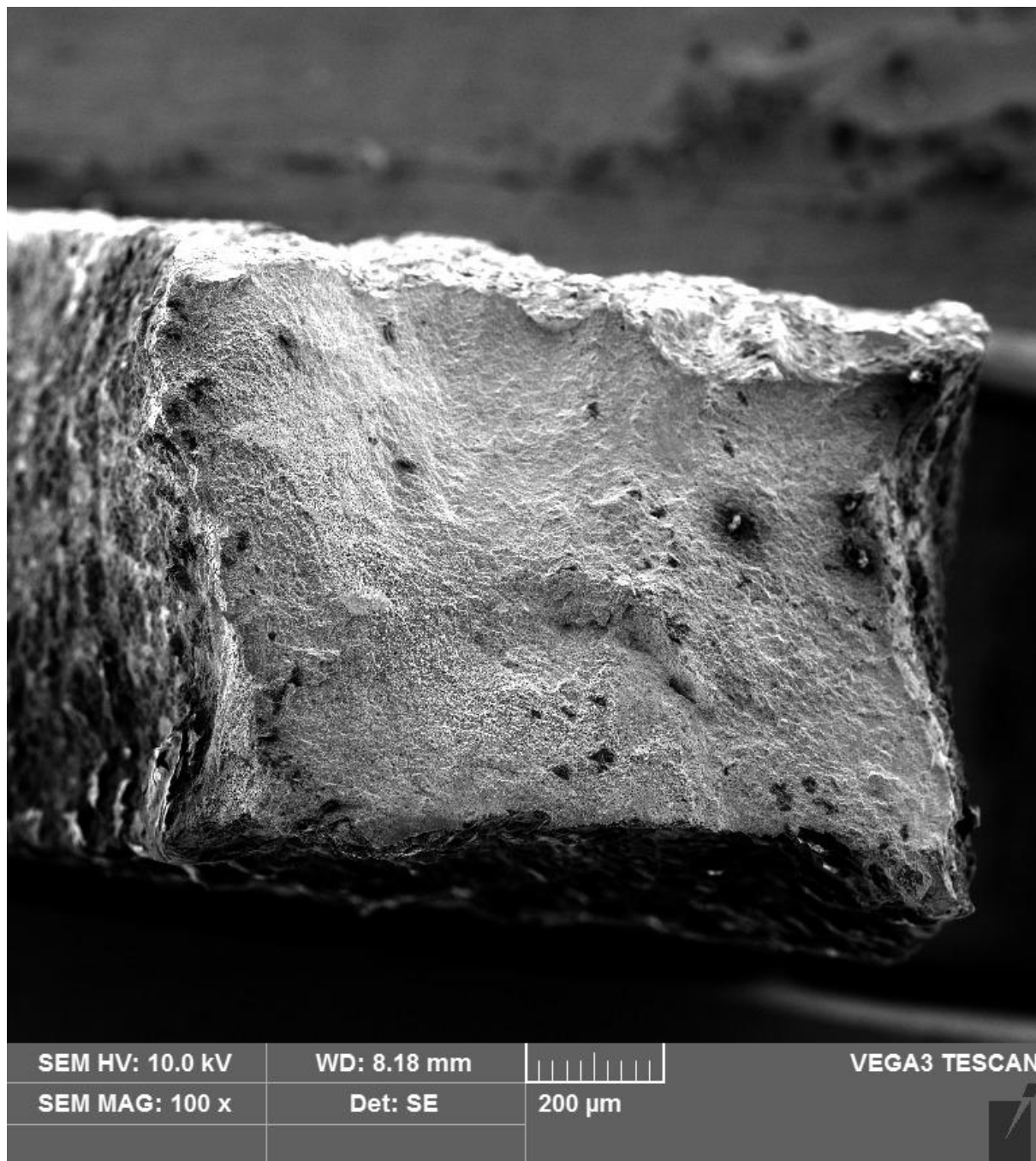
z lící strany svaru, kde byl připravený úkos vyplněný přídatným drátem, zatímco vzorek D je z kořenové části, kde byly vzorky svařeny natupo bez úkosu a bez drátu.



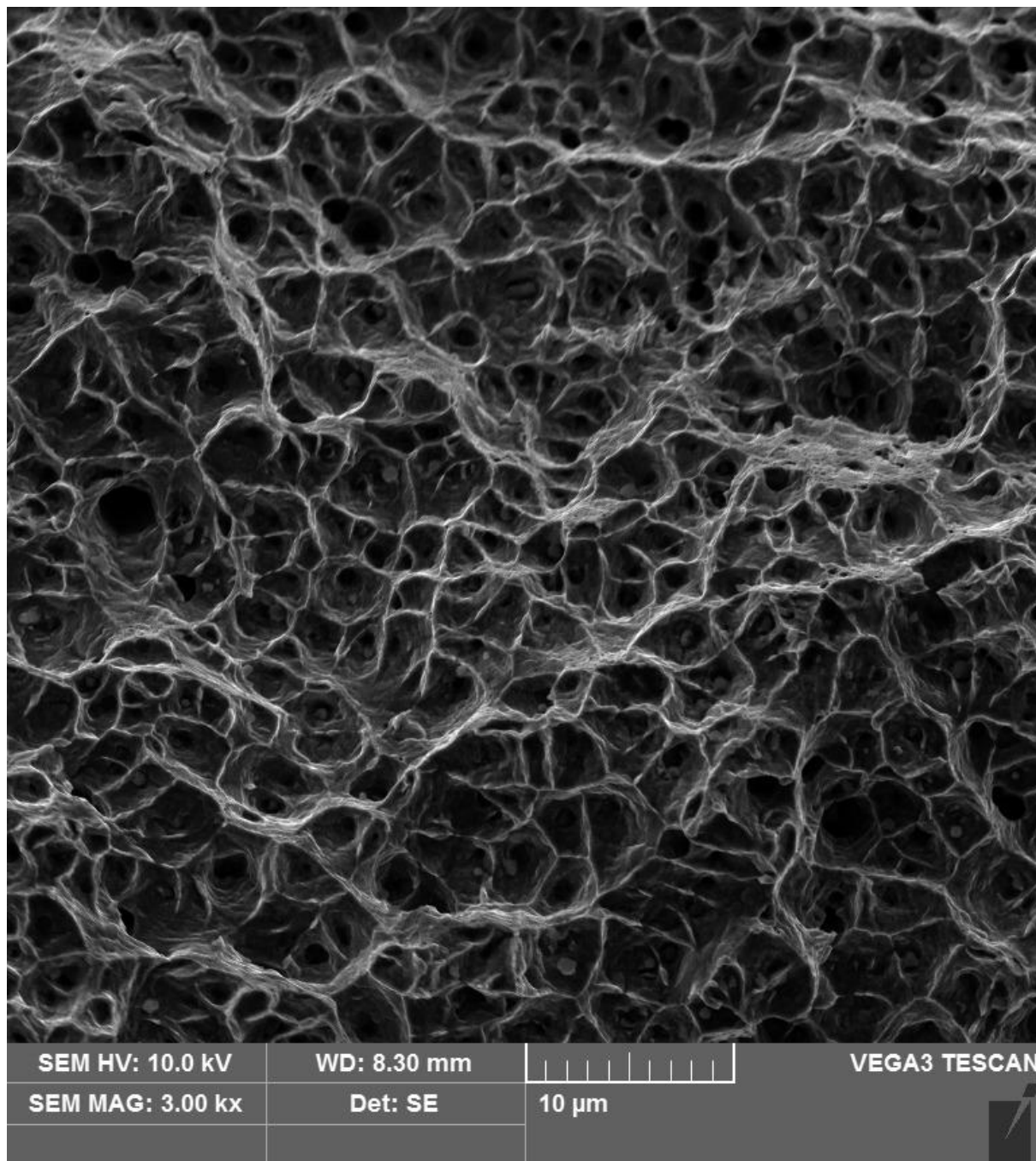
Obr. 79: Lomové plochy přechodového spoje; metoda 521 Cold wire

7.14 Pozorování lomů na řádkovacím elektronovém mikroskopu (SEM)

Pro hodnocení lomu po statické tahové zkoušce byl vybrán vzorek DED_C svařený metodou 521 Cold wire. Jedná se o vzorek odebraný z kořenové partie svaru, tedy o část svaru neobsahující přídatný materiál. Z pozorování je patrné, že se jedná o tvárný lom s jamkovou morfologií. Detail struktury na obrázku výše je velice podobný snímkům horizontálně zatěžované DED oceli 316L z experimentu [20].



Obr. 80: Lom svaru DED oceli; metoda 521; zvětšeno 100x, SEM



Obr. 81: Detail struktury lomu DED oceli; metoda 521; zvětšeno 3000x, SEM

7.15 Zkouška ohybem

Další provedenou destruktivní zkouškou byla zkouška ohybem s přihlédnutím k normě ČSN EN ISO 5173 [56].

Zkouška mohla být provedena pouze pro metodu TIG, jelikož ostatní svařence neměly dostatečné rozměry. Vyhodnoceny byly jen vzorky válcované a DED oceli. Pro oba svary byly připraveny dva vzorky, aby mohl být proveden ohyb přes líc i přes kořen svaru. Pro ohnutí byl použitý přípravek tvaru U. Poloměr ohýbacího trnu byl 36 mm, vzdálenost mezi podpěrami 60 mm a rádius matrice 20 mm. Úhel ohybu α byl pro všechny vzorky $21^\circ - 22^\circ$. Fotografie níže zachycuje výsledné ohnuté vzorky. U všech vzorků došlo k plastické

deformaci a ohnutí bez známek vzniku trhlin v místě svaru či TOO. Výsledek zkoušky je tedy ve všech případech vyhovující.



Obr. 82: Vzorky po ohybové zkoušce; vlevo válcovaná, vpravo DED ocel; metoda 141

7.16 Porovnání vneseného tepla při svařování

Pro každý vytvořený svarový spoj bylo vypočteno vnesené teplo, viz jednotlivé podkapitoly. Při nahlédnutí do tabulky níže je zřejmé, že u pro metody laserového svařování množství vneseného tepla výrazně méně než poloviční ve srovnání s obloukovou metodou TIG. Pro vytvoření svarového spoje s plným průvarem metodou TIG byly zapotřebí 4 housenky (při opakování svařování dokonce 5 kvůli kořenové protivrstvě), zatímco u laserového spoje natupo stačily 2. Výjimkou je pouze Cold wire DED spoj, kdy byly potřebné 4 svarové vrstvy. Rozdíl je značný; při porovnání metody 141 a 521 až desetinásobný.

Tab. 17: Porovnání vneseného tepla pro všechny svary

metoda	materiál	vnesené teplo [kJ/mm] (1,2,.. = číslo housenky)	celkové vnesené teplo ve svaru [kJ/mm]
141	válcovaný	1) 0,44; 2) 0,50; 3) 0,48; 4) 0,66	2,08
	DED	1) 0,46; 2) 0,63; 3) 0,57; 4) 0,66	2,32
141 opakování	válcovaný	1) 0,78; 2) 0,72; 3) 0,68; 4) 0,75; 5) 0,58	3,51
	DED	1) 0,61; 2) 0,73; 3) 0,65; 4) 0,73; 5) 0,49	3,21
	přechod	1) 0,76; 2) 0,68; 3) 0,56; 4) 0,70; 5) 0,52	3,22
521	válcovaný	1) 0,17; 2) 0,17	0,34
	DED	1) 0,17; 2) 0,17	0,34
	přechod	1) 0,17; 2) 0,17	0,34
Cold wire	válcovaný	1) 0,20; 2) 0,22	0,42
	DED	1) 0,20; 2) 0,23; 3) 0,10; 4) 0,07	0,60
	přechod	1) 0,20; 2) 0,22	0,42

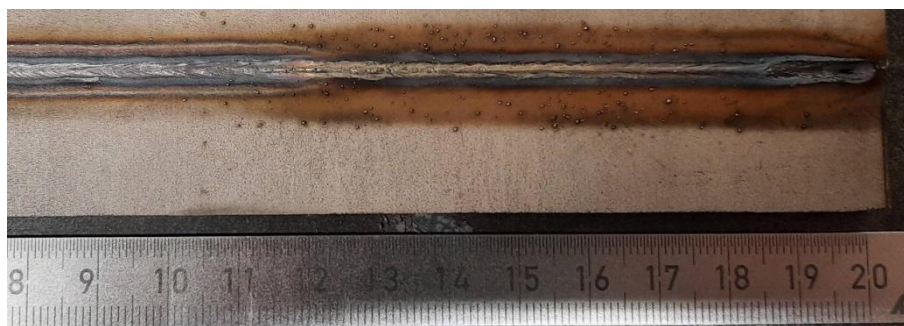
8 Diskuze výsledků

Při svařování DED oceli metodou 141 došlo k neočekávanému protečení druhé výplňové vrstvy, k přetavení kořene a k jeho znehodnocení; kořen byl očividně zoxidovaný, jelikož již nebyl při druhé svarové vrstvě použit formovací plyn ze strany kořene. Jedno z vysvětlení by mohlo být, že velikost vzorku nebyla dostatečná a docházelo k přílišné teplotní expozici a tedy i roztavení kořene, ovšem u válcované oceli, kde byly vzorky podobně velké, k tomuto jevu nedošlo. K tomuto protečení došlo ovšem i při opakovaném svařování metodou TIG, tudíž příčinou není velikost vzorku a nízký odvod tepla, ale mikrostruktura a způsob výroby DED oceli.

Při svařování metodou 521 byly všechny 3 svary zhotoveny při stejných parametrech. Spoj válcované oceli byl natavený v celém rozsahu, obsahoval však póry; DED a přechodový spoj však obsahoval studené spoje (nenatavení základního materiálu) mezi housenkami. To svědčí o odlišném chování materiálů DED a válcované oceli při kontaktu s laserovým paprskem. Možným vysvětlením je pravděpodobně rozdílná tepelná vodivost, jelikož ocel vyrobená technologií DED má zhruba 4x větší zrno, tudíž bude rychleji odvádět teplo, což bude mít vliv na hloubku průvaru. Tato teorie bude v rámci práce na projektu CANUT-II dále zkoumána.

Rozdíl mezi tvářenou a aditivně vyrobenou ocelí byl očividný též u svařování metodou 521 Cold wire. Při svaření kořene vykazovaly oba materiály podobné vlastnosti a v obou případech byl kořen dostatečně provařen. Při svařování výplňové vrstvy ovšem při stejných parametrech výkonu, rychlosti a podávání drátu došlo u Cold wire k neúplnému vyplnění úkosu a bylo nutné přidat další dvě výplňové vrstvy; místo jedné výplňové vrstvy tak pro DED ocel bylo nutné použít tři.

U metody 521 Cold wire byl u válcované oceli patrný rozstřík na straně kořene, zatímco u DED oceli se rozstřík nevyskytoval. V rešeršní části je na tento jev odkázáno citací článku [21]; kdy se při laserovém svařování vyskytoval rozstřík u válcované oceli, zatímco u aditivně vyrobené oceli metodou PBF se rozstřík nevyskytoval. To ukazuje na podobnosti mezi metodami DED a PBF a zároveň i na to, že je válcovaná ocel při laserovém svařování náchylnější ke vzniku rozstříku, což opět značí rozdílné vlastnosti ocelí při svařování laserem. Detail rozstříku je na obrázku níže.

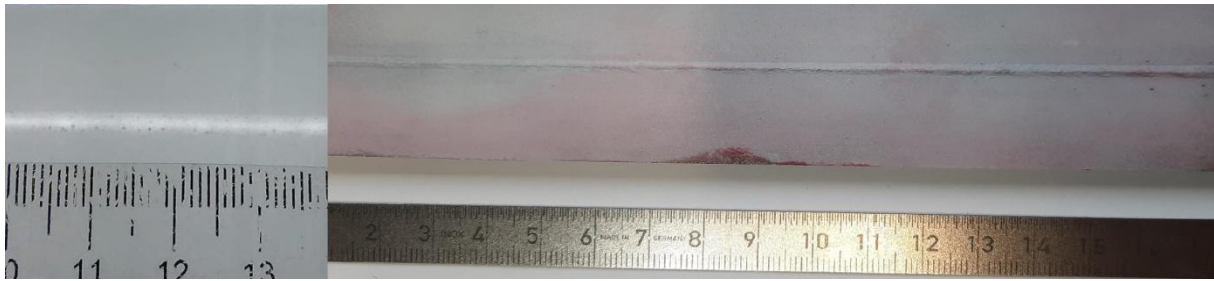


Obr. 83: Detail rozstříku válcované oceli; metoda 521 Cold wire

Rentgenové zkoušení vzorků přineslo nejzajímavější výsledky u laserového svařování bez přídavného drátu. U válcované oceli bylo na snímku pozorováno velké množství pórů, které byly patrné po celé délce svaru. Póry se ve svaru nacházely jak přímo uprostřed tavné lázně, tak na hranici ztavení. U svaru DED oceli metodou 521 se nenacházel žádný pór, ovšem u přechodového svaru mezi válcovanou a DED ocelí se póry opět nacházely, ale již pouze lokálně a v malém množství. Tento poznatek dobře koreluje s výše zmíněným rozstříkem, který se nacházel pouze u válcované oceli.

Při hodnocení rentgenových snímků metody 521 Cold wire již póry nebyly nalezeny. Na snímku přechodového spoje je patrná lineární indikace uprostřed tavné lázně. Předpoklad, že se jedná o nenatavený úkos (neprotavený kořen) byl potvrzen vizuální zkouškou i hodnocením makrostruktury.

Dále bylo provedeno hodnocení makrostruktury pro určení kvality provedení svarových spojů. Svary provedené metodou TIG nevykazovaly žádné imperfekce; nevyskytovaly se zde póry ani studené spoje. Pro metodu 521 (laser) byl bez vad pouze vzorek válcované oceli. U DED a přechodového spoje bylo patrné nenatavení základního materiálu mezi housenkami o šířce přibližně 0,5 mm. Tak výrazný rozdíl mezi kvalitou svarů je zarážející, neboť pro všechny tři vzorky byly použity totožné parametry svařování, tedy výkon 4 kW a rychlost svařování 0,7 m/min (viz přílohy). To poukazuje na odlišné vlastnosti při svařování válcované a aditivně vyrobené oceli. Válcovanou ocel se tedy laserem bez přídavného materiálu podařilo dostatečně protavit, ovšem svar byl mimořádně pórovitý, viz rentgenové snímky. Zajímavý je též fakt, že přestože obsahoval svar válcované oceli značné množství pórů, žádný z nich nebyl detekován vizuální ani kapilární zkouškou, tudíž byly všechny póry pod povrchem. Pro porovnání je na obrázku níže porovnání rentgenového snímku zachycujícího pórovitý svar ve srovnání s vyhovující kapilární zkouškou.



Obr. 84: Porovnání rentgenového snímku a kapilární zkoušky

Při hodnocení austenitické mikrostruktury vykazovaly všechny vzorky DED o poznání hrubší dendritickou strukturu s kolumnárními zrny, která byla orientována směrem do osy svaru, tedy proti směru odvodu tepla. Tento trend je nejvýraznější u přechodových svarů, kde je skokový přechod mezi mikrostrukturou válcované a DED oceli. Dále je u všech metod svařování pro DED ocel zajímavá hranice ztavení, kde se na přechodu mezi základním materiálem a svarovým kovem prakticky nevyskytují jemná rovnoosá zrna, tak jak je tomu u válcovaného materiálu a jak je to u svarů běžné, ale přímo z hranice základního materiálu vyrůstají dlouhá kolumnární zrna, z nichž některá jsou prokazatelně dlouhá i více než 0,5 mm. Tento rozdíl mezi mikrostrukturami je pravděpodobně způsoben odlišnou velikostí zrna základního materiálu, kdy je na hranici ztavení jemnější struktura válcované oceli a v důsledku toho vyšší množství nukleačních zárodků, než u hrubozrnné DED oceli.

Průměrná tvrdost základních materiálů byla velmi podobná (167 HV1 válcovaná, 164 HV1 DED). Průběh tvrdostí byl u tří vzorků podobný; maximální tvrdost byla naměřena na hranicích ztavení, případně uprostřed svarové housenky. U austenitických ocelí se běžně neměří průběh tvrdosti, jelikož zde nevznikají základní struktury. Naměřené křivky průběhu mikrotvrdosti jsou typické pro svarové spoje a nevymykají se standardním průběhům mikrotvrdosti.

Nejlépeších výsledků statické tahové zkoušky dosáhla metoda 141 (TIG). Nejvyšší průměrnou mez pevnosti měl válcovaný spoj (583 MPa), druhý byl přechodový spoj (580 MPa) a třetí DED (575 MPa); jedná se tedy o velmi podobné, téměř stejné hodnoty. Ve všech případech s výjimkou jediného vzorku válcovaného spoje došlo k přetržení v základním

materiálu, což je pro technickou praxi skvělý výsledek. Nejvyšší tažnost měly válcované spoje a nejnižší DED.

Nejnižší naměřená hodnota pevnosti v tahu pro metodu 521 byla 135,9 MPa pro přechodový spoj, ovšem jak ukázalo pozorování lomu na makro lupě. Tento vzorek byl odebrán z nenatavené kořenové partie, a proto je nevypovídající a nebyl uvažován. Nejvyšší průměrná pevnost v tahu (523 MPa) byla pro válcovaný materiál, a to i přes to, že byl svar v celém objemu značně pórovitý. Přechodový spoj dosáhl průměrné pevnosti 514 MPa, i když také obsahoval póry. Průměrná pevnost svaru DED oceli byla 456 MPa, a to i přesto, že svar neobsahoval žádné póry a vzorky pro tahovou zkoušku byly odebrány mimo oblast neprůvaru mezi housenkami. Zajímavé resumé je tedy to, že DED materiál svařený metodou 521 vykazuje horší mechanické vlastnosti, než přechodový spoj DED-válcovaný. Dále DED spoj vykazoval nejnižší tažnost (22,9 %) v porovnání s válcovaným (35,6 %) a přechodovým (38,1 %). U všech této metody došlo k přetržení v oblasti svaru, nebo na hranici ztavení.

Tab. 18: Porovnání tahových zkoušek všech vzorků

Metoda svařování	Typ svarového spoje	Mez pevnosti Rm [MPa]		Smluvní mez kluzu Rp0,2 [MPa]		Tažnost A [%]	
		Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
141	Válcovaný	583	28,9	312	17,9	47,9	4,2
	DED	575	1,8	347	59,4	33,3	2,4
	Přechodový	580	2,4	307	6,4	34,7	4,1
521	Válcovaný	523	45,7	281	13,9	35,6	10,3
	DED	456	83,9	317	19,7	22,9	18,4
	Přechodový	514	76,8	299	37,7	38,1	13,6
521 Cold wire	Válcovaný	577	33,8	279	33,8	59,4	16,9
	DED	554	7,9	307	13,9	43,9	2,1
	Přechodový	558	22,9	289	15,1	36,4	7,2

Další směrodatné výsledky statické tahové zkoušky přineslo hodnocení metody 521 Cold wire, kde byl svar válcované oceli proveden bez imperfekcí (na rozdíl od pórovitosti u metody 521), a tím může sloužit k lepšímu porovnání s ostatními metodami. Nejvyšších pevností (599 – 620 MPa) dosahovaly vzorky A – C, které byly odebrány z části svaru, kde byl použit přídatný drát. Vzorky D – F měly pevnost v rozmezí 536 – 552 MPa; stejně tak byly vyšší i meze kluzu. Dá se tedy usoudit, že použitím přídatného drátu dochází ke zlepšení pevnostních vlastností svarového spoje.

Při sumarizaci výsledků statických tahových zkoušek vychází tedy jako nejlepší metoda 141 pro všechny typy svarů. Nejnižších hodnot bylo dosaženo u DED spoje metodou 521. Vysvětlením může být to, že u metod 141 a 521 Cold wire dochází k většímu promíšení základního materiálu a přídatného drátu, kdežto u metody 521, tedy bez přídatného drátu vzniká velmi hrubá dendritická struktura, která má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti.

Pro všechny technologie svařování měly DED spoje nejvyšší smluvní mez kluzu. Vysvětlením by mohlo být to, aditivně vyrobená DED ocel obsahovala více legujících prvků, které substitučně zpevnily austenitickou mikrostrukturu (Cr, Ni, Mo, Mn), čímž zvýšily mez kluzu.

Snímky mikrostruktury i snímky lomů pořízených na SEM odpovídají poznatkům z literatury [20] uvedené v rešeršní části. V austenitické mikrostrukturu jsou viditelná místa, která pravděpodobně obsahovala oxidy, jež byly vyleptány lučavkou královskou. Ve struktuře svarového kovu, který byl tvořen přídatným drátem je mezi zrny austenitu delta ferit a sigma

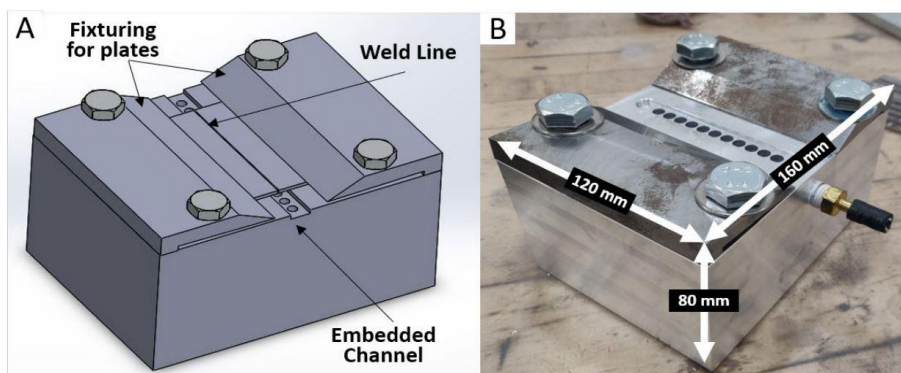
fáze. Struktura lomu byla stejná jako v literatuře [20] pro horizontální směr tisku, což odpovídá tomuto experimentu.

Pozorování lomů vzorků svařených metodou 521 ukázalo, že u všech vzorků došlo k lomu ve svarovém kovu (kromě vzorku F přechodového spoje, kde došlo k lomu na hranici ztavení), což není pro případné aplikování v praxi ideální. U válcovaného materiálu došlo k lomu ve svaru, jelikož obsahoval značné množství pórů, ovšem svary DED oceli byl zcela bez imperfekcí, a přesto došlo k lomům ve svaru u všech vzorků. U všech pozorovaných vzorků byl pozorován tvárný lom.

Pórovitost u válcované oceli při metodě 521 mohla vzniknout v důsledku nedostatečné ochrany tavné lázně. Dalším vysvětlením je použití nevhodných parametrů svařování, zejména výkonu, rychlosti a fokusace ohniska, kdy se bubliny plynů a vznikajícího plazmatu nestíhaly dostat na povrch svarové lázně a kvůli příliš rychlému tuhnutí taveniny zůstaly ve svaru jako póry. Tento nedostatek by se při dalším rozšiřování experimentu dal odstranit lepším nastavením procesních parametrů, především polohou fokusace paprsku. V tomto případě bylo ohnisko umístěno na povrch plechu; pro lepší výsledek by bylo vhodné vyzkoušet fokusaci mírně nad povrch, viz článek [39] citovaný v rešeršní části.

Ohybové zkoušky byly provedeny z důvodu nedostatku materiálu pouze pro válcovaný a DED spoj metody 141. Výsledky byly vyhovující; všechny vzorky byly ohnuty bez jakýchkoliv známek iniciace trhlin. Při rozšíření experimentu by bylo na místě provést tuto zkoušku i pro ostatní metody svařování.

Pro zlepšení procesu při pokračování v experimentu by bylo vhodné vytvořit svařovací přípravek, který by zajistil rovnoměrné a dostatečné formování kořene, a zároveň by fungoval jako upínka, především při svařování obloukovou metodou, kde docházelo k největším deformacím, a musely být při svařování použity fixační plechy. Při svařování metodou Cold wire nebyl použit ze strany kořene formovací plyn, což není pro další použití vhodné. Příklad zamýšleného svařovacího přípravku převzatého z literatury [22] je na obrázku níže.



Obr. 85: Svařovací přípravek; převzato z literatury [22]

9 Závěr

V diplomové práci bylo provedeno svařování válcované a Direct Energy Deposition aditivně vyrobené austenitické oceli 316L obloukovou metodou TIG (141), laserovým paprskem bez přídavného drátu (521) a laserovým paprskem s přídavným drátem (521 Cold wire). U každé metody byly vytvořeny tři svarové spoje pro všechny kombinace materiálů (válcovaný – válcovaný, DED – DED, přechodový spoj: válcovaný – DED).

Na všech vzorcích byly provedeny NDT zkoušky – vizuální, kapilární a radiografická. Bylo provedeno makroskopické a mikroskopické hodnocení svarů na optickém mikroskopu a pro přechodový spoj metody TIG bylo provedeno pozorování na řádkovacím elektronovém mikroskopu (SEM). Dále byla provedena měření průběhu mikrotvrdosti, statické zkoušky tahem s následným hodnocením lomových ploch a pozorování na SEM. Vzorky svařené metodou TIG byly podrobeny ohybové zkoušce.

Bylo prokázáno odlišné chování ocelí při svařování obloukovou i laserovými metodami. U technologie TIG docházelo k protékání výplňových vrstev svaru skrz kořen. Musela být proto ze strany kořene vybroušena drážka a vytvořena kořenová protivrstva. U technologie 521 nedošlo u DED ani u přechodového spoje k dostatečnému natavení základního materiálu, přestože byly použity stejné parametry svařování jako pro válcovanou ocel, u které byl materiál nataven v celém průřezu. Pro 521 Cold wire byly pro vytvoření DED spoje potřeba 4 housenky, zatímco u válcovaného spoje stačily při stejných parametrech jen 2 housenky. Další práce v rámci projektu CANUT-II by se měla věnovat rozdílům fyzikálních vlastností, aby bylo možné lépe pochopit interakci oceli s laserovým paprskem a následně odladit proces laserového svařování. Dále se nabízí provést zkoušky korozní odolnosti svarů připravených různými technologiemi.

Tahové zkoušky zmenšených vzorků pro metodu 521 ukázaly nejvyšší pevnost i tažnost u válcované oceli, a to i přes to, že svar obsahoval značné množství pórů. U každého z osmnácti vzorků metody 521 došlo k přetržení v oblasti svarového kovu. Metoda 521 Cold wire dosáhla ve všech případech lepších průměrných mechanických hodnot, než 521. To ukazuje, že použití přídavného drátu zlepšuje mechanické vlastnosti svarového spoje.

Nejlépších výsledků bylo dosaženo metodou TIG, kdy při tahových zkouškách došlo až na jedinou výjimku ve všech případech k přetržení vzorku v základním materiálu. Svary aditivní oceli měly téměř stejnou mez pevnosti a vyšší mez kluzu, než vzorky válcované.

Závěrem lze konstatovat, že ocel 316L vyrobená aditivní metodou DED je dobře svařitelná obloukovou metodou TIG s podmínkou věnování zvýšené pozornosti protékání materiálu skrz kořen a případným použitím kořenové protivrstvy. Při svařování laserovým paprskem bez přídavného drátu dochází především u přechodového spoje ke vzniku značně rozdílné mikrostruktury; na straně DED oceli byla velmi hrubá dendritická struktura s dlouhými kolumnárními zrny, což negativně působí na svar. Při použití přídavného drátu dochází k lepšímu promíšení svarové lázně a tím ke zlepšení vlastností. Na základě těchto skutečností vychází metoda TIG jako nejlepší pro svařování oceli 316L vyrobené aditivní metodou Direct Energy Deposition.

Cíle práce byly splněny.

Seznam použitých zdrojů

- [1] PILOUS, Václav a STRÁNSKÝ, Karel. Strukturální stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství. Studie ČSAV. Praha: Academia, 1989. ISBN 80-200-0007-0
- [2] DUCHÁČEK, Petr. Materiálové vlastnosti heterogenních svarových spojů pro energetiku. 2021. Disertační práce. ČVUT.
- [3] DUCHÁČEK, Petr; PALÁN, Marek a ČANČURA, Zdeněk. Heterogenní svarové spoje parních generátorů je typu VVER 1000 MW zhotovené přídatným svařovacím materiálem typu Sv-10CH16N25AM6. In: . Západočeská univerzita v Plzni, 2017. ISBN 978-80-261-0741-5.
- [4] FOLDYNA, Václav. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Svařování. Ostrava: Zeross, 1999. ISBN 80-85771-63-2
- [5] MARTINEC, Jiří; ŠVEIDLER, Zdeněk a JANOVEC, Jiří. Korozivzdorné materiály – základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost. Online. KONSTRUKCE. 2014. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>. [cit. 2024-05-14].
- [6] *Svařování konstrukcí z korozivzdorných ocelí ve shodě s ČSN EN 1011-3*. Online. PILOUS, Václav. Konstrukce. 2012. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/svarovani-konstrukci-z-korozivzdornych-oceli-ve-shode-s-csn-en-1011-3/>. [cit. 2023-11-28].
- [7] A HOSSEINI, Vahid. Super Duplex Stainless Steels – Microstructure and Properties of Physically Simulated Base and Weld Metal. Online. University West, 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/327552719_Super_Duplex_Stainless_Steels_-_Microstructure_and_Properties_of_Physically_Simulated_Base_and_Weld_Metal. [cit. 2024-05-16].
- [8] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 10088-2, Korozivzdorné oceli - Část 2: Technické dodací podmínky pro plechy a pásy z ocelí odolných korozi pro obecné použití. 2015
- [9] MORAVEC, Jaromír. Nerezavějící a žáruvzdorné oceli. Online. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=442796>. [cit. 2023-11-16].
- [10] KOU, Sindo. Welding metallurgy. 2nd edition. 2003. ISBN 0-471-43491-4.
- [11] SUN, Z. a ION, J. C. Laser welding of dissimilar metal combinations. Online. Journal of Materials Science. 1995, roč. 30, č. 17, s. 4205-4214. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF00361499>. [cit. 2023-11-21].
- [12] YASA, Evren. Selective laser melting. Online. In: Additive Manufacturing. Elsevier, 2021, s. 77-120. ISBN 9780128184110. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00017-3>. [cit. 2023-11-18].
- [13] Direct Metal Laser Melting. Online. GE Additive. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/direct-metal-laser-melting>. [cit. 2023-11-18].
- [14] ŠPLÍCHAL, Jan. 3D tisk kovových materiálů. Online. Technický týdeník. 2020. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/poutaky/3d-tisk-kovovych-materialu_50018.html. [cit. 2023-11-18].
- [15] MOKHTARI, Morgane; POMMIER, Pierrick; BALCAEN, Yannick a ALEXIS, Joel. Laser Welding of AISI 316L Stainless Steel Produced by Additive Manufacturing or by Conventional Processes. Online. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2021,

roč. 5, č. 4. ISSN 2504-4494. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040136>. [cit. 2023-11-14].

[16] CAIAZZO, Fabrizia a ALFIERI, Vittorio. Optimization of laser beam welding of steel parts made by additive manufacturing. Online. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, roč. 114, č. 9-10, s. 3123-3136. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07039-w>. [cit. 2023-11-17].

[17] TRUMPF. Laserové práškové navařování (Laser Metal Deposition). Online. Trumpf. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/aplikace/aditivni-vyroba/laserove-praskove-navarovani/. [cit. 2024-01-28].

[18] MAZZUCATO, Federico; AVERSA, Alberta; DOGLIONE, Roberto; BIAMINO, Sara; VALENTE, Anna et al. Influence of Process Parameters and Deposition Strategy on Laser Metal Deposition of 316L Powder. Online. Metals. 2019, roč. 9, č. 11. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met9111160>. [cit. 2024-01-28].

[19] SELEMA, Ahmed; IBRAHIM, Mohamed N. a SERGEANT, Peter. Metal Additive Manufacturing for Electrical Machines: Technology Review and Latest Advancements. Online. Energies. 2022, roč. 15, č. 3. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en15031076>. [cit. 2024-05-16].

[20] SABOORI, Abdollah; AVERSA, Alberta; MARCHESE, Giulio; BIAMINO, Sara; LOMBARDI, Mariangela et al. Microstructure and Mechanical Properties of AISI 316L Produced by Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing: A Review. Online. Applied Sciences. 2020, roč. 10, č. 9. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app10093310>. [cit. 2024-05-16].

[21] MATILAINEN, Ville-Pekka; PEKKARINEN, Joonas a SALMINEN, Antti. Weldability of Additive Manufactured Stainless Steel. Online. Physics Procedia. 2016, roč. 83, s. 808-817. ISSN 18753892. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.083>. [cit. 2023-11-18].

[22] SAMPATH, Venkata Krishnan; SILORI, Praveen; PARADKAR, Parth; NIAUZORAU, Stanislaw; SHARSTNIOU, Aliaksandr et al. 3d printing of stainless steel 316L and its weldability for corrosive environments. Online. Materials Science and Engineering: A. 2022, roč. 833. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142439>. [cit. 2024-04-29].

[23] BRAUN, Moritz; SCHUBNELL, Jan; SARMAST, Ardeshir; SUBRAMANIAN, Harihara; REISSIG, Lutz et al. Mechanical behavior of additively and conventionally manufactured 316L stainless steel plates joined by gas metal arc welding. Online. Journal of Materials Research and Technology. 2023, roč. 24, s. 1692-1705. ISSN 22387854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.080>. [cit. 2024-04-29].

[24] HUYSMANS, S.; PEETERS, E.; DE BRUYCKER, E. a DE PRINS, K. Weldability study of additive manufactured 316L austenitic stainless steel components—welding of AM with conventional 316L components. Online. Welding in the World. 2021, roč. 65, č. 7, s. 1415-1427. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01098-z>. [cit. 2024-04-30].

[25] Vliv teplotního režimu svařování na vlastnosti svarových spojů - I. Online. In: OCHODEK, Vladislav. VŠB TU OSTRAVA. 2011. Dostupné z: https://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/seminare/vliv_tepl_rezimu_a1.pdf. [cit. 2024-03-24].

[26] KATAYAMA, Seiji. Fundamentals and Details of Laser Welding. Online. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2020. ISBN

978-981-15-7932-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-7933-2>. [cit. 2023-11-21].

[27] KATAYAMA, Seiji (ed.). *Handbook of laser welding technologies*. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. ISBN 978-0-85709-877-1.

[28] SUN, Z. a ION, J. C. Laser welding of dissimilar metal combinations. Online. *Journal of Materials Science*. 1995, roč. 30, č. 17, s. 4205-4214. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF00361499>. [cit. 2023-11-21].

[29] DULEY, Walter W. *Laser Welding*. 1998. ISBN 0-471-24679-4.

[30] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II Část svařování*. Online. VUT Brno, 2018. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_II_opora_svarovani_2018_II_kubicek.pdf. [cit. 2023-12-02].

[31] TAYEBI, Morteza; MOHAMMAD SOLTANI, Hedayat a RAJAEI, Ali. Laser Welding. Online. In: OMAR COOKE, Kavian a CÂMARA COZZA, Ronaldo (ed.). *Engineering Principles - Welding and Residual Stresses*. IntechOpen, 2022. ISBN 978-1-80355-384-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.102456>. [cit. 2023-11-21].

[32] Laser Peening for Many Industries. LSP Technologies [online]. [cit. 2023-11-21]. Dostupné z: <https://www.lsptechnologies.com/laser-peening-applications>

[33] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 1011-6, Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 6: Laserové svařování. 2020.

[34] KARHU, Miikka; KUJANPÄÄ, Veli; ESKELINEN, Harri a SALMINEN, Antti. Filler Metal Mixing Behaviour of 10 mm Thick Stainless Steel Butt-Joint Welds Produced with Laser-Arc Hybrid and Laser Cold-Wire Processes. Online. *Applied Sciences*. 2019, roč. 9, č. 8. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app9081685>. [cit. 2023-11-30].

[35] SALMINEN, Antti S.; MIYAMOTO, Isamu; KOBAYASHI, Kojiro F.; SUGIOKA, Koji; POPRAWA, Reinhart et al. Effects of filler wire feed on the efficiency of laser welding. Online. In: . 263-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.497889>. [cit. 2023-10-02].

[36] KONG, Fanrong; LIU, Wei; MA, Junjie; LEVERT, Ernest a KOVACEVIC, Radovan. Feasibility study of laser welding assisted by filler wire for narrow-gap butt-jointed plates of high-strength steel. Online. *Welding in the World*. 2013, roč. 57, č. 5, s. 693-699. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0068-9>. [cit. 2023-10-02].

[37] KAŠPAR, Jan a NĚMEČEK, Stanislav. Laserové svařování - posouzení vlivu ochranného plynu. Online. *Mmspektrum*. 2014. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu>. [cit. 2023-12-08].

[38] YANG, Tao; LIU, Junfeng; ZHUANG, Yuan; SUN, Kai a CHEN, Weilin. Studies on the formation mechanism of incomplete fusion defects in ultra-narrow gap laser wire filling welding. Online. *Optics & Laser Technology*. 2020, roč. 129. ISSN 00303992. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106275>. [cit. 2023-12-04].

[39] KARHU, Miikka a KUJANPÄÄ, Veli. Defocusing Techniques for Multi-pass Laser Welding of Austenitic Stainless Steel. Online. *Physics Procedia*. 2015, roč. 78, s. 53-64. ISSN 18753892. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.017>. [cit. 2023-12-06].

- [40] BRÁZDA, Michal. Depozice desky 35x250x250 mm z AISI 316L. COMTES FHT, 2023.
- [41] JECH, Jaroslav. Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [42] TNI CEN ISO/TR 15608, Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin. 2008.
- [43] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 15614-1, Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu. 2018.
- [44] ESAB. OK Tigrod 316L. Online. Dostupné z: https://esab.com/cz/eur_cs/products-solutions/product/filler-metals/stainless-steel/mig-wires-tig-rods-gmaw-gtaw/ok-tigrod-316l/ [cit. 2024-12-03].
- [45] MEETOPTICS. TruDisk 4006. Online. Dostupné z: <https://www.meetoptics.com/light-sources/lasers-and-coherent-systems/gain-media/optically-pumped-solid-state-lasers/diode-pumped-thin-disk-laser/s/trumpf/p/TruDisk%204006>. [cit. 2024-03-10].
- [46] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 15614-11, Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 11: Elektronové a laserové svařování. 2003.
- [47] HUČEK, František. Laserové svařování studeným drátem HSS plechů s větší tloušťkou stěny. Diplomová práce. Plzeň: ZČU v Plzni, 2023.
- [48] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 17637, Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů. 2018.
- [49] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 13919-1, Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním - Požadavky a doporučení pro určování stupňů jakosti - Část 1: Ocel, nikl, titan a jejich slitiny. 2021.
- [50] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 5817, Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Stupně kvality pro vady. 2023
- [51] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 3452-1, Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení kapilární metodou - Část 1: Obecné zásady. 2021.
- [52] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 23277, Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení kapilární metodou - Stupně přípustnosti. 2016.
- [53] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 17636-1, Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení - Část 1: Metody rentgenového a gama záření využívající film. 2023.
- [54] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 643, Ocel - Mikrografické stanovení zdánlivé velikosti zrn. 2021.

- [55] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 6892-1, Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. 2021.
- [56] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 5173, Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky ohybem. 2023.
- [57] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 4063, Svařování, pájení na tvrdo, pájení na měkko a řezání - Přehled metod a jejich číslování. 2023.
- [58] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 6520-1, Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování. 2008.
- [59] KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery (2) - svařovací lasery. Online. MM Průmyslové spektrum. 2012. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery>. [cit. 2024-05-21].
- [60] ŁAWRYNOWICZ, Zdzisław; KAŁACZYŃSKI, T. a ŻÓŁTOWSKI, M. Diagnostics of the effect of prior cold deformation and aging time on intergranular corrosion resistance in case of austenitic stainless steel. Online. MATEC Web of Conferences. 2018, roč. 182. ISSN 2261-236X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818201011>. [cit. 2024-05-16].

Přílohy