



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PROBLEMATIKA SVAŘITELNOSTI DUPLEXNÍCH LOPATEK MÍCHADLA

WELDABILITY PROBLEMS OF DUPLEX MIXER BLADES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Bryksí

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Petr Bryksí**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Marian Sigmund, Ph.D., IWE**
Akademický rok: 2021/22

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

Problematika svažitelnosti duplexních lopatek míchadla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Duplexní materiály jsou používány v průmyslu hlavně kvůli jejím dobrým mechanickým vlastnostem se zachování vysoké korozivzdornosti. Při svařování těchto duplexních korozivzdorných ocelí je třeba zohlednit mnoho popsaných proměnných. Jak konstrukčních například zohlednění možnosti únavových lomů – lomové mechaniky už při návrhu svarového spoje. A následně při přípravě svařovací dokumentace zohlednit vhodnou technologii svařování a požadavky na kvalitu svarového spoje. Cílem práce je popsat vhodné technologie svařování duplexních materiálů, konkrétně lopatek míchadla. Jelikož při reálném provozu došlo k opakovaně k lomu těchto duplexních lopatek. Případné poznatky volby vhodné technologie a parametrů svařování zohlednit do výpočtu a konstrukce lopatek s ohledem na lomovou mechaniku.

Cíle diplomové práce:

Zhodnotit minulý a současný stav svařování lopatek míchadel ve firmě.

Vypracovat literární rešerši o svažitelnosti a vhodných technologiích ručního svařování duplexních materiálů.

Popsat a vyhodnotit možné nebezpečí s ohledem na lomovou mechaniku duplexních lopatek.

Vyhodnotit experiment s doporučením pro konstrukční i technologické úpravy lopatek.

Seznam doporučené literatury:

PILOUS, Václav. Materiály a jejich chování při svařování, 1 vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2001.

MAJER, Lubomír. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-70-5.

FOLDYNA, Václav. Materiály a jejich svažitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

MOHYLA, Miroslav. Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1992. ISBN 80-7078-138-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzou příčin lomu lopatek axiálního míchadla z duplexního materiálu 1.4462 pro sádrovcovou suspenzi v Elektrárně Ledvice. Teoretická část se zabývá problematikou svařování duplexních ocelí. Praktická část práce pak obsahuje postup od přípravy vzorku pro metalografické, fraktografické pozorování, chemické složení a zkoušku tvrdosti. Pro náš experiment byly z dodaných lopatek vyříznuté oblasti v místě lomu, na kterých pak byla provedena měření. Následně pak vyhodnocení naměřených dat v místě lomu lopatek a oblasti svarového spoje. Na základě analýzy bylo vytvořeno technologické a konstrukční doporučení pro další výrobu lopatek.

Klíčová slova

Duplexní oceli, svařování duplexních ocelí, ruční svařování, nedestruktivní zkoušky svarů, lomová mechanika.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the analysis of the causes of fracture of axial stirrer blades made of duplex material 1.4462 for gypsum suspension in Ledvice Power Plant. The theoretical part deals with the problem of welding of duplex steels. The practical part of the work includes the procedure from the preparation of the sample for metallographic, fractographic observation, chemical composition and hardness test. For our experiment, areas at the fracture point were cut out from the supplied blades and then measurements were made on them. Subsequently, we then evaluated the measured data at the fracture site of the blades and the weld joint area. Based on the analysis, technological and design recommendations for further blade production were made.

Key words

Duplex steels, welding of duplex steels, manual welding, non-destructive testing of welds, fracture mechanics.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BRYKSÍ, Petr. Problematika svařitelnosti duplexních lopatek míchadla [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139673>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marian Sigmund.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Problematika svařitelnosti duplexních lopatek míchadla vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně, 20.5.2022

místo, datum

Bc. Petr Bryksí

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Mariánu Sigmundovi, Ph.D., IWE a Ing. Jiřímu Mazochovi za cenné připomínky, ochotu a rady, které mi poskytli při vypracování diplomové práce a dále panu prof. Ing. Rudolfovi Foretovi, Csc. a paní Ing. Drahomíře Janové za pomoc při vyhodnocování příčin lomu na naměřených vzorcích. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým přátelům během studia.

.

OBSAH

ÚVOD	7
1 ROZBOR ZADÁNÍ	8
1.1 Společnost Techmix	9
2 Problematika svařitelnosti duplexních materiálů	10
2.1 Svařitelnost duplexních materiálů	11
2.1.1 Diagram WRC – 1992.....	14
2.1.2 Volba přídavného materiálu.....	15
2.2 Metoda ručního svařování 141 (GTAW/WIG).....	16
2.3 Metoda ručního svařování 131 (MIG).....	19
2.4 Vady ve svarech a jejich nedestruktivní zkoušky	20
2.4.1 Vizuální kontrola svarů	22
2.4.2 Penetrační (kapilární) kontrola svarů	23
2.4.3 Příprava a analýza vzorků mokrou cestou	25
2.4.4 Příprava a analýza vzorků pro metalografické zkoušky	26
2.5 Měření chemického složení materiálů (EDS)	27
2.6 Nebezpečí napětí a deformace svarů	29
2.6.1 Křehký lom	31
2.6.2 Únavový lom.....	32
2.7 Zkouška tvrdosti dle normy ČSN EN ISO 6507-1	33
3 Analýza a řešení prasknutí lopatky míchadla	35
3.1 Příprava vzorků z první lopatky.....	37
3.2 Vyhodnocení experimentální metoda pro první lopatku	38
3.2.1 Zhodnocení lomu první lopatky	44
3.3 Příprava vzorků z druhé lopatky	45
3.4 Vyhodnocení experimentální části pro druhou lopatku	46
3.4.1 Zhodnocení lomu druhé lopatky.....	50
3.5 Výpočet svařitelnosti	51
3.6 Shrnutí analýzy lomu a doporučení pro výrobu lopatek	54
ZÁVĚR	56
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	57
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	60
SEZNAM PŘÍLOH	61

ÚVOD

S rychlostí pokroku ve strojírenství, roste po celém světě i množství materiálů a technologií pro jejich spojování, které se ve strojírenství používají. Jednou z velice používaných metod pro vytvoření nerozebíratelného a pevného spojení je svařování. V průběhu let se inovují metody svařování a hledá se nejvhodnější použitelná metoda pro různé druhy svařovaných materiálů, přičemž pro každý druh svarového spoje bude vhodnější jiná metoda.

Do místa a okolí, kde dochází k samotnému svaru je vnášeno velké množství tepla, které vzniká při hoření oblouku mezi základním materiálem a koncem elektrody. Množství vneseného tepla výrazně ovlivňuje strukturu a kvalitu svaru. Příliš velké množství tepla způsobuje například zhrubnutí zrna a snížení houževnatosti svaru. Naopak malé množství tepla vede k neprovaření svarů vzniku trhlin a bublin.

V posledních letech si získal velikou popularitu materiál s dvoufázovou strukturou, a to austeniticko-feritickou (duplexní materiál). Jeho výrobou se zabývá mnoho výrobců ocelí. Myšlenka vytvoření produktu se poprvé objevila na začátku minulého století. Díky vysokému stupni pevnosti, který umožňuje snížit hmotnost vyráběných výrobků (vhodné pro tlakové nádoby, ocelové nádrže), tak odolnosti vůči korozním procesům, zejména praskání, se materiál používá v těžkých průmyslových provozech jako je například energetický průmysl.

Energetický průmysl zabývající se výrobou tepelné energie je jednou z nejvíce se podílenou výrobou energie, dodávanou v ČR našim spotřebitelům. Jedná se o energetiku, která vyrábí z celkové výroby okolo 67,3 % veškeré elektrické energie u nás. Téměř jako žádná technologie výroby energie, není ani tento způsob bezodpadový. Odpad (spaliny) vzniklý při výrobě tepelné energie, které se dostávají do absorbérů s teplotou okolo 150 °C se musí ochlazovat za pomoci sprchování vápencovou a sádrovcovou suspenzí a díky tomu vystupují z absorbéru už o teplotě pouze 59 °C. V závislosti na podmínkách jsou vyčištěny spaliny po opuštění absorbéru zavedeny buď do chladicí věže, nebo do komínů a vypouštěny do atmosféry. Spaliny po průchodu absorbérem jsou nasyceny vodní parou, která vznikne odpařením vody obsažené v suspenzi. Suspenze musí být někde skladované, k tomu slouží záložní nádrže, pro jejich přechovávání (obr. 1). [11;30]



Obr. 1 Míchací centrum a zásobní nádrž sádrovcové suspenze [40].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Práce je vypracovávána pro brněnskou společnost Techmix s. r. o. sídlící v Králově Poli. Firma se specializuje na výrobu míchacích zařízení a bioreaktorů do mnoha odvětví, používajících se napříč celou Evropou. Pro výrobu takovýchto zařízení, je zapotřebí dodržovat požadovaných technologických postupů a kritérií, přičemž pro každé odvětví se tato kritéria mohou lišit. Velký důraz na kontrolu, by se pak měl zaměřovat právě na metody svařování a na druh materiálu použitého pro výrobu míchadel. Drtivá většina lopatek se k náboji u míchacích zařízení přivařuje metodou ročního obloukového svařování, a to především metodou TIG, MIG a MAG. Výběr správné metody závisí na různých faktorech. Jelikož jsou lopatky v neustálém kontaktu s míchaným médiem, je dán důraz i na kvalitní materiál lopatek. Vhodně vybrané oceli, pro práci v takovém se jeví korozivzdorné a nerezové oceli. I přes všechna dodržení však může dojít k nepředvídatelnému defektu lopatek v místě svaru, ať už špatným výběrem svařovací metody, špatně provedeným svarem, nebo zatížením svarového spoje. Úkolem technologa je pak v co nejkratší době problém defektu analyzovat a vyřešit. Zdali se jedná o chybu na straně dodavatele, nebo zda zákazník špatným použitím nezavinil poškození sám. Tato komplikace se nevyhnula ani místnímu podniku. U lopatek z duplexní oceli, navržené pro několikaletou práci v těžkém průmyslu, došlo po nečekaně krátké době k lomu v místě svarového spoje.

Jedná se o lopatky z duplexní oceli (1.4462), které jsou upevněné k náboji pomocí tupého svarového spoje (druh svaru 12 ½ V). Míchací zařízení o výkonu 90 kW je používáno k míchání zásobní nádrže sádrovcové suspenze o objemu 2600 m³ v Elektrárně Ledvice. Součásti jsou v tomto případě k sobě svařeny za pomoci ručního svařování metodou 136 (obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu). Pokaždě byly navrhnuté veškeré parametry pro výrobu správně, nemělo by se u takto velké lopatky o délce zhruba 1800 mm a váze 180 kg k takového poškození dosáhnout. Velikost a hmotnost lopatky je natolik velká, že při kontaktu s jakýmkoliv možným médiem vyskytující se v reaktoru by měla ve svoji práci neustále pokračovat bez fatálního důsledku. [40;9;36]



Obr. 2 Lopatky míchacího zařízení v teplárně Ledvice

1.1 Společnost Techmix

Společnost TECHMIX s.r.o. vznikla 1.1.1993 přechodem zaměstnanců z bývalého oddělení Míchacích zařízení a zařízení pro bioprocessy, které bylo organizační složkou někdejšího Výzkumného ústavu chemických zařízení CHEPOS, později VUCHZ a.s. [9]

Společnost je zaměřena zejména na realizaci dodávek míchacích ústrojí, aparátů s míchadly (tlakové, beztlakové) a aerobních bioreaktorů (pro sterilní a nesterilní procesy). Podle technologického hlediska se jedná o dodávky zařízení pro chemické výroby (zásobníky, reaktory), zpracovatelský průmysl (homogenizační nádrže suspenzí a komponent), farmaceutické a kosmetické výroby (homogenizační a dispergační zařízení), potravinářské výroby (zásobní nádrže, kontinuální mísiče), hospodaření a likvidaci odpadů v elektrárnách, teplárnách a jiných provozech (odsiřovací aparáty, míchané zásobníky, pasterizační zařízení) a vodohospodářské zařízení (flokulační komory, in-line mixery, rychlomísiče). [9]

Míchací zařízení jsou rovněž nedílnou součástí linek pro výrobu a skladování různých produktů. Taková zařízení sestávají z [9]:

- míchací nádoby (reaktor, zásobník, nádrže, jímky) různých tvarů a velikostí,
- pohonné jednotky (motor, převodovka, kozlík, ucpávka, ložiska),
- hřídele s míchadlem (jeden nebo více rotorů, patní vodící ložisko apod.),
- vestavby (narážky, topné hady, distributor plynu atd.).

Společnost je vybavena vlastní zkušebnou (obr. 3), díky které je možno ověřit požadavky zákazníků na míchání v širokém rozsahu. Současně zkušebna slouží pro stanovování a ověřování hlavních parametrů původních normalizovaných a nově navrhovaných míchadel. Jedná se zejména o tyto parametry míchadel [9]:

- příkon (v kapalině, suspenzi, v systému kapalina-plyn), čerpací výkon
- tlakové účinky axiálních míchadel (axiální síla)
- rychlost homogenizace
- otáčky pro vzhos pevné fáze nad dnem
- velikost mezifázové plochy bublin plynu v kapalině
- součinitel přestupu tepla při míchání



Obr. 3 Zkušebna společnosti Techmix [9].

2 PROBLEMATIKA SVAŘITELNOSTI DUPLEXNÍCH MATERIÁLŮ

Abychom mohli danou problematiku řešit a navrhnout vhodnou metodu pro spojení, je nutné podrobně znát jak chování duplexního materiálu při svařování, tak možnosti svařování duplexních materiálů. Každá metoda je specifická a je namístě pochopit základní rozdíly každé z metod svařování. Jelikož se práce zabývá ručním svařováním duplexního materiálu, je i důležité seznámit se s tím, co to vlastně duplexní materiál je. Na základě znalosti technologie a úskalích vznikajících při svařování duplexního materiálu lopatek (1.4462), můžeme navrhnout inovaci současného řešení.

Jedná se o nerezový materiál s austeniticko-feritickou strukturou (duplexní) s obsahem legur Cr-Ni, nebo Cr-Ni-Mo. Do této skupiny spadají oceli s mikrostrukturou složenou ze 40 až 70 hm% feritu a zbytek tvořící austenit. Pro poměr 50 % feritu a 50 % austenitu se dosahuje v oceli nízkých hodnot uhlíku $>0,05$ % a obsahem chromu nad 22 %. Ocel označená číslem 1.4462 je nejběžnější duplexní nerezová ocel s vynikající odolností proti korozi. Stejně tak kvalitní jsou mechanické vlastnosti (tab. 1) tohoto materiálu. Ocel má vyšší pevnost než oceli austenitické a vyšší houževnatost než martenzitické oceli. Na rozdíl od jiných nerezových ocelí jsou duplexní materiály imunní vůči koroznímu praskání, tytu schopnost si zachovávají o po svarovém spoji. Stěžením u tohoto typu materiálu je jeho svařitelnost, která je nižší oproti ocelím běžně svařovaným. Svarové spoje mají vzhledem k základnímu materiálu (ZM) sníženou odolnost proti jamkové korozi, která je nejspíše způsobena precipitací nitridů Cr_2N v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a ve svarovém kovu. To však neznamena, že tuto ocel nelze svařovat. Mnoho výrobců svařovacích elektrod je seznámeno s touto problematikou a vyrábí elektrody a svařovací dráty v souladu s požadavky na kvalitní svar. Slitina disponuje vysokým výskytem chromu (tab. 2) v chemickém složení, což má za důsledek vysokou tvrdost materiálu a chemickou odolnost. [1;25;22;28]

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti duplexní oceli 1.4462 [28].

Hustota	Teplotní roztažnost	Modul pružnosti	Tepelná vodivost	Elektrický odpor
7,805 g/cm ³	1,7 x 10 ⁻⁶ K	200 Gpa	19,0 W/ mK	0,085x10 ⁻⁶ Ω .m

Tabulka 2 Chemické složení duplexní oceli 1.4462 dle normy EN 10088-2: 2005 [28].

Chemický prvek	(C)	(Cr)	(Mn)	(Si)	(P)	(S)	(Ni)	(N)	(Mo)
Výskyt [%]	0-0,03	21-23	0-2	0-1	0-0,03	0-0,02	4,5-6,5	0,1-0,22	2,5-3,5

Duplexní oceli můžeme rozdělit na [19]:

- nízkolegované
- středně legované
- vysoce legované

Díky velice dobrým vlastnostem se vysoce legovaná ocel 1.4462 může aplikovat v mnoha oblastech. Oceli jsou mírně magnetické a nelze je zpevnit pomocí tepelného zpracování. Protože duplexní oceli tuhnu jako oceli feritické, nejsou prakticky náchylné na vznik tepelných trhlin. Obvykle se můžeme s ocelí setkat v oblasti použití pro chemické zpracování, rafinérie na ropu a plyn, soupravy v námořních prostředích, skladovací nádrže, vysokotlaké nádrže, kotle atd. Ocel se dodává převážně ve formě kovaných přírub, plechů, trubek a profilů. [1;25;28]

2.1 Svařitelnost duplexních materiálů

Moderní duplexní korozivzdorné oceli lze svařovat tak, aby splnili velmi vysoké konstrukční a technologické požadavky. Ukazuje se, že nesprávně zvolené technologie a postupy svařování mohou vést k selhání součástí. Je tedy zásadní, zvolení správné technologie svaření. Svařitelnost je ovlivněna procentuálním zastoupením feritu a austenitu, kde nám narůstá podíl feritu s rychlostí ochlazování. [32]

Při teplotách nad 1050 °C dochází v pásmu přehřátí TOO k růstu zrna a vylučování feritu z austenitu. Při ochlazování pak naopak austenit transformuje na hranicích feritu. Zvýšený obsah feritu ve svarovém kovu a v TOO nepříznivě ovlivňuje hodnoty vrubové houževnatosti. Proto pro snížení šířky TOO a s ohledem na precipitaci karbidů ve vícevrstvých svarech (závisí rovněž na tom, zda ocel je, nebo není stabilizována) limituje u nízko a středně legovaných duplexních ocelí tepelný příkon při svařování na max. 25 kJ/cm⁻¹ a teplotu interpass max. 250 °C. Čím je rychlost ochlazování větší, tím je i větší množství feritu ve struktuře. Feriticko – austenitické oceli svařujeme obvykle bez předehřevu nebo s teplotou předehřevu max. 100 až 150 °C. Proto s ohledem na rychlost ochlazování limitujeme spodní hranici tepelného příkonu na hodnotu min. 5 kJ.cm⁻¹. Vysokolegované duplexní oceli se svařují s tepelným příkonem mezi 2 kJ.cm⁻¹ až 15 kJ.cm⁻¹ s maximální teplotou interpass v hodnotách viz tabulka 3. [1;22;21;19;20]

Tabulka 3 Doporučené hodnoty tepelného příkonu (Q) a teploty interpass (T_{imax}) [19].

Materiál	Nízkoalegované a duplexní oceli (1.4482)	Duplexní oceli (1.4462)	Super-duplexní oceli (1.4410)
Q [kJ/mm]	0,5-1,5	0,5-2,5	0,2-1,5
T _{imax} [°C]	150	200	150

Během procesu svařování, dochází díky rychlosti změny teplot v okolí svaru ke složitým metalurgickým procesům. Na základně transformačních diagramů jde určit výslednou strukturu kovu po svařovacím procesu. Avšak tyto diagramy neexistují pro veškeré používané materiály. Z toho důvodu se pro některou škálu materiálů vypočítává množství přivedené energie při zachování určité svařovací rychlosti, která zaručuje správnou výslednou strukturu po svaření [19;20]. Vnesené teplo Q_s do svaru, se pak vypočítá dle vztahu [19]:

$$Q_s = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \quad (2.1)$$

kde: η - tepelná účinnost přenosu tepla [-] (Tab. 4)
 U - svařovací napětí [V]
 I - svařovací proud [A]
 v_s - rychlost svařování [mm·s⁻¹]

Tabulka 4 Hodnoty koeficientu účinnosti η pro jednotlivé svařovací technologie [19].

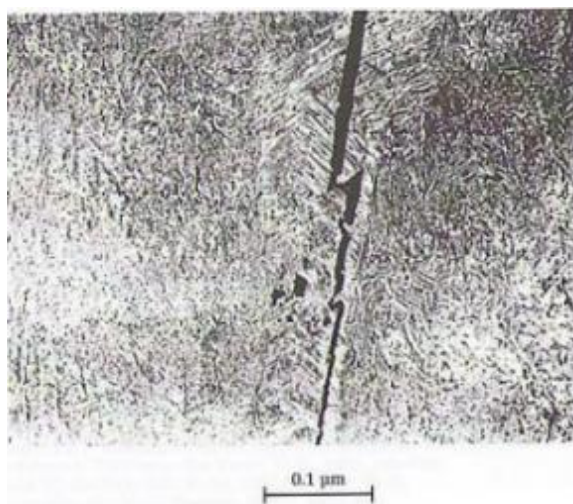
Značení metody	Technologie svařování	η
131	MIG	0,66 – 0,75
135	MAG	0,66 – 0,75
141	TIG	0,48 - 0,65

Při svařování se používají přídavné materiály, které svým chemickým složením odpovídají základnímu materiálu, ale se zvýšeným obsahem Ni. Díky zvýšení obsahu Ni můžeme snížit obsah feritu ve svarovém kovu na hranici odpovídající základnímu materiálu i při velkých rychlostech ochlazování svarového kovu. Přítomnost H a N ve svarovém kovu duplexní oceli může způsobit vznik zpožděných trhlin ve svarových kovech s obsahem feritu >110 FN (75 % feritu) zejména v kombinaci s vysokým stupněm deformace. [22;21;19;20]

Duplexní oceli s obsahem dusíku > 0,2 % jsou při svařování, zejména v poloze nad hlavou náchylnější na vznik pórů. Jejich tvorbu můžeme omezit svařováním s malým objemem tavné lázně a krátkým obloukem. Při svařování technologiemi 141 (GTAW/TIG), 131 (MIG) a 135 (MAG) může dojít ke snížení obsahu dusíku ve svarovém kovu a tím i ke snížení jeho odolnosti proti korozi. Proto se doporučuje použít ochrannou atmosféru s obsahem dusíku, ale s hledem na pórovitost jen pro svařování v kořenových a krycích vrstvách. Oceli s vyšším obsahem Cr, Mo a W jsou náchylnější na precipitaci intermetalických fází, které mohou snížit plastické vlastnosti svarových spojů a odolnost proti korozi. Příprava svarových ploch je dána. U „V“ svarů a oboustranných „V“ svarů je pro dosažení lepšího průvaru doporučeno použít větší úhel rozevření svařovaných ploch. U metod 141, 131 a 135 se pak doporučuje pro spolehlivé provaření kořene svarů použít větší mezery v kořeni svarů. [22;19;32;21]

Mezi tavící teplotou housenky a svarového kovu a neohřátým základním kovem se vyskytuje pásmo teplot, které odpovídá teplotám, za kterých se vylučují karbidy chromu. Vyskytnutá oblast může být náchylná k mezikrystalové korozi. Austeniticko-feritické oceli jsou odolnější vůči mezikrystalové korozi v tepelně ovlivněné oblasti v průběhu svařování než oceli běžné. Je to způsobeno nízkým obsahem uhlíku > 0,03 %, přítomnost feritických ostrůvků ve struktuře a legování titanem a niobem za účelem stabilizace oceli. Jestli je svarová konstrukce upnuta, může dojít k praskání svarů, které je způsobeno napětím způsobené smrštěním při tuhnutí. Praskání nastává během chladnutí svaru při vysokých teplotách (nad 1200 °C). Náchylnost k praskání lze redukovat, snížením feritu ve svarovém kovu. Prvky, které naopak podporují praskavost svarů jsou křemík a fosfor, ty se rozpouštějí rychleji než v austenitu. [22;32;20]

Pro zachování optimální korozní odolnosti svaru je zapotřebí minimalizovat vznik oxidace. K tomu se při svařování duplexních ocelí používají různé druhy ochranných plynů s obsahem dusíku. Plyny se nazývají formovací a obsahují směs dusíku a vodíku v poměrech např. (90 % N₂/10 % H₂). Během používání formovacích ochranných plynů hrozí, že se složky z plynu dostanou do svarové lázně, což vede ke zvýšení obsahu dusíku a vodíku ve svaru. Vlivem toho ve svaru hrozí k vyvolání pórovitosti, praskáním jiskření a v nejhorším případě ke vzniku vodíkových trhlin (obr. 4). [32]



Obr. 4 Vodíková trhlina [32].

Po dokončení svařovacího procesu musí být svařená oblast řádně vyčištěna. Používají se chemické nebo mechanické čisticí metody běžné pro všechny typy korozivzdorných ocelí (zvláště austenitických). Svarové spoje austeniticko-feritických ocelí se obvykle tepelně nezpracovávají. Pouze ve zvláštním případě se používá rozpouštěcí žíhání (pro rozpuštění karbidické (popř. nitridické) fáze v tuhém roztoku) s následným rychlým ochlazením. Duplexní oceli svařujeme všemi základními obloukovými metodami při respektování podmínek pro limitování tepelného příkonu do svaru. Pokud pro svařování použijeme technologie bez přídavného materiálu, které se vyznačují vysokou rychlostí ochlazování, bude svarový kov v TOO obsahovat větší podíl feritu, než je jeho základní materiál. Tento fakt se může projevit snížením korozní odolnosti svarového spoje, poklesem tažnosti a vrubové houževnatosti. Proto je nutno svary podrobit po svaření rozpouštěcímu žíhání. Pro tyto aplikace se doporučuje použít ochranné plyny obsahující dusík, který jako austenitotvorný prvek, slouží ke snížení obsahu feritu ve svarovém kovu. [22;19;32;10]

Postup svařování duplexních ocelí by se dal do shrnout do tří základních kroků [10]:

- Před svařováním:
 - Pro zajištění požadovaného průvaru by měla být použita širší mezera v kořeni a úhel spoje, než jaká se používá u standartních korozivzdorných ocelí.
 - Spoj a přilehlý základní materiál musí být řádně očištěn, přičemž při čištění by se měli používat výhradně nerezové kartáče.
 - Předehřev se zpravidla nedoporučuje.
 - Je nutnost použít suché (duplexní) elektrod.
- Během svařování:
 - Tepelný příkon by měl odpovídat tloušťce materiálu a svařovací metodě. Je zapotřebí se vyvarovat nízkému nebo vysokému tepelnému příkonu.
 - Vyhnouti se přílišnému rozkvyvu při svařování. Mohlo by dojít k následnému zvýšení tepelného příkonu.
 - Super-duplexní oceli jsou na tepelný příkon a mezihousenkové teploty více citlivé. Tudíž by tepelný příkon neměl překročit hodnotu 1 kJ/mm.
 - Vyvarování se zapalování oblouku mimo spoj, z důvodu způsobení koroze a trhlin.
 - Důležité je použití vhodného plynu pro ochranu kořene svaru (Tab. 5). Jako vhodné plyny se používají směsi obsahující N_2 a H_2 a čistý Ar.
- Po svařování:
 - Precizní vyčištění po dokončení svařování pro dosažení dobré odolnosti proti korozi. Odstranění veškeré strusky a oxidy na svaru a okolí.
 - Kartáčování by mělo být provedeno ručně, jelikož při použití rotačních kartáčů, hrozí riziko mikrotrhliny ve svarovém spoji.
 - Při dodržení technologického postupu je možnost deformovaný materiál narovnat za pomoci plamenu.

Tabulka 5 Ochranné plyny a plyny pro ochranu kořene [10].

Technologie	TIG	MIG	FCAW
Ochranný plyn	Ar nebo Ar-He	Ar-O ₂ , Ar-CO ₂ , Ar-He-O ₂	Ar-CO ₂ nebo čistý CO ₂

2.1.1 Diagram WRC – 1992

Technologický postup pro svařování různých druhů materiálů je určován provozní teplotou, dobou a působícím namáháním na svarový spoj. Uvedené veličiny zobrazují chování, tzn. stabilitu mezi základním materiálem a svarovým kovem. Pokud jsou přechody nestabilní, dochází v přechodech k degeneračním změnám vlastností. [22;32;13]

Pro určení mikrostruktury pro Cr – Ni oceli s vyšším obsahem feritu ve struktuře, především feriticko-austenitických duplexních ocelí, se používá konstituční diagram WRC-1992 (obr. 5), ze kterého jde spolehlivě odhadnout obsah feritu ve struktuře Cr – Ni oceli v rozsahu 0 až 100 FN. Diagram WRC-1992 nezávisí na obsahu Mn a Si, protože tyto legující prvky nemají žádný vliv na mikrostrukturu během výzkumu komise WRC pro svařování nerezových ocelí. Tento diagram nezahrnuje mangan jako legující prvek, a proto jako takový není možné odhadnout možnost tvorby martenzitu. Mangan má tak zanedbatelný vliv na vysokoteplotní tvorbu feritu nebo jeho přeměnu na austenit, proto má malý význam při použití WRC diagramu. Avšak mangan má vliv na nižší teplotu přeměny austenitu na martenzit, a tak tak zahrnutí tohoto prvku do diagramu může umožnit predikci oblastí martenzitu. Použití diagramu je zejména v oblasti pro nerezové oceli řady 300 a duplexní korozivzdorné oceli. Do výpočtu chromového ekvivalentu jsou zahrnuty pouze obsahy Cr, Mo, Nb. Do výpočtu niklového ekvivalentu jsou pak zahrnuty obsahy Ni, C, N, a Cu. [32;13;7;33] Přičemž chromový ekvivalent (Cr_e) se vypočítá dle Siewert vztahu [7]:

$$Cr_e = \%Cr + \%Mo + 0,7\%Nb \quad (2.3)$$

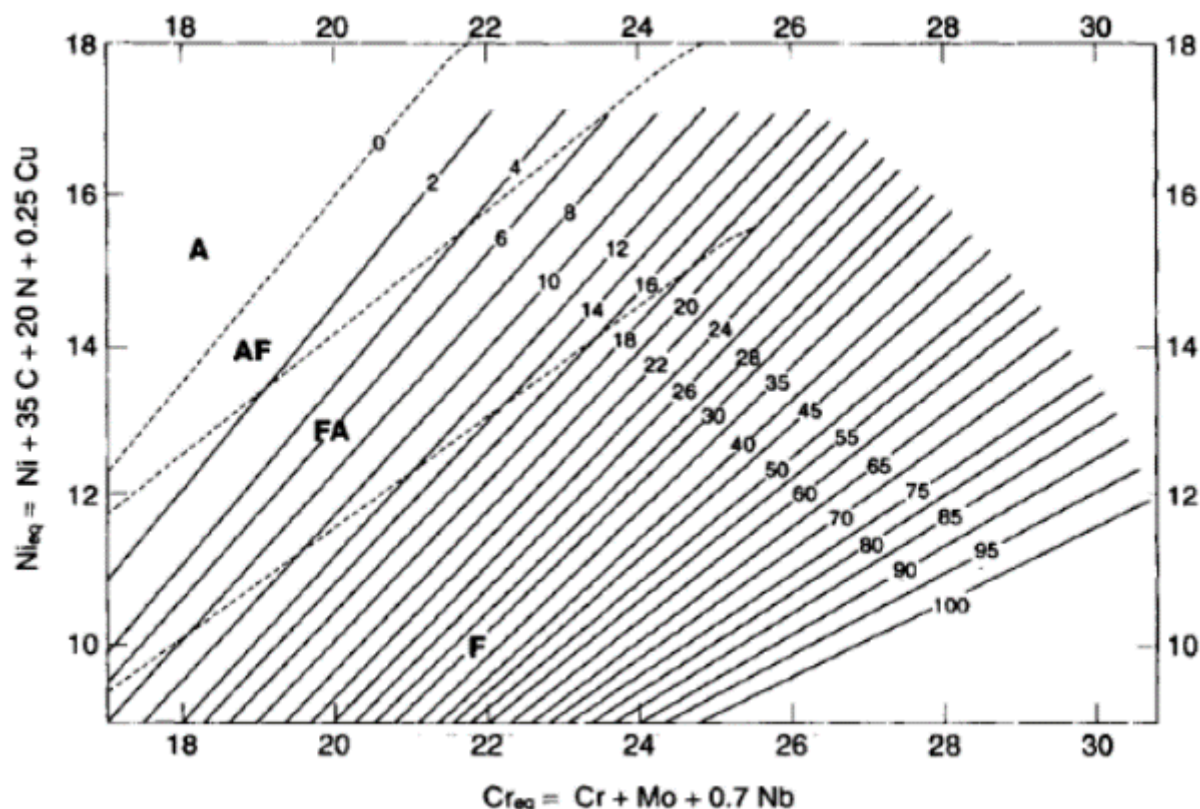
niklový ekvivalent dle vztahu [23]:

$$Ni_e = \%Ni + 35\%C + 20\%N + 0,25\%Cu \quad (2.4)$$

a obsah delta feritu ve svarovém kovu, dle Siefertova vzorce [23]:

$$\% \delta_{feritu} = 3 \cdot (Cr_e - 0,93 \cdot Ni_e - 6,7) \quad (2.5)$$

Diagram vyjadřuje náchylnost ke vzniku krystalických trhlin v závislosti na způsobu krystalizace. Oblasti A a AF zobrazené v diagramu, jsou oblasti s primární austenitickou krystalizací, to znamená, že je zde pravděpodobný výskyt krystalizačních trhlin. V oblasti označené FA a F dochází k primární feritické krystalizaci. Pro tyto oblasti je trhlina méně pravděpodobná. Konstrukce diagramu byla navržena primárně pro rychlosti ochlazování odpovídající svařování elektrickým obloukem. Oceli s obsahem 1 hm % křemíku a více než 3 hm % molybdenu mají přesnost odhadu feritu ve struktuře sniženu. Diagram je pouze informativní, což se týká zejména přesnosti výpočtů pro chromový i niklový ekvivalent. [7;32;23]



Obr. 5 Diagram strukturních stavů WRC - 1992 [13].

2.1.2 Volba přídavného materiálu

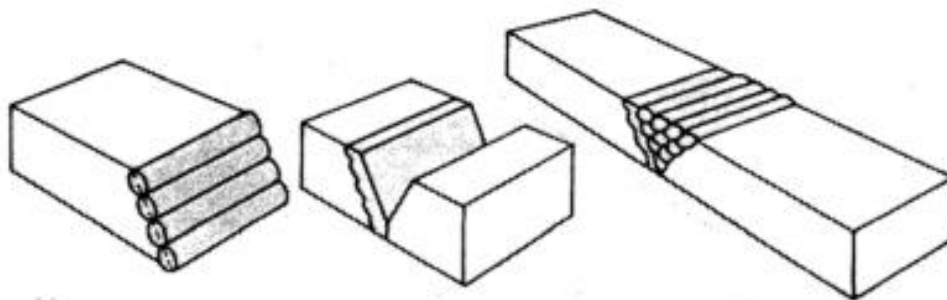
Přídavný materiál závisí na potřebných mechanických, korozních a fyzikálních vlastnostech, které musí být při volbě vhodného materiálu promyšleny technologem (konstruktérem). Podobně jako při pájení se při velkém rozdílu teplot tavení obou spojovaných materiálů, volí přídavný materiál dle teploty níže tavitelného materiálu. Přídavný materiál musí mít dostatečnou tažnost, aby překonal rozdíly v teplotní roztažnosti obou spojovaných materiálů. Přídavný materiál by měl splňovat nízký obsah intersticiálních prvků (uhlík, dusík, kyslík a vodík). [21;8;10]

Přídavné materiály pro svařování austeniticko-fertických ocelí se shodují se složením základního materiálu, popřípadě se využívá austenitických materiálů, které by ve svarovém kovu měli zajistit okolo 15 až 50 % feritu. Při svařování duplexních ocelí se musí dodržovat všeobecné zásady přesného svařování. Důvodem je, aby svar měl nejen předepsané mechanické vlastnosti, ale i odolnost proti korozi stejnou se svařovanou ocelí. [5;10;33]

Až na pár výjimek se pro nízkoalokované duplexní oceli pro svařování používá svařovacího materiálu OK Tigrod 2209 od firmy ESAB, který je vhodný pro ocel 1.4462 (další používané materiály pro duplexní oceli viz. příloha 1.), přičemž jsou zajištěny skvělé mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi. Nízkoalokované duplexní materiály jsou však více nákladné a z metalurgického hlediska jsou sestaveny tak, aby měly obdobné vlastnosti jako základní materiál. [10]

Nejběžnějším přídavným materiálem pro svařování fertických a nízkoalokovaných ocelí s austenitickými korozivzdornými ocelmi je materiál typu 25Cr-12Ni. Svarový kov s tímto označením obsahuje přibližně 8 až 15 FN feritu. Pokud má součást se svarovým spojem pracovat při teplotách vyšších, než je 400 °C je potřeba minimalizovat problémy se snížením

hladiny indukovaných napětí. V praxi se tak doporučuje použít jako přídavný materiál niklové slitiny. Další variantou je použití polštářování svarových hran (obr. 6) feritické oceli austenitickou vrstvou o tloušťce 1-2 mm a až následné zhotovení svarového spoje. [5;10]



Obr. 6 Polštářování při svařování feritické oceli s austenitickou [10].

Polštářování lze použít jako bariéru pro nežádoucí migraci některých prvků (především uhlíku do svarového spoje), k němuž může dojít během následného tepelného zpracování (žhánění) svarového spoje, nebo během dlouhého vystavení teplotám nad 400 °C. [5;10]

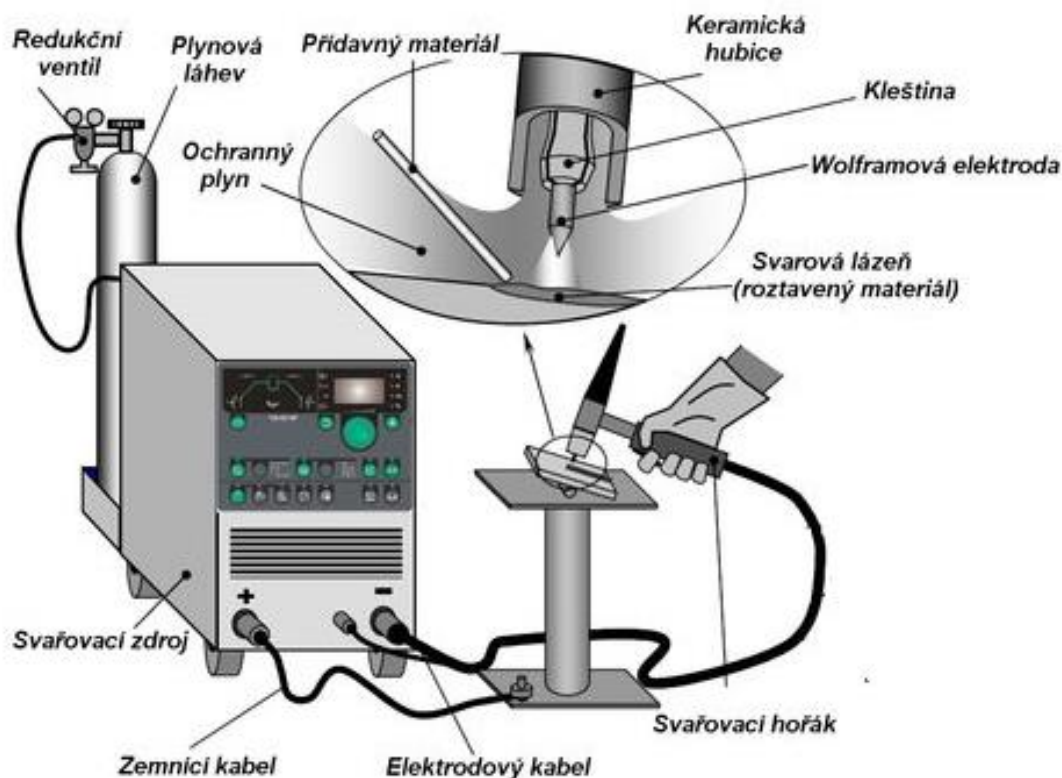
Chrom má vyšší afinitu k uhlíku než železo, proto se při svařování nelegované nebo nízkolegované oceli používá přídavného materiálu s vyšším obsahem chromu. Dochází pak k difuzi uhlíku ze základního materiálu do svarového kovu, když svar vystaven vyšším teplotám (nad 450 °C). Rychlost difuze uhlíku je funkce teploty a času a rapidně roste při teplotách nad 600 °C. Austenitická ocel má vyšší rozpustnost uhlíku než feritická ocel, a proto je oduhličení feritické části svarového kovu větší, pokud se na svařování použije austenitický materiál. Velký počet migrace uhlíku a oduhličení se na materiálu projeví vznikem čisté feritické mikrostruktury. Čistě feritická struktura může snadno rekrystalizovat a důsledkem je pak výrazně zhrublé zrna. Naopak difuze uhlíku k fázovému rozhraní má za následek zvýšení koncentrace na hranici rozhraní a precipitaci karbidů (zejména na bázi chromu). Šířka oduhličené oblasti se pohybuje v řádech několika desetin až jednotek mm, má nižší tvrdost a pevnost než okolí tepelně ovlivněná oblast nebo svarový kov. Feritická vrstva a karbidické difuzní vrstvy v materiálu mohou způsobit problémy při mechanických zkouškách svarových spojů a během provozu. Například při zkoušce v ohybu může iniciovat trhlina a následný lom už při nízkých úhlech ohybu. Při creepovém namáhání svarových spojů mohou v této oblasti vznikat kavity a lom. Zóna se může zobrazit jako kritická i při cyklickém teplotním zatěžování svarového spoje. V průběhu tepelného zpracování při nižších zbytkových napětích může dojít v této oblasti k iniciaci trhliny vzhledem k přídavnému napětí, jenž vyplývá z rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti obou částí svarového spoje. [5;10]

Jedno z možných řešení této problematiky je možnost použití niklové slitiny, jako svarového kovu, protože nikl je pro difuzi uhlíku nepřekonatelnou bariérou. Chemické složení niklové slitiny je možné upravit tak, aby byl nižší koeficient teplotní roztažnosti [5;10].

2.2 Metoda ručního svařování 141 (GTAW/WIG)

Jedná se o jednu z nejrozšířenějších metod svařování, a to především v oblasti svařování vysokolegovaných ocelí a velké skupiny neželezných kovů. Své nezastupitelné místo má i při svařování složitých prostorových konstrukcí, kusové i sériové výroby. Obloukové svařování v ochranné atmosféře je svařovací proces, při kterém se drátová elektroda taví pod ochranným plynem v místě dotyku a spojuje svařované součásti, aniž by roztavený materiál reagoval s okolním vzduchem. Inertní plyn jiným označením netečný plyn je druh plynu, který nereaguje

s dalšími prvky. Plyn se do místa svaru dostává za pomoci keramické hubice, kde nahrazuje atmosférický vzduch. [7;8;39;36]



Obr. 7 Schéma ručního svařování metodou WIG [39].

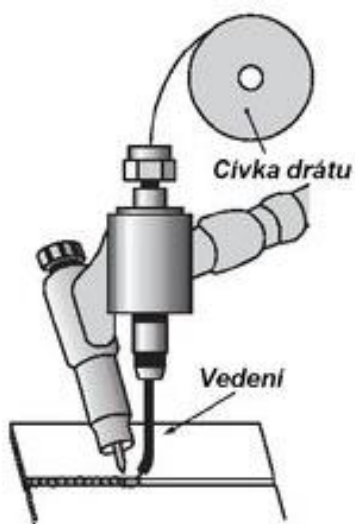
Vzniklý svar má velice dobré vlastnosti, výborný povrch a vysokou čistotu. Metoda umožňuje svařovat ve všech polohách dle normy ČSN EN ISO 6947 (příloha 2), zpravidla však dopředu. Při svařování směrem dopředu se hořák pohybuje vlevo (u praváků), drát přídavného materiálu se posunuje před hořákem a je postupně podává na okraj tavné lázně. Během svařování se doporučuje [1;17;8;39;36;42]:

- základní poloha hořáku kolmá k ose svaru, čímž se zajistí rovnoměrné natavení obou polovin svařovaného materiálu,
- sklon hořáku v podélné ose cca 10° vzad a úhel sklonu přídavného materiálu 60 až 80 % vpřed od kolmice v místě hoření oblouku,
- polohování hořáku i přídavného materiálu se mění dle typu svaru, polohy, směru svařování, složitosti a tvaru svarku,
- základní svařovací polohy, odpovídající sklon a orientace hořáku s přídavným materiálem a jejich pohyb ve svarové spáře jsou zobrazeny v příloze 2,
- vysunutí elektrody z keramické plynové trysky je přibližně dvojnásobek průměru elektrody pro tupé svary a u koutových svarů se vysunutí elektrody zvyšuje zhruba o 3 až 5 mm,
- předpokladem pro dobrý svar je příprava svarových ploch, řídící se především tloušťkou a druhem svařovaných materiálů.

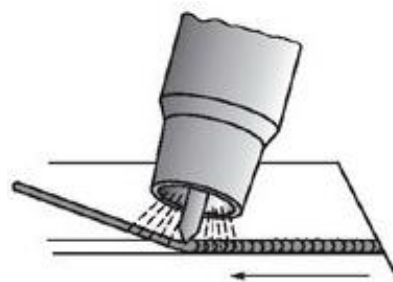
Ruční svařování specifikuje polohu, pohyb hořáku a přídavného materiálu během svařování vzhledem ke svarové lázni. Technika WIG připomíná svařování plamenem, akorát na místo tepla plamene je, zda materiál taven za pomoci tepla oblouku, ale pohyb jak hořáku, tak

přídavného materiálu je pomalejší. Během procesu je nutno hlídat, aby se přídavná drát (materiál) nedostal mimo oblast ochranného plynu a nebyl tak kontaminován vzduchem. Během kontaminace hrozí nebezpečí oxidace ohřátého konce a mohlo by dojít k zanesení oxidů do svarové lázně. Kvůli tomu a dalším nepříznivým vlivům, jsou předepsané zásady pro ruční svařování, které pro vysokolegované oceli jsou [7;8;39]:

- použití stejnosměrného proudu s konstantním nebo impulsním průběhu. Elektroda je připojena na záporném pólu zdroje,
- použitý ochranný plyn Ar, Ar + He. Helium a vodík napomáhá přenosu tepla do svaru a tím i hloubce závaru a rychlosti svařování,
- do tl. 2 mm se tupé svary svařují bez styčné spáry, do tl. 4 mm se styčnou spárou zhruba 1 mm a nad 4 mm se upravuje hrana do úkosu „V“ s rozevřením 60 – 70°, s otupením 2 mm,
- hodnota svařovacího proudu se volí od 30 do 50 A na 1 mm tl. materiálu,
- délka oblouku by měla odpovídat průměru elektrody,
- svařovat s minimálním možným tepelným příkonem do svaru,
- u vícevrstevných svarů dodržet teplotu interpass max. 100 °C a používat úzké housenky,
- používat niobem stabilizované přídavné materiály o rozměrech menších než tl. materiálu (doporučené množství niobu je desetinásobek obsahu uhlíku),
- pro větší tl. svařovacího materiálu použít přídavný materiál, který dává svarový kov s malým obsahem delta feritu,
- vlivem špatné tepelné vodivosti je nutno stehovat v malých vzdálenostech (40 mm) od středu svaru. I pro tento typ svařování nutno použít formovacího plynu na ochranu kořene,
- pro tenké plechy používat upínací přípravky a měděné podložky pro snížení deformace.



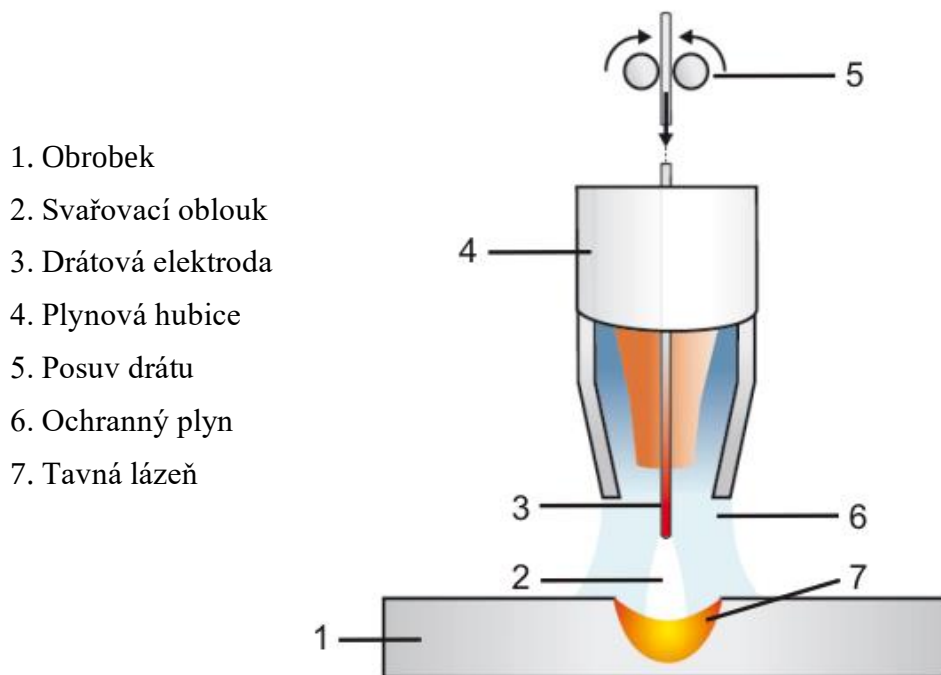
Obr. 8 Automatické dopravení přídavného materiálu [39].



Obr. 9 Manuální dopravení přídavného materiálu [39].

2.3 Metoda ručního svařování 131 (MIG)

Svařování touto metodou je jedno z nejrozšířenějších, vyznačuje se tím, že drátová elektroda přivedená přes cívku, je krátce před výstupem z hořáku zásobena proudem z proudové špičky (Obr. 10), tak že mezi drátovou elektrodou a obrobkem může hořet svařovací oblouk. Ochranný plyn protéká z trysky ochranného plynu, která drátovou elektrodu obklopuje. Tak je svarový kov chráněn před vnikem atmosférických plynů kyslíku, vodíku a dusíku. Ochranný plyn má kromě ochranné funkce ještě další funkce. Určuje například tlak vzduchu svařovacího oblouku, a proto má vliv na jeho elektrickou vodivost a tím pádem na vlastnosti svaru. [1;8;27;14;36]



Obr. 10 Schéma svařovací hlavy (MIG) [27].

Po zmáčknutí spínače hořáku se dá drátová elektroda s předem nastavenou rychlostí do pohybu. Současně s tím se přes proudové relé dopravuje proud a ochranný plyn. Při dotyku povrchu obrobku vznikne zkrat. Při vysoké hustotě proudu na špičce elektrody se na místě dotyku začne materiál odpařovat a svařovací oblouk se zapálí. Při vysoké rychlosti posuvu drátu se může na začátku velice slabý svařovací oblouk materiálem obrobku zadusit a zapálení se podaří až další pokus. Zapalování se nesmí nikdy provádět mimo spoj a má být pouze na místech, která se poté rychle opět zataví. Pokud by nebyla tato místa opět převařena, může dojít z důvodu rychlé ochlazovací rychlosti v těchto místech k trhlinám. [1;19;21;14]

Hořák se ve směru svařování skloní zhruba o 10 až 20° a pohyb svařování může probíhat jak vzad, tak vpřed. Vzdálenost od obrobku by měla být 10 – 12 krát průměr drátu. V případě moc velkého naklonění hořáku hrozí nebezpečí, že se do ochranného plynu dostane vzduch. Obecně se vedení hořáku vpřed doporučuje jako bezpečnější s použitím plných drátů. U silnějších plechů existuje nebezpečí, že ve svarovém spoji vzniknou vady, a to hlavně za předpokladu nízké svařovací rychlosti. [1;19;21;14]

Pro metodu svařování tavící se elektrodou v ochranných plynech, jsou právě ochranné plyny velice důležitou součástí procesu. Jejich úkolem je ochrana tavné lázně před vlivy okolní atmosféry. Přítomnost vzduchu způsobuje oxidaci a nitridaci svarového kovu, které pak výrazně zhoršují mechanické vlastnosti spojů. Svou izolační schopností umožňují stabilní hoření oblouku a přispívají k přenosu tepelné energie do svaru. Při svařování metodou MIG se jako ochranný plyn používá převážně čistý argon a helium nebo jejich dvousložková směs Ar + He. Čistota plynů a přesnost míchání směsí je stanoven dle normy ČSN EN ISO 14175.

Svým složením a množstvím ovlivňují velkou řadu svařovacích charakteristik, především [19;21;43]:

- způsob přenosu svarového kovu obloukem,
- hloubku závaru a profil svaru,
- množství rozstříku,
- rychlost svařování,
- stabilitu elektrického oblouku.

Vysokolegované oceli mají díky svému vysokému obsahu legujících prvků značně hustou tavnou lázeň, která vytváří nežádoucí převýšení svaru a ostrý přechod mezi svarovou housenkou do základního materiálu. Z toho důvodu se doporučuje pro svařování takovýchto materiálů použít ochranný plyn s menším obsahem kyslíku. Kyslík výrazně snižuje povrchové napětí a tím vytváří příznivější průřez svarové housenky, zlepšuje odplynění svarové lázně a přechod na základní materiál. Z takového důvodu se pro svařování vysokolegovaných ocelí doporučuje použití plynů jako jsou [19;21]:

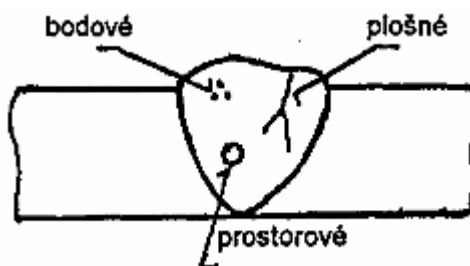
- Argon + 2% oxid uhličitý
- Argon + 2% kyslíku
- Ar + 30 – 50% He a 1 – 2% O₂

Pro svařování se doporučuje použití především impulzního způsobu svařování. Svařovat se dá také zkratově a sprchovým přenosem. Na rozdíl od nelegovaných ocelí začíná oblouk se sprchovým přenosem o zhruba 20 % nižším proudem. Při svařování vysokolegovaných ocelí je nutno omezit množství vneseného tepla do svaru. Oblouk musí být veden zcela předu u tavné lázně. Předbíhání svarového kovu by mělo za následek výraznou tvorbu rozstřížku. [21;10]

2.4 Vady ve svarech a jejich nedestruktivní zkoušky

Vady vzniklé ve svarech se považují za nebezpečné koncentrátoři napětí, které nepříznivě ovlivňují velikost meze únavy svaru. Za určitých předpokladů se též mohou stát iniciátory křehkého lomu a tím následného vyřazení součásti z provozu. Vady ve svarových spojích a jejich příčiny vzniku jsou závislé na druhu svařovaného materiálu a vybrané metodě svařování. V praxi se připouští pouze svary bez vad, nebo s takovými typy vad, o kterém lze tvrdit, že při známém provozním zatížení neohrozí bezpečnost svařované konstrukce. Ve svarech se vady rozdělují podle dvou základních kritérií [5;22;3;38]:

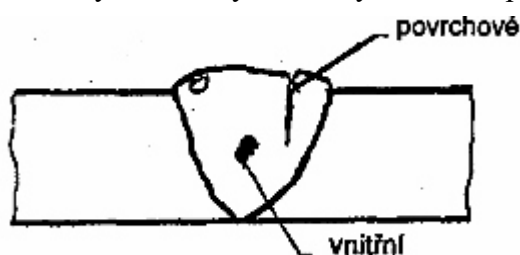
- Podle tvaru (geometrie) ve svarech (Obr. 11):
 - bodové – mikropóry, případně sférické vměstky ,
 - plošné – trhliny, mikrotrhliny, studené spoje, neprůvary, nespojitosti návaru se základním materiálem,
 - prostorové – plynové dutiny (bubliny, póry), vměstky, staženiny.



Obr. 11 Rozdělení vad podle tvaru (geometrie) [22].

▪ Podle polohy vad ve svaru (Obr. 12):

- povrchové – trhliny, studené spoje na svarové ploše, zápaly, neprovařený kořen a póry,
- vnitřní – plynové dutiny, staženiny, vměstky, studené spoje a neprůvazy v kořeni.



Obr. 12 Rozdělení podle polohy vad ve svaru [22].

- Trhliny za horka, které vznikají jak ve svarovém kovu, tak v teplem ovlivněné oblasti, během ochlazování svarových spojů za teplot převyšujících 850 °C, jsou jedním z dalších nepříznivých jevů při svařování. Oceli, kde hrozí právě vznik takovýchto trhlin se hodnotí náchylnost k horkým trhlinám. Lze je určit dle parametrických rovnic, jako je například H.C.S. [22]:

$$H.S.C. = \frac{C(S + P + \frac{S_i}{25} + \frac{N_i}{100}) \cdot 10^3}{3M_n + C_r + M_o + V} \quad (2.5)$$

kde: ocel je náchylná k trhlinám za horka, když hodnoty $H.S.C. > 1.6$

K zamezení vzniku trhlin za horka lze:

- snížením měrného příkonu během svařování,
 - použít přídavný materiál o vysoké čistotě,
 - omezit napětí a deformace použitím vhodných technik svařování.
- Studené trhliny, vznikají při hodnotách nižších, než je 200 °C. Jejich nejčastější výskyt je v oblasti podhousenkové oblasti svarových spojů a kořenové oblasti. Orientace mohou být jak podélného charakteru, tak příčného. V materiálu se šíří za pomoci transkrystalického charakteru. Oceli, které jsou náchylné na vznik studených trhlin se dají vyjádřit za pomoci výpočtu uhlíkového ekvivalentu (rov. 2.2). Mezi hlavní příčiny vzniku studených trhlin je působení hlavně vodíku a struktur citlivých na vodík ve svarovém spoji a zbytková napětí ve svarech. K zamezení vzniku trhlin za studena je nutno [22]:
- použít nízkovodíkových technologií svařování,

- pečlivě osušit přídavný materiál před použitím,
- aplikovat přehřev, dohřev, nebo použít vyšší měrný příkon při svařování,
- minimalizovat vznik zbytkových napětí (vhodná volba svařovací technologie),
- vyvarovat se vadám v oblasti kořene (neprůvary, zápaly), fungují jako koncentrátoři napětí a místa pro iniciaci trhlin.

Přípustnost daných vad je ve výrobním procesu obecně stanovena druhem, velikostí a četností vyskytujících se vad v závislosti na typu svaru a způsobu namáhání. Pro bezpečnost svaru je zásadní vada, která působí maximálně vrubovým účinkem (vada u které existuje nebezpečí, že se z ní vyvine při zatěžování svaru trhlina). Další vady, neležící v rovině šířící se trhliny, nebudou prakticky přispívat ke snížení bezpečnosti svařované konstrukce. Zda je vada ve svaru přípustná nebo není stanovuje konstruktér součásti na základně předpokládaného provozního namáhání s použitím principů lomové mechaniky. Zhotovený svar se kontroluje dle stanovených kritérií jakosti a spolehlivosti, které se ověřuje pomocí příslušných kontrolních metod pracovníkem nedestruktivních metod. Pro výkon činnosti nedestruktivní zkoušky musí být přidělený pracovník příslušně klasifikován a mít platný certifikát pro danou zkoušku [5;23].

Používané nedestruktivní kontroly jakosti svarových spojů (NDT) obvykle rozdělujeme podle schopnosti identifikace vad na povrchu nebo uvnitř svaru. Běžně používané nedestruktivní metody kontroly jakosti svarů jsou v přehledu uvedeny v tabulce 6, včetně platných norem ČSN EN pro provádění zkoušek a pro hodnocení přípustnosti indikací. [5;23;12]

Tabulka 6 Přehled používaných NDT metod [12].

Metoda zkoušení			Technická zkoušení podle ČSN EN ISO	ČSN EN normy přípustnosti indikací
Povrchové	Název zkoušky	Zkratka	-	-
	Vizuální	VT	ČSN EN ISO 17637	ČSN EN ISO 5817
	Penetrační (kapilární)	PT	ČSN EN 3452-1:2014	ČSN EN 1289
	Magnetická prášková	MT	ČSN EN 17638	ČSN EN 1291
	Vířivé proudy	ET	ČSN EN 17643	Dohodou mezi smluvními stranami
Vnitřní	Radiologické	RT	ČSN EN ISO 17636-1	ČSN EN 12517
	Ultrazvukové	UT	ČSN EN ISO 17640	ČSN EN 1712

2.4.1 Vizuální kontrola svarů

Jedná se o nejjednodušší nedestruktivní metodu, zjišťující zjevné povrchové vady (nepřípustné nerovnoměrnosti převýšení svaru, zápaly, trhliny, studené spoje a vady kořenové oblasti svaru). Metoda ověřuje splnění podmínek stavu povrchu pro další předepsanou nedestruktivní kontrolu. Podle použitých kontrolních prostředků rozdělujeme vizuální kontrolu na dvě hlavní skupiny [34;25]:

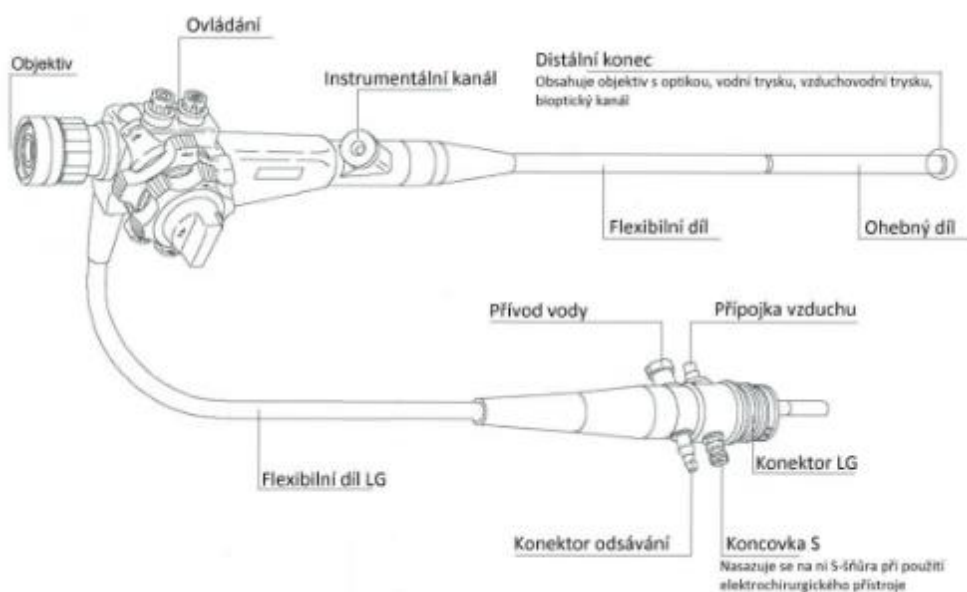
- přímá – kontrola se provádí bez jakýchkoliv prostředků, jen pouhým okem, nebo pomocí lupy při maximálním zvětšení 3 až 6x. Použití metody je pouze na dostupném

povrchu. Požadavkem pro tuto metodu je dobrá zraková schopnost pracovníka, ověřená oftalmologem (test zrakové rozlišitelnosti) a dostatečné osvětlení denním nebo bílým světlem.

- nepřímá – kontrola se provádí za pomoci optických nebo optoelektrických přístrojů a zařízení, tzv. endoskopů. Používá se pro kontrolu nepřístupných povrchů, které nejsou dostupné například z důvodu geometrie součásti, nebo ohrožení zdraví pracovníka (chemicky zamořené prostory).

Podle konstrukce rozlišujeme endoskopy na [25]:

- pevné endoskopy – mají optický systém zabudovaný v soustavě pevných trubkových nástavců, jejichž délku lze přizpůsobit dle rozměru kontrolované součásti. Nástavce některých typů je možno spojovat do různých sklonů. To má za následek, že výsledný systém může být i několikrát zalomený. Dále je možno vyměňovat objektivové a osvětlovací nástavce a nastavit tak ideální směr pozorování.
- ohebné endoskopy (Obr. 13) – je tvořen jako optický systém ze svazku jemných skleněných světlovodivých vláken, která přenášejí světelné informace o pozorované ploše. Výstupní obraz je rozdělen do bodového rastru. Celé zařízení fibroskopu je oplášťeno flexibilním pouzdem. Endoskop se dá využít pro různé aplikace, jelikož lze použít široký rozsah vyměnitelných objektivů s přímým nebo bočním směrem pohledu. Okulárový výstup endoskopu umožňuje pracovníkovi přímé pozorování s možností vytvoření foto a videodokumentace, pro počítačové zpracování, vyhodnocení a archiv dat.

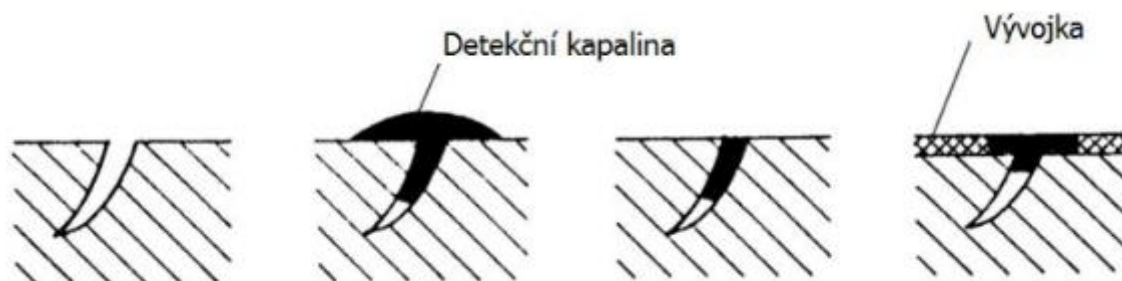


Obr. 13 Schématické zobrazení ohebného endoskopu [25].

2.4.2 Penetrační (kapilární) kontrola svarů

Jedna z nejrozšířenějších NDT metod je penetrační kontrola svarů. Fyzikální princip penetrační zkoušky, nám snižuje možnosti použití, jelikož touto zkouškou zkoumat pouze vady, které bezprostředně souvisí s povrchem a jsou na povrchu otevřené, aby do nich mohla vniknout detekční kapalina. Při kontrole svarových spojů se jedná o identifikaci povrchových trhlin, studených spojů, zápalů a pórů. Pokud se jedná o vady uzavřené, nebo o vady vnitřní, touto metodou je nelze identifikovat. [25;15]

Podstatou penetrační metody je vybrání vhodné, kapilárně aktivní kapaliny, která se dostane do necelistvosti plochy. Po odstranění jejího přebytku z povrchu plochy zkoušeného předmětu vzlíná kapalina z necelistvostí vlivem kapilárních sil do nanesené vývojky, tak že se vady na povrchu zviditelní (Obr. 14). Při vzlínavosti se kvantitativně uplatňuje jak vlastnost povrchu kapiláry, ta vlastnosti vzlínající kapaliny. [15;16]

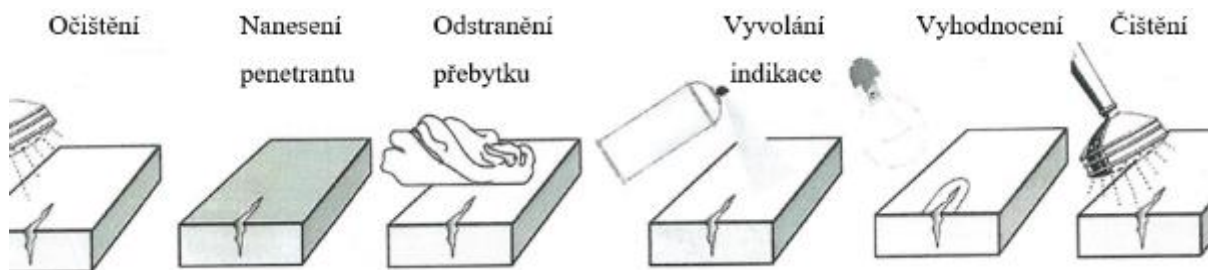


Obr. 14 Princip vzlínavosti kapaliny během penetrační metody svarů [15].

Kapilára v podstatě zahrnuje vliv poměru adhezních sil mezi kapalinou a povrchem tuhé fáze ke kohezním silám mezi molekulami penetrační kapaliny. Napovrch vzlíná taková kapalina, která dobře smáčí stěnu kapiláry, kde je tedy adheze větší než koheze, tento jev se nazývá kapilární elevace. V opačném případě (když je koheze větší než adheze), vzniká opačný jev, který se nazývá kapilární deprese. Kapilární elevace je hlavním předpokladem pro identifikaci vad při používání penetračních metod. Na výsledek kapilární elevace má značný vliv povrchové napětí penetrační kapaliny a její viskozita. Povrchové napětí, které se představuje jako působící síla kolmo na jednotku délky povrchu kapaliny a jeho rozměr. Ovlivňuje smáčivost penetrační kapaliny na povrchu zkoumaného materiálu. Kapalina s nižším povrchovým napětím smáčí povrch zkoušené součásti lépe. Optimální hodnoty povrchového napětí penetračních detekčních prostředků se pohybují v rozmezí hodnot 22 až 32 mN/m. Příliš viskózní kapalina vniká do vad pomalu a kapalina o nízké viskozitě naopak, takové kapaliny nám vytváří na výsledném povrchu příliš slabou vrstvu. Vzhledem k takové skutečnosti platí při používání běžných penetračních prostředků k jejich tepelnému omezení v hodnotách od 5 do 50 °C. Pro správné provedení zkoušky je zapotřebí dodržet stanovených postupů (Obr. 15.). [21;15;18;38]

- Příprava povrchu pro zkoušku – mechanické nebo ruční očištění, odmaštění a osušení.
- Nanesení penetrantu na zkoušený povrch – nástřikem, ponorem. Pro běžně používané prostředky teplota při nanášení v rozmezí 5 až 50 °C. Doba působení penetrantu označována jako penetrační čas musí být minimálně 5 až 15 minut.
- Odstranění přebytku penetrantu – při použití penetrantů s emulgátorem stačí oplach mírnou sprchou vody. U nesmyvatelných emulgátorů se nejprve přebytek setře sajícím textilem, nepouštějícím vlákno a následně se použije čistič a osušení čistou textilní látkou. Nutnost pozorovat, aby nedošlo k vymytí penetrantu z necelistvosti.
- Vyvolání indikace – provádí se tak nanesením vývojky (suché – naprašováním, mokré – natíráním, nástřikem, ponorem). Na bílé vyvolávací vrstvě se objeví po určité době barevná nebo fluorescenční stopa.
- Vyhodnocení – provádí se vizuálně neprodleně po nanesení vývojky, kdy se projeví identifikace vad větších rozměrů, zatímco projevení indikací jemnějších vad trvá delší dobu (přibližně 10 minut a více). Barevné indikace se vyhodnocují při rozptýlením bílém světle o intenzitě 500 luxů. Při fluorescenční metodě se provádí prohlídka v zatemněném prostoru při černém světle ultrafialové lampy intenzitou minimálně 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

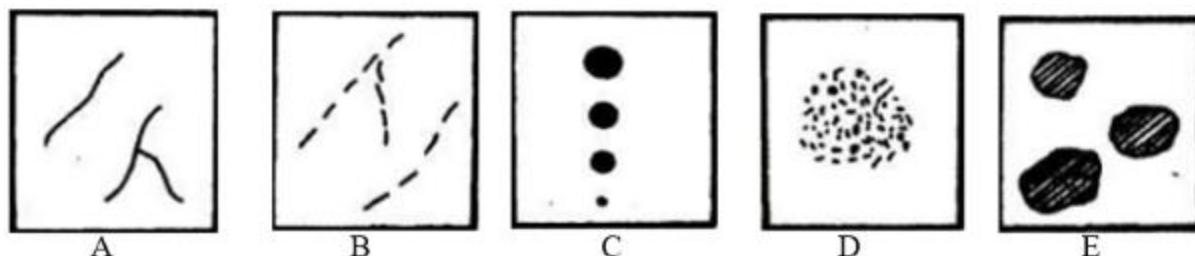
- Záznam indikací pro dokumentaci – v praxi se obvykle provádí jen ofotografování daného povrchu.
- Čištění po zkoušce – je nutno v případě, že by detekční prostředky mohly ovlivnit následné zpracování součásti. Čištění se provádí podle použitých detekčních prostředků mechanicky (oklepání, setření), proudem vody.



Obr. 15 Postup provedení penetrační zkoušky [18].

Zaznamenané vady u svarů se musí indikovat k posouzení, zda se jedná o nebezpečné vady, které by mohli mít vliv na funkčnost součásti. Jedná se především o vzhledové charakteristiky, které umožňují přibližně určit druhy vad. Rozlišujeme čtyři indikace podle charakteristického vzhledu vrubu (Obr. 16) [18]:

- souvislé liniové – trhliny, praskliny, studené spoje, zápaly a neprůvary kořene (A, B),
- okrouhlé – otevřené plynové dutiny, kráterové trhliny na ukončení housenky (C),
- tečkované – porezita (D),
- difuzní – bez ostrého ohraničení (E). Nedostatečné odstranění přebytku penetrantu. Je nutno opakovat zkoušku.



Obr. 16 Charakteristický vzhled indikace [18].

2.4.3 Příprava a analýza vzorků mokrou cestou

Pro stanovení chemického složení se odebírají části součásti pro vytvoření vzorků. Po vyříznutí vzorku je potřeba opracovat plochu za pomoci broušení a zbavit se tak okují. Během brousícího procesu je zapotřebí hlídat barvu třísek. Pokud by se stalo, že odpadávající třísky mají modrou barvu, znamená to částečnou oxidaci povrchu, a to by ve výsledku mohlo vést ke zkreslení výsledků, při stanovování obsahu uhlíku. Nutnost broušení vzorku vyplývá z omezené hloubky ostroty optické mikroskopie, která je u nejlepších mikroskopů kolem 0,2 μm . Pro broušení se používají brusné papíry, kde je brusivo tvořeno korundem nebo karbidem křemíku (SiC). Využití brousících zařízení může probíhat manuálně, však existují i zařízení která pracují zcela automaticky. [19;12]

Povrch vzorku připravující se pro analýzu se rozpouští účinkem kyselin a louhů. Leptadla pro korozivzdorné oceli se vyznačují vyšší koncentrací kyseliny. Pro zvýraznění jednotlivých prvků používá i barevné leptadlo, nejčastěji se však používá elektrolytické leptání. V roztoku se stanoví charakteristickou kvantitativní chemickou reakcí pro daný prvek přesné obsahové

složení v procentech. Přesnost metod je důležitým ukazatelem jakosti. Dovolенý rozměr výsledků rozboru zobrazuje technické možnosti analytické metody. Standartně se zjišťují chemické prvky C, Mn, Si, P a S. Dále se zjišťuje zastoupení legujících přísad v materiálu Cr, V, Mo, Ni, W, Nb, Al a doprovodné prvky. [19;12]

Tabulka 7 Přehled využívaných leptadel pro korozivzdorné oceli [12].

Název	Složení	Aplikace
Vilella	1g kyseliny pikrové 5 ml HCL 95 ml ethanolu	Vhodné pro martenzitické a precipitačně vytvrzené oceli. Zvýrazňuje delta ferit, sigma fázi a karbidy.
Lichtenegger-Bloech	20 g NH ₄ SH 0,5 g KHSO ₃ 100 ml H ₂ O	Zvýrazňuje austenitickou fázi v duplexních ocelích. Feritická fáze není napadena.
Glyceregia	3 díly glycerolu 2 – 5 dílů HCl 1 díl HNO ₃	Vhodné pro zvýraznění sigma fáze a karbidů.
Kyselina pikrová a chlorovodíková	4 g kyseliny pikrové 96 ml ethanolu 5 kapek HCl 5 kapek benzalkoniumchloridu	Vhodné pro vyvolání hranic zrn a dvojčatění. K leptání dochází díky precipitátům karbidů chromu na hranicích zrn a dvojčatění.

Po naleptání a připravení vzorku se v širokém měřítku v hutních laboratořích používá spektrální analýza. Velkou výhodou je vysoká rychlost vyhodnocení, komplexní posouzení u jednoho vzorku, za stejných podmínek analýzy a ze simultánního měření intenzit excitovaných analytických spektrálních čar, které jsou pro jednotlivé prvky charakteristické. Spojité zařízení vybuzené elektrickým výbojem, zahrnuje též monochronické záření vybuzenými atomy a ionty přítomných prvků. Zařízení se rozloží optickým systémem na čárové spektrum. Intenzita čar se měří fotonásobiči. Čím je větší množství prvků ve vzorku, tím je větší intenzita příslušné spektrální čáry. Přístroj je nutno kalibrovat pomocí přesně analyzovaných vzorků. Obvykle se pracuje v ultrazvukovém záření (160-380 nm). Rozbor probíhá zhruba kolem tří minut u nízkolegovaných a středně legovaných ocelí. Výhodné je také stanovení širokého spektra obsah. Doprovodných prvků v materiálu. [19]

2.4.4 Příprava a analýza vzorků pro metalografické zkoušky

Příprava vzorku pro výbrus se odebere o potřebné velikosti přímo z oblasti zkoumaného předmětu, kterou je potřeba posoudit. Důležité je, aby se při odběru vzorku mechanickým procesem nestalo, že hodnocená struktura by byla změněna vlivem deformace nebo tepelným ovlivněním. Nejčastěji se proto používá řezání pilou, soustružením, frézováním a broušením. Oblast, kde je prováděn odběr musí být intenzivně chlazená. [19;12;18]

V některých případech plocha makro výbrusu pozoruje bez dalších úprav, nebo poleptání. Ve většině případů však vzorek musí po obroušení na brusce dále na obroušení na brusných papírech. Pro makrovýbrus postačuje broušení na brusném papíru se zrněním 1/0. Po broušení se vzorek opláchne a odmastí od nečistot. Osušený vzorek se leptá v misce s leptadlem. Po naleptání se vzorek opět opláchne v lihu a usuší teplým vzduchem. Výbrus pro zkoumání je pak

nutno upnout do svěrek a zalít buď do dentacrylu nebo do pryskyřice. Po zatvrdnutí následuje broušení na sadě brusných papírů se zmenšující se velikostí zrna. [19;12;18]

Vhodná brusiva jsou diamant, karbid bóru, karbid křemíku a oxid hlinitý. Při ručním broušení se pak používají u ocelí brusné papíry se zrna 100,150,220,0,2/0,4/0 a 6/0 za sucha, což jsou papírky s jemnou a velmi jemnou zrnitostí. Za mokra se používá obdobná sada brousících papírů s označením waterproof, které jsou určené pro broušení v kapalině. Ručně se brousí vždy v jednom směru. Po odstranění všech kolmých ploch ke směru broušení se vzorek pečlivě očistí a v broušení se pokračuje na jemnější řadě brusných papírů ve směru kolmém k rýhám vytvořených předchozím broušením. Po broušení na brusném papíru se zrněním 6/0 se výbrus leští za mokra na vhodné tkanině za použití brusné suspenze Al_2O_3 . Po dokončení se vzorek opláchne vodou, následně alkoholem a usuší se teplým vzduchem. [18;19;29]

Následuje chemické leptání, popřípadě v některých případech i elektrolytické. Leptání se provádí různými druhy leptadel v závislosti na zkoumaném materiálu a zkoumané strukturní složky. Nejčastěji však za použití letadel s 2 – 5 % roztoku kyseliny dusičné v alkoholu. [18;19]

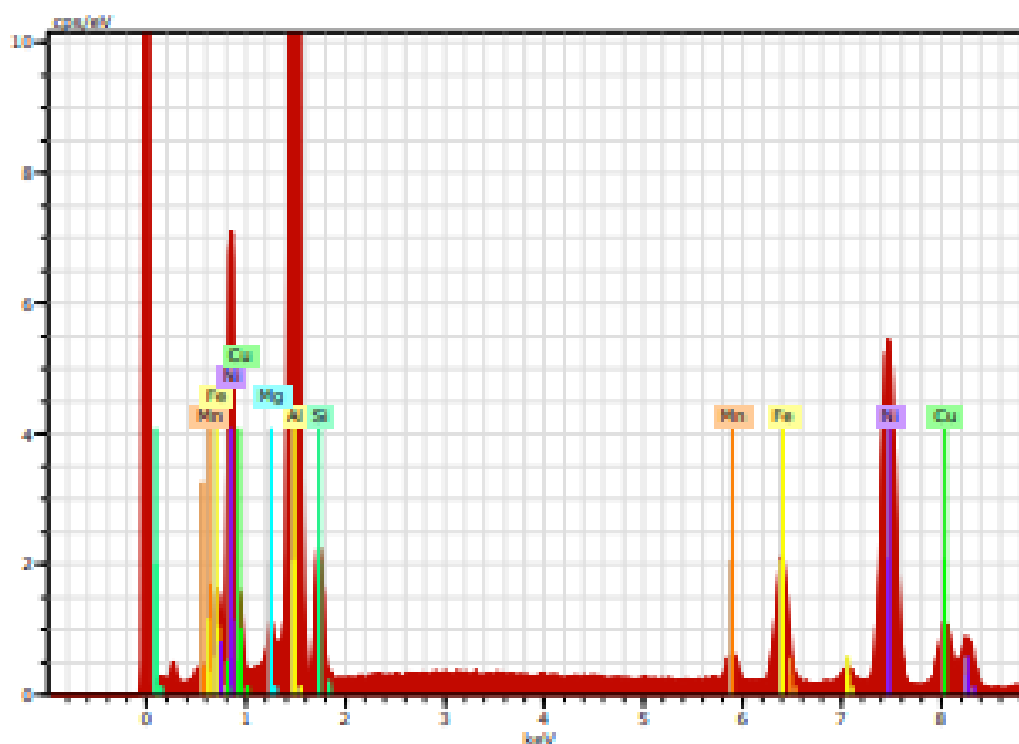
Mikroskopická a makroskopická zkouška se provádí dle normy ČSN EN ISO 17639. Makroskopická kontrola se provádí za účelem pozorování vzorku ve skutečné velikosti nebo při malém zvětšení (max.30 x). V případě svarových spojů se po vybroušení, vyleštění a naleptání povrchu vzorku používá k hodnocení tvaru svaru a způsobu kladení svarových vrstev, odmísení svarového kovu, tvaru, šířky a charakteru tepelně ovlivněné oblasti, spojitost svarových housenek apod. Vzorek se zpravidla pozoruje v příčném řezu a zahrnuje svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast a základní materiál. Stejně jako makroskopická zkouška, tak i mikroskopická zkouška je prováděna na vzorcích, které jsou orientované příčně k ose svaru. Slouží k pozorování vhodně připraveného povrchu vzorku odebraného ze zkušebního materiálu pod mikroskopem při maximálním zvětšení až 2000 x. Pro takové zvětšení a přesné zobrazení struktury se jako nejvhodnější mikroskopy jeví mikroskopy elektronové. Kontrolou lze pozorovat jednotlivá zrna materiálu, hranice zrn, tepelně ovlivněnou oblast a hlavně strukturní složky v materiálu svaru. [19;12;18;29;44]

2.5 Měření chemického složení materiálů (EDS)

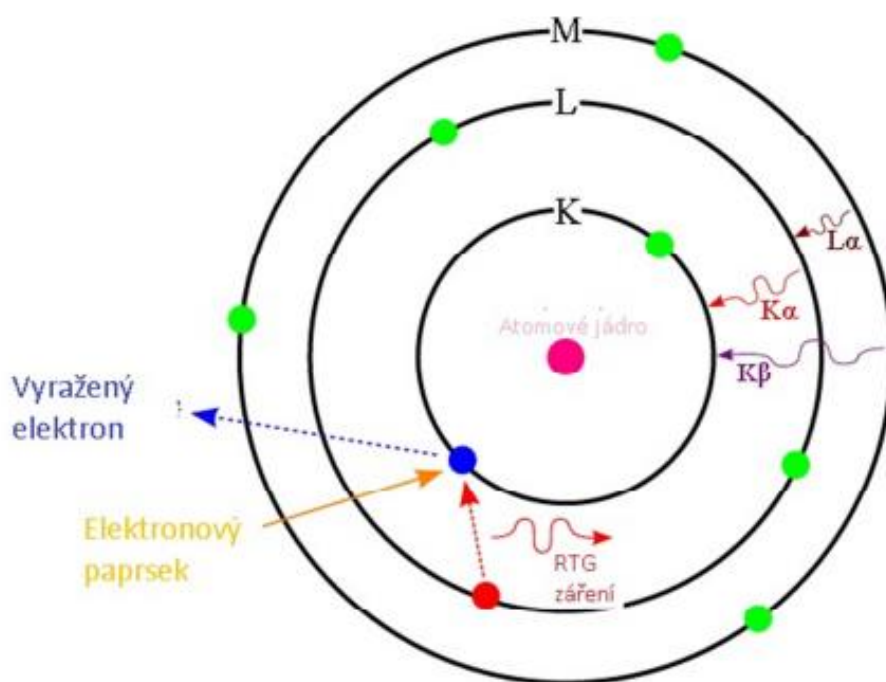
Energiově disperzní spektrometr (EDS) se používá jako přídatné zařízení k různým druhům řádkovacích mikroskopů. Smyslem kvalitativní bodové mikroanalýzy je buď v mikroobjemu o velikosti několika málo μm^3 prokázat přítomnost určitého, předem vytypovaného prvku, nebo provést spektrální analýzu. EDS slouží, k rychlému určení chemického složení vzorku a s využitím standardů i semikvantitativního složení vzorku. Při dopadání primárních elektronů na povrch vzorku vzniká rentgenové záření, jehož detekce je zajištěna EDS. Výstupem analýzy je pak spektrum četnosti rentgenového signálu v jednotlivých energetických oknech, což jsou charakteristické píky (obr. 17), které odpovídají jednotlivým prvkům a jejichž výška je úměrná koncentraci daného prvku v měřeném vzorku. Přednosti EDS jsou především jednoduchá obsluha, rychlé a přehledné zpracování naměřených dat a možnost přesně srovnávat získané spektrum nebo jeho část s polohou hlavní spektrální čáry, nebo spektrálních čar hledaných prvků. [2;31;34]

Při ozáření materiálu elektrony vzniká rentgenové záření, které je vyvoláno vzájemným působením elektronů na materiál. Toto RTG záření dosahuje pro každý prvek jisté specifické energie, která je užita k identifikaci prvků obsazených ve vzorku. Buzení rentgenového záření se dělí na spojitě brzdné záření a záření charakteristické pro určité prvky. Brzdné záření vzniká brzděním primárních elektronů ve vzorku. Charakteristické RTG záření prvků vzniká, pokud jsou zásahem primárních elektronů vyraženy jednotlivé elektrony vnitřních slupek atomu. Ty jsou pak nahrazeny elektrony z vyšších energetických hladin a rozdílná energie je zobrazena ve

formě záření. Tyto energie je charakterizována pro každý jednotlivý prvek (tento děj je zobrazen na obrázku 18). Na příkladném analyzátoru se brzdné zařízení podílí na spojitém pozadí a charakteristické záření prvků obsažených ve vzorku tvoří peaky. [2;31;34]



Obr. 17 Příklad záznamu bodové EDS analýzy [2].



Obr. 18 Interakce proudu elektronů s atomy zkoumaného materiálu [2].

2.6 Nebezpečí napětí a deformace svarů

Vytvořením svarového spoje sebou nese i spoustu možných úskalí. I přesto, že při svařování nepůsobíme vnějším tlakem, v důsledku teplotního účinku svařovacího procesu vznikají svarová napětí. Napětí vzniká ve díky přívodu energie do místa vytváření svarového spoje a sdílením tepla do okolního základního materiálu. Deformacím a napětím vznikajícím při procesu sváření nijak zcela zabránit, jelikož je to doprovodný děj u svařování. To však neznamená, že tento nepříznivý jev za pomoci technologických a konstrukčních úprav nemůžeme účinně ovlivnit. Napětí vznikající v okolí svaru a v jeho bezprostřední blízkosti nazýváme jako aktivní. V důsledku tuhosti vznikají reaktivní napětí, jako reakce na aktivní napětí. Vnitřní napětí obvykle rozdělujeme do tří hlavních skupin. [4;21;26;38]

- Podle charakteru vzniku:
 - teplotní – vlivem nerovnoměrného ohřevu,
 - strukturní – vlivem časového posuvu fázových transformací v různých elementech materiálu.
- Podle doby existence:
 - přechodná – působí v materiálu po určitou dobu,
 - zbytková – zůstávají v materiálu i po dokončení svařovacího procesu.
- Podle oblasti působení:
 - makronapětí (napětí I. druhu),
 - mikronapětí (napětí II. druhu),
 - ultramikroskopická napětí (napětí III. druhu).

Tepelná energie přivedení do místa svaru má za důsledek vytvoření nestacionárního teplotního pole tj. teplota T v určeném bodě tělesa s vlastními souřadnicemi (x, y, z) , je také funkcí času t . Jestliže se jedná o případ tepla bez vnitřních zdrojů, určíme teplotu za pomoci rovnice [21]:

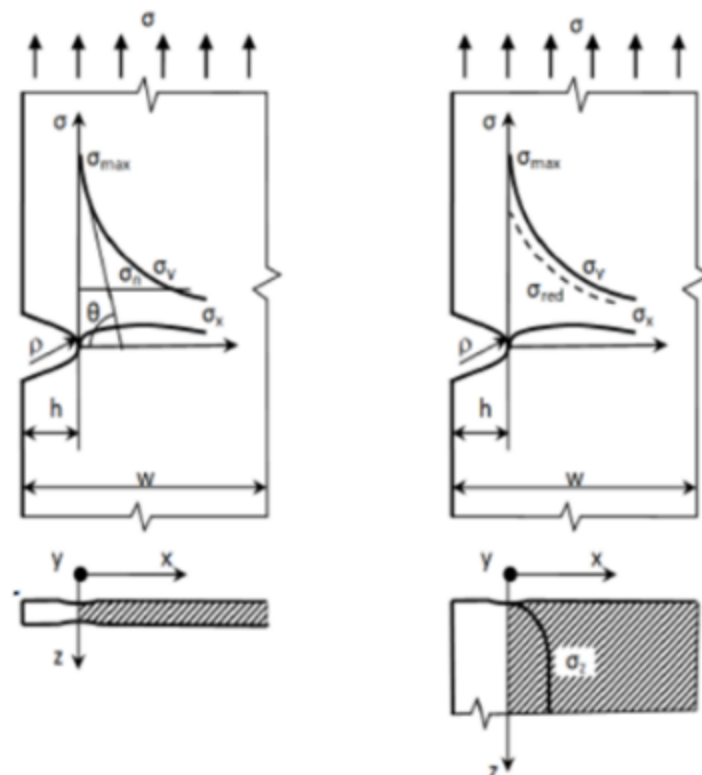
$$T = f(x, y, z, t) \quad (2.6)$$

Podle geometrie a způsobu působení tepla na svařované součásti, rozdělujeme případy sdílení tepla a charakteru teplotních polí do tří kategorií:

- vytváření návaru na povrchu tlustostěnných částí,
- svařování tenkých desek,
- svařování stykové.

Pokud dojde k porušení soudržnosti materiálu, nazýváme dané místo lomem. K zabránění lomů a jejich eliminaci, je nutno mít dostatečné znalosti v oblasti lomové mechaniky, díky které pak dokážeme dané defekty identifikovat a předejít tak nepříznivým haváriím. Během vyhodnocování vlastností materiálů, stejně jako svarových spojů se vychází z předpokladů, že se zde během výroby mohou vyskytnout různé vady. V místech, kde se vada vyskytuje pak může dojít k rozšiřování trhlin, které mohou vést až do bodu, kdy dojde na daném místě k lomu. Mezi nejčastější místa, kde vznikají zdroje lomů strojních součástí, tak svarových spojů jsou náhlé změny tvaru (konstrukční vruby), poruchy struktury (strukturní vruby), přítomnost vlastních napětí I. druhu (doprovodné napětí v důsledku svařování) a degradace mechanických vlastností materiálu vlivem času. Ve všech místech s konstrukčním nebo strukturním vrubem dochází k iniciaci trhlin. Vrub jako nežádoucí část funguje v místě jako koncentrátor napětí, tudíž zvyšuje napětí a zároveň s tím spojenou napjatost v daném místě. Jak se např. chová jednoosé

tahové napětí σ při výskytu vrubu na desce, kdy se vlivem vrubu změní jednoosá napjatost na víceosou napjatost vidíme na obr. 19. Jako praktický model se používá „tenké“ (malá tloušťka) a „tlusté“ (velká tloušťka) těleso kde předpokládáme příslušné napětí. [38;21;26;5]



Obr. 19 Průběhy napětí v kořeni vrubu pro tenké a tlusté těleso [21].

Uvažovaný stav rovinné napjatosti (RN) pro tenké těleso můžeme předpokládat nulový:

$$\sigma_z = 0 \quad (2.4)$$

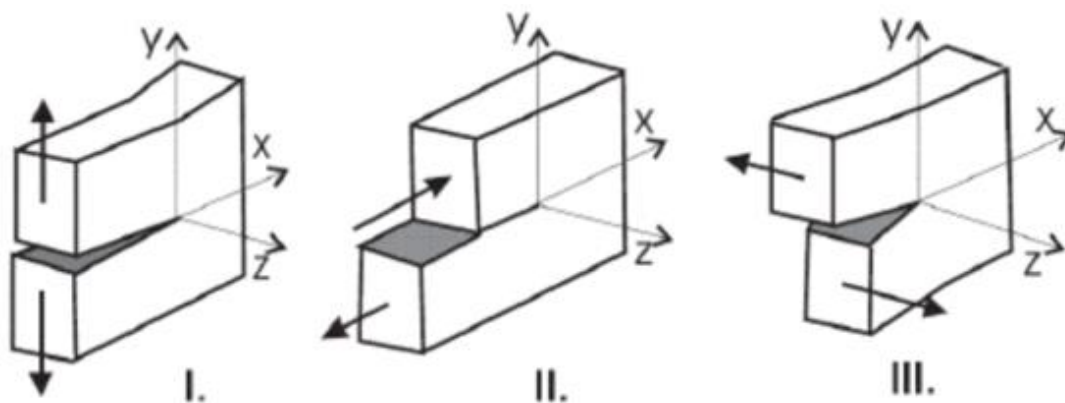
Zatím co stav rovinné deformace (RD) pro tlusté těleso uvažujeme vztahem:

$$\varepsilon_z = 0 \rightarrow \sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y). \quad (2.5)$$

Trhliny v tělese lze obecně považovat za vruby s maximální ostrostí, a to s poloměrem křivosti $\rho \rightarrow 0$. Zatěžování trhliny dle druhu namáhání se rozdělují do třech základních módů (viz. obr. 20) zatížení vrubu:

- I. Normálový (tah, ohyb) – kolmé lomové napětí na lící plochy trhliny (nejčastější),
- II. Podélný smyk,
- III. Příčný smyk.

Navrhované konstrukční řešení součástí tak musí vykazovat vysokou odolnost vůči dvěma nejdůležitějším mezním stavům únosnosti. Mezi tyto stavy předpokládáme jak možnost výskytu houževnatého, křehkého nebo smíšeného lomu, tak i lomu vzniklého únavou materiálu a lomů vzniklých rázem [3;21;26;41].



Obr. 20 Módy zatěžování vrubu [41].

2.6.1 Křehký lom

Vzniká při napětí pod mezí kluzu R_e materiálu, není z něho tedy patrná plastická deformace. Porušení místa lomu je obvykle koncentrované od středu lomové plochy. Lom vzniká procesy transkrystalického (lom probíhá skrze zrna) zejména u houževnatého lomu a interkrystalického (lom probíhá po hranicích zrn) především u křehkého porušení, což je způsobeno tím, že makroskopická deformace vznikající za nízkých teplot je velmi nízká bez smykového napětí. Při porušování materiálu hovoříme o stabilních a nestabilních lomech. Pokud je zapotřebí k šíření trhliny přivádět energii k překonání odporu materiálu proti jejímu růstu z vnějšku hovoříme tak o stabilním lomu. Naopak pokud je energie akumulována pouze v materiálu, hovoříme o lomu nestabilním (nepotřebuje přívod energie). Poruší-li se součást v celém jejím průřezu se vznikem a šířením trhliny, hovoříme tak o lomu. Každý z nestabilních lomů se z hlediska makroskopického bere jako křehký. Křehké porušení součásti můžeme posuzovat ze tří hlavních stádií [6;19;4;41]:

- iniciace lomu – počátek nestabilního růstu trhliny,
- šíření lomu – trhlina u určité rychlosti je závislá na přívodu energie a odporu materiálu proti šíření trhliny,
- zastavení lomu – nasává, když má materiál vhodné vlastnosti nebo při vlivu vnějších podmínek.

Všechna stadia vznikají za různých fyzikálně-metalurgických a mechanických zákonitostí. Při návrhu konstrukce součásti, musíme brát zřetel na napětí a lomovou mechaniku. Nejčastěji předpokládáme křehký lom v místě svaru, nebo v jeho těsné blízkosti. Příčiny zodpovědné za porušení součásti v místě svaru [19;3;4;41]:

- vady ve svarovém kovů důsledkem nekvalitního svařování a s tím i doprovodný pokles plasticity
- trhliny v TOO, jak v přechodovém pásmu na hranici mezi SK a ZM
- v TOO dochází k hrubnutí zrna a tím ke snížení houževnatosti materiálu (jelikož dochází u svarů k velkému přívodu tepla, používá se normalizační žhání)
- vrubová houževnatost přídavného materiálu (PM) a ZM
- vyčerpání tvárných vlastností kovu u kořene trhliny
- zbytková tahová napětí v okolí svaru

Při návrhu svařovaných konstrukcí nelze zanedbat jakýkoliv druh nebo typ vad, ale díky dobře zvolenému technologickému postupu můžeme značně eliminovat počet vad na minimum.

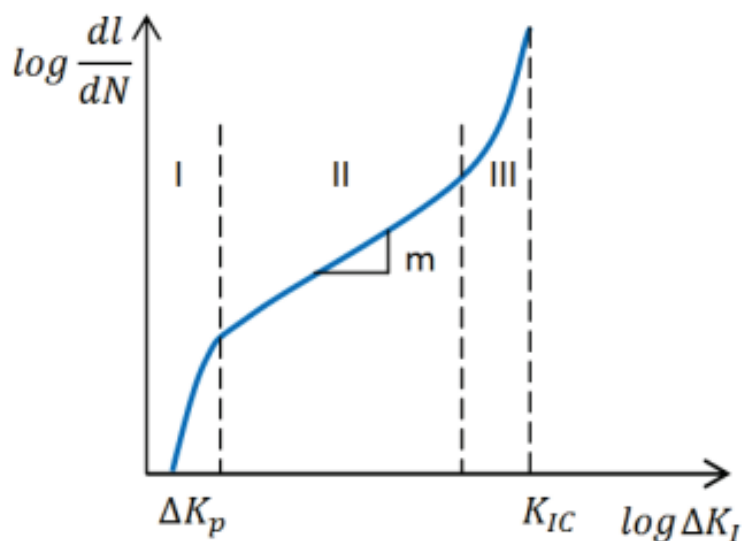
2.6.2 Únavový lom

Ve strojírenství jsou součásti a konstrukce často vystavené působení časově proměnnému (cyklickému) zatížení. V důsledku takového zatížení dochází k poškození v mikroobjemu materiálu. Se zvyšujícím se počtem cyklů dochází ke kumulaci poškození a k lomům dochází už při napětím nižším, než je konvenční mez kluzu R_e . Cyklické zatěžování je možné rozdělit do dvou základních kategorií, a to na determinitické a náhodné zatížení. [19;3;4;41]

Příčinou vzniku únavových mikrotrhlin je důsledek nehomogenity materiálu, díky kterému dochází k nárůstu napětí. Únavová trhlinka vzniká nejběžněji na povrchu. Rozlišují se tři základní typy nukleačních míst [6;19;41]:

- únavová skluzová pásma,
- hranice zrn,
- rozhraní mezi základní maticí a vměstky.

Většina mikrotrhlin se brzy zastaví a neprotrhává dále do větší hloubky než několik desetin milimetru. Avšak některé rostou dále a navzájem se spojují s dalšími. Vznik a vzájemné spojování mikrotrhlin bývá často označováno jako iniciace únavových trhlin. Iniciace trhliny je ukončena, jakmile trhlinka dosáhne hloubky zhruba desetinásobku průměru středního zrna materiálu. Směr růstu trhlin se postupně mění do směru kolmého k největšímu hlavnímu napětí. V této etapě roste obvykle již jen jediná trhlinka, která se označuje jako magistralní trhlinka. V následné a poslední fázi únavového poškození dochází ke konečnému lomu. [1;19;3]



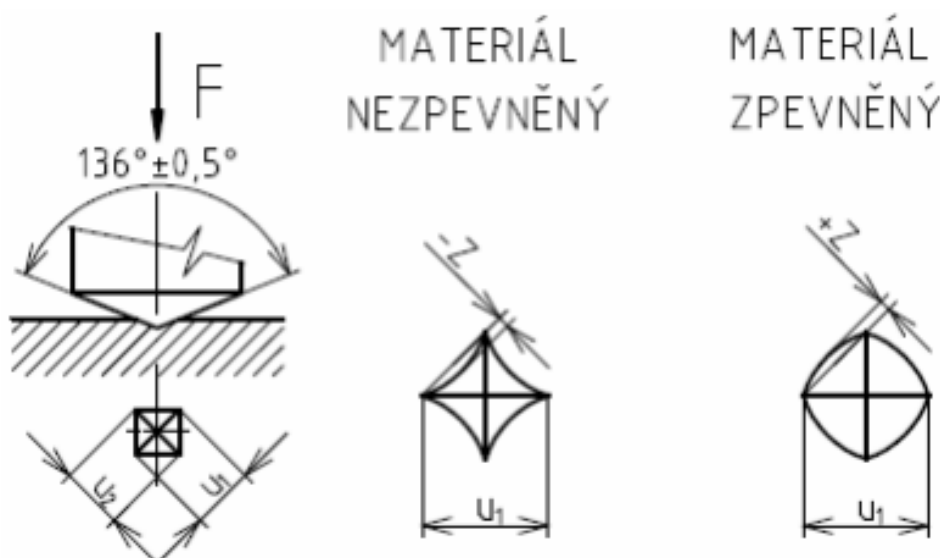
Obr. 21 Křivka, znázorňující rychlost šíření únavových trhlin [41].

Rychlost šíření únavových trhlin je závislá na faktoru intenzity napětí K_I . Křivka, která pak znázorňuje rychlost šíření únavových trhlin může být rozdělena do tří oblastí [19;1]:

- I. Prahová oblast – rychlost šíření únavových trhlin je nulová nebo velice malá. Na obrázku 21. je veličina ΔK_p rozkmit prahové hodnoty faktoru intenzity napětí. Pod touto hodnotou se únavové trhliny nešíří.
- II. Střední oblast – závislost rychlosti šíření únavových trhlin na faktoru intenzity napětí v logaritmických souřadnicích je téměř lineární.
- III. Nestabilní oblast – trhliny zde rostou velice rychle a následuje lom.

2.7 Zkouška tvrdosti dle normy ČSN EN ISO 6507-1

Jedná se o zkoušku měření tvrdosti, kde jako indentor vnikající do materiálu je použit diamantový jehlan o čtvercové podstavě s vrcholovým úhlem $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Úhel 136° byl navržen s ohledem na minimální tření mezi indentorem a plochou do které vniká. Vickersova metoda je velice přesná a používá se především pro laboratorní účely (kontrola, výzkum). Tvrdost podle Vickerse je podobně jako Brinellova zkouška vyjádřena poměrem působícího zatížení ku ploše vtisku. Zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 6507-1. Princip zkoušky a tvar vtisku je zobrazen na obrázku 22. [35]



Obr. 22 Princip Vickersovy zkoušky a deformace vtisku při měření [35].

Podmínky základní zkoušky jsou takové, že vtlačovaný indentor je do zkušebního materiálu vtlačován při zatížení 294 N. Doba působení zatížení je stanovena na 10 až 15 sekund. Při vyhodnocování zkoušky se měří pomocí mikroskopu délky obou úhlopříček vtisku a z naměřených hodnot se vypočte aritmetický průměr u . Hodnota tvrdosti podle Vickerse se určí ze vztahu [35]:

$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{u} \quad (2.7)$$

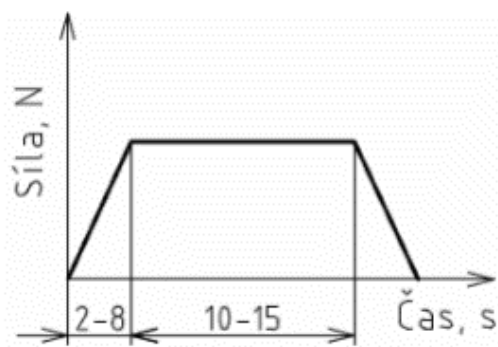
kde: F - Zatěžující síla [N]
 u - Úhlopříčka vtisku [mm]

Výhodou zkoušky je, že jí lze aplikovat jak na měkké, tak na tvrdé materiály a má pro ně jednotnou stupnici. Vtisky jsou malé, tudíž nedochází k velkému znehodnocení povrchu zkoumaného vzorku. Nevýhodou je však velká náročnost na kvalitu povrchu, zkoušeného (nejlépe jemně broušeného) materiálu a je nutno zamezit působení chvění a rázů na tvrdoměr. Metoda není vhodná pro hrubozrnné a heterogenní struktury, jelikož vtisk by mohl vzniknout právě v zrně některé z fází a zkreslit tak výsledek měření. Zatížení používané pro měření tvrdosti metodou dle Vickerse jsou uvedeny v tabulce 8. [35]

Tabulka 8 Hodnoty zkušebního zatížení pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse [35].

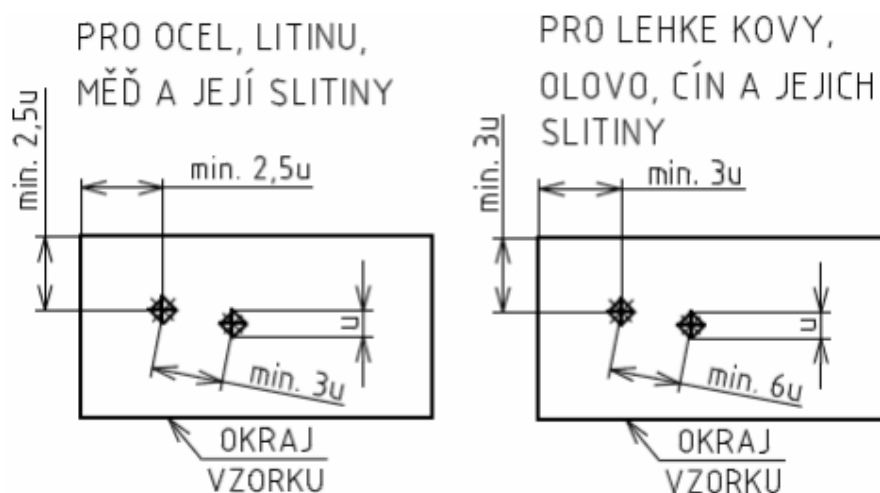
Značení tvrdosti	Normalizovaná hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03
HV 10	98,07
HV 20	196,1
HV 30	294,2
HV 50	490,3
HV 100	980,7

Zkouška se provádí při teplotě od 10 do 35 °C. V arbitrážních případech pak při teplotě $23 \pm 0,5$ °C. Povrch zorku musí být čistý, hladký bez mazadel a cizích vměstků na povrchu měřeného vzorku. Vzorek se v průběhu zkoušení nesmí pohnout. Indentor se musí zatlačovat kolmo ke zkoušenému povrchu, a to bez rázů a chvění. Doba mezi počátkem zatěžování a dosažením zátěžové síly musí být v rozmezí 2 až 8 vteřin. Doba působení zkušební síly pak musí být v rozmezí 10 až 15 vteřin (obr. 23). [35]



Obr. 23 Průběh zkušebního zatížení [35].

Norma určuje i minimální tloušťku měřeného materiálu, který je u slitin železa nejméně 1,2 a u jiných slitin až 1,5 násobek aritmetického průměru délek úhlopříček vtisku. Vzdálenost mezi sousedními vtisky a mezi vtisky a okrajem vzorku je dána dle normy a zobrazena na obrázku 24. [35]



Obr. 24 Minimální hodnoty vzdáleností mezi vtisky a mezi vtiskem a okrajem [35].

3 ANALÝZA A ŘEŠENÍ PRASKNUTÍ LOPATKY MÍCHADLA

Praktická část diplomové práce se zabývá především analýzou prasknutí axiálních lopatek míchadla a řešením daného problému. Zadavatel poskytl informace, že doposud došlo ke zlomení třech lopatek, kde u všech bylo místo lemu na přibližně stejném místě. Po zlomení první lopatky byla upravena její konstrukce, k porušení druhé lopatky došlo po třech a půl letech v provozu a lopatka (Obr. 25), která praskla už po půl roce používání. Pro experiment byly poskytnuty informace jak o materiálu lopatek, tak o jejich svařovacím procesu. Dodané lopatky stejně jako náboj, ke kterému jsou přivařeny, jsou vyrobené z austeniticko-feritické (duplexní) oceli s označením 1.4462 z produkce firmy Arcelor Mittal. Specifikace chemického složení použité šarže materiálu je zobrazena v tabulce 9. (Převzato z poskytnutého inspekčního certifikátu 2012-108647 viz. příloha 3) a porovnává s normovaným složením chemickým složením austeniticko-feritické oceli 1.4462, včetně procentuálního zastoupení feritu ve struktuře, změřeného za pomoci diagramu WRC-1992, který činí 23 %.

Tabulka 9 Chemické složení materiálu z certifikátu 2012-108647 (atest).

Chemický prvek	(C)	(Cr)	(Mn)	(Si)	(P)	(S)	(Ni)	(N)	(Mo)
Výskyt [%] /atest	0,018	22,1	1,82	0,30	0,026	0,0005	4,9	0,166	2,51
Max. výskyt [%] / norma	0,030	22,0	2,00	1,00	0,030	0,015	5,00	0,18	3,2



Obr. 25 Lopatka axiálního míchadla sádrovcové suspenze.

Stejně jako poskytnuté chemické složení svařovaných materiálů, byl poskytnut i svařovací plán, dle kterého se součásti svařovali. Svařovací plán 03-044/13 (příloha 8) poskytuje informace o použitém svařovacím drátu, kde z teoretické části předpokládáme svařovací drát o co nejbližším

chemickém složení jako je základní materiál. Ze svařovacího plánu je zřejmé, že součásti byly svařovány za použití trubičkového drátu s označením 1,2 T2312LRC (DW-309L), jehož chemické složení je uvedeno v tabulce 10 (převzato z Inspection Certificat KO13-137, Kobelco Welding of Europe).

Tabulka 10 Chemické složení svařovacího drátu 1,2 T2312LRC (atest).

Chemický prvek	(C)	(Cr)	(Mn)	(Si)	(P)	(S)	(Ni)	(N)	(Mo)
Výskyt [%]	0,022	24,25	1,21	0,60	0,021	0,003	12,4	0,019	0,11

Jako další poskytnuté materiály byly dodané postupy svařování jak pro přivaření náboje, tak pro přivaření lopatky k náboji viz příloha 4 a příloha 5. Pro praktickou část je zapotřebí pracovat především se druhým zmíněným postupem, jelikož v jehož místě došlo k defektu lopatky. Z daného protokolu lze vyčíst použitou metodu svařování, tedy metodu 136 dle EN ISO 4063 (Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu) a další parametry svařování jako jsou proud, napětí, použití přídavný materiál, ochranný plyn (CORGON 18) s obsahem argonu 82 % a oxidu uhličitého 18 %, teplotu předehřevu a teplotu interpass. [37]

Pro druhou lopatku byl taktéž dodán svařovací plán pro přivaření náboje na lopatku, které bylo provedeno ve stejné firmě jako již zmíněná lopatka, avšak se změnou některých parametrů procesu. Svařovací metoda pro tuto lopatku byla použita 135 dle EN ISO 4063 (Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu – MAG). Z dodaného svařovacího postupu (příloha 7) je zřejmé, že pro tento svar už nebyl použit trubičkový drát, ale lepší varianta drát OK Autrod2026 1,2mm, jehož chemické složení můžeme vidět v tabulce 11 (Převzato ze Zkušební zprávy ESAB). [36;37]

Tabulka 11 Chemické složení svařovacího drátu OK Autrod2206 1,2mm (atest).

Chemický prvek	(C)	(Cr)	(Mn)	(Si)	(P)	(S)	(Ni)	(N)	(Mo)
Výskyt [%]	0,011	22,7	1,5	0,5	0,015	0,002	8,5	0,17	3,2



Obr. 26 Zlomená lopatka.

Stejně tak jako použití jiného drátu a metody, pro tuto lopatky bylo použito i jiného ochranného plynu při svařování a to plynu Cronigon 2 (ČSN EN ISO 14175 : M12-ArC-2,5), změnou parametrů svařování, vynechání teploty předehřevu a zvýšení teploty interpass na 150 °C, vše uvedeno viz příloha 4.

Jelikož došlo k defektu obou lopatek, přičemž pro obě byla použita jiná metoda svařování, svařovací parametry, přídatný materiál a další. Je provedena experimentální metoda pro obě lopatky.

3.1 Příprava vzorků z první lopatky

Pro provedení experimentu bylo zapotřebí provést výřezy z lopatek v místech lomu pro další analýzu. Oddělení bylo provedeno za pomoci vodního paprsku, přičemž zhotovené výřezy jsou zdokumentovány na obrázku 27 a obrázku 28. Na vzorcích byla označena místa, pro odebrání vzorků pro další analýzy s jejich dalším označením A1 až A4 a B1 až B4. Podle těchto označení se vzorky použijí pro další práce.



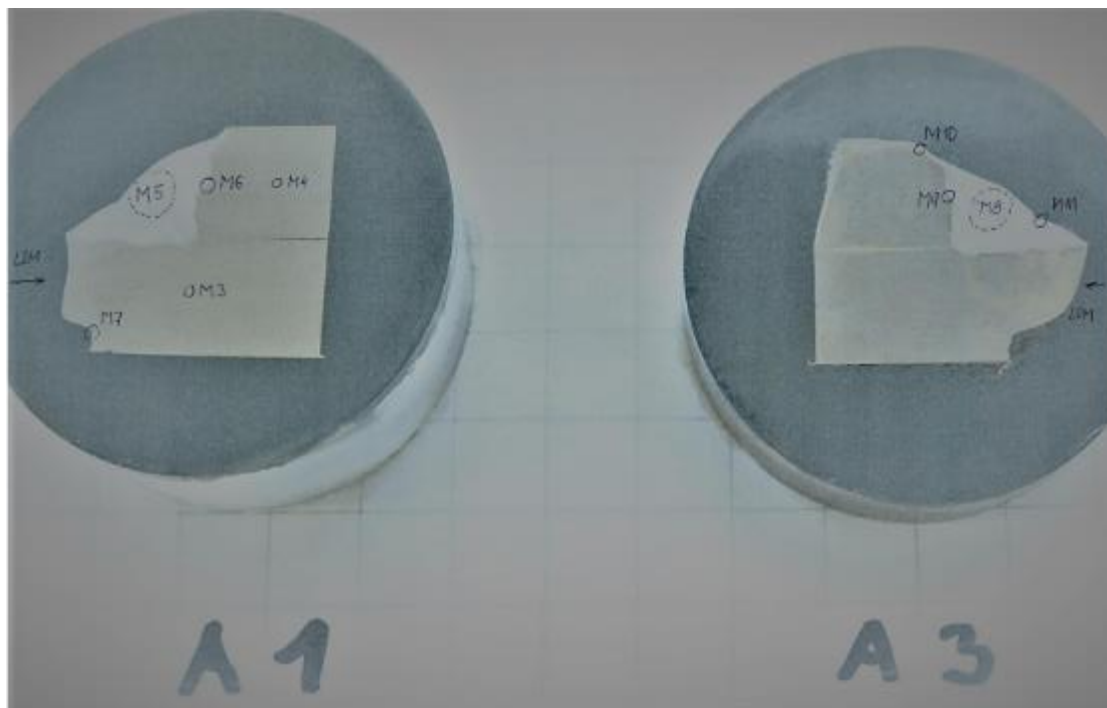
Obr. 27 Výřez části lopatky A.



Obr. 28 Výřez části lopatky B.

Pro rozbor mikrostruktury byly použité vzorky s označením A1, A3 a B3, B4. Vzorky pak byly rozřezány na metalografické pile Labodom – 5. Z důvodu nepříznivého tepelného ovlivnění, byl celý proces dělení, doprovázen intenzivním chlazením místa řeznou chladicí kapalinou. Za pomoci lisu pak byly vzorky zalisovány do tabletek s příslušným označením místa pro pořízení fotodokumentace viz. obr 29. Analyzované plochy výbrusů vzorků byly připraveny k měření broušením za mokra a leštěním diamantovými pastami. Pro vyvolání vyskytujících se mikrostruktur bylo použito leptadlo Beraha II. Po dokončení přípravy se vzorky umístili na světelný mikroskop Axio Zeiss, kde byly pořízeny a následně vyhodnocovány vzniklé snímky. Na vzorcích s označením A4, B1 a B2 byl realizován fraktografický

rozbor, přičemž bylo použito odrazu sekundárních a odražených elektronů na stroji REM XL30 Phillips, který je vybaven i EDS Oxford, vhodným pro změření chemického složení vzorků.



Obr. 29 Vzorky s označením míst určených pro fotodokumentaci.

3.2 Vyhodnocení experimentální metoda pro první lopatku

Pro získání chemického složení bylo na vzorku A1 provedeno EDS základního materiálu a svarového kovu, naměřené hodnoty koncentrací substitučních prvků jsou pak uvedeny v tabulce 21. Z hodnot je patrné, že v přibližných mezích možných chyb (především EDS) a rozdílných typech analýz byly potvrzeny hodnoty příslušných chemických složení blízkých dodaným atestům.

Tabulka 12 Chemické složení ZM a SV vzorku A1.

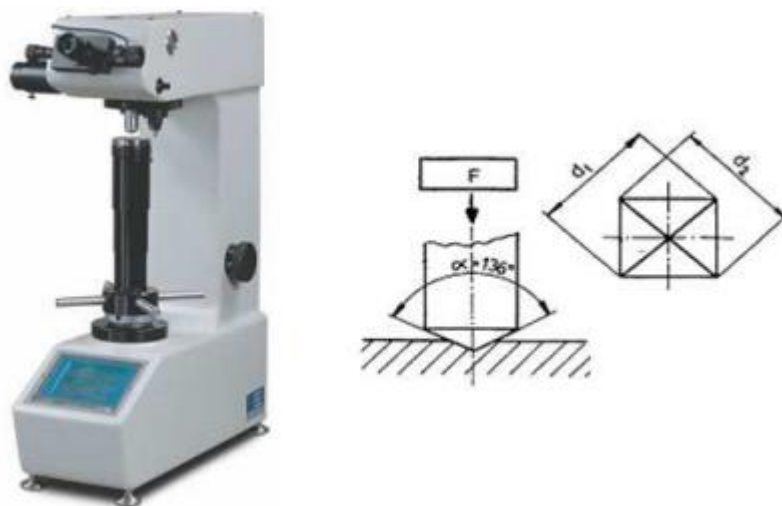
Materiál/Zdroj	Obsah uvedených prvků v hm. %								
	(C)	(Cr)	(Mn)	(Si)	(P)	(S)	(Ni)	(N)	(Mo)
ZM/EDS*	-	22,38	2,05	0,44	-	-	4,99	-	2,64
SV/EDS**	-	23,4	1,6	0,9	-	-	10,6	-	1,3

- hodnoty pod mezí detekovatelnosti metodou EDS

*) hodnoty získané z průměru 4 analýz

**) hodnoty získané z průměru 6 analýz

Stejně jako měření chemického složení, tak bylo na ploše výbrusu vzorku A1 realizováno měření tvrdosti. Tvrdost vzorku byla měřena na tvrdoměru LV 700 Leco (obr. 30). Zkouška tvrdosti podle Vickerse byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Průběh zkoušky spočívá v vtlačování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu (s daným vrcholovým úhlem) zatěžující silou F po zvolený čas. Po zatížení, které je prováděno kolmo k ploše, se vyhodnocuje střední délka vtisku u obou úhlopříček. Přičemž zatěžující síla se může volit v rozmezí hodnot 10 – 1000 N a doba zatěžování od 10 do 180 s. Použité zatížení během zkoušky se píše do označení (např. HV 100). V experimentu bylo použito zatížení o velikosti 10 kg, což odpovídá síle o velikosti 9,81 N. Naměřené hodnoty na ploše výbrusu A1 pro základní materiál lopatky (ZM lopatky), základní materiál náboje (ZM – náboje) a svarový kov, jsou zobrazeny v tabulce 13. [16;24;35]



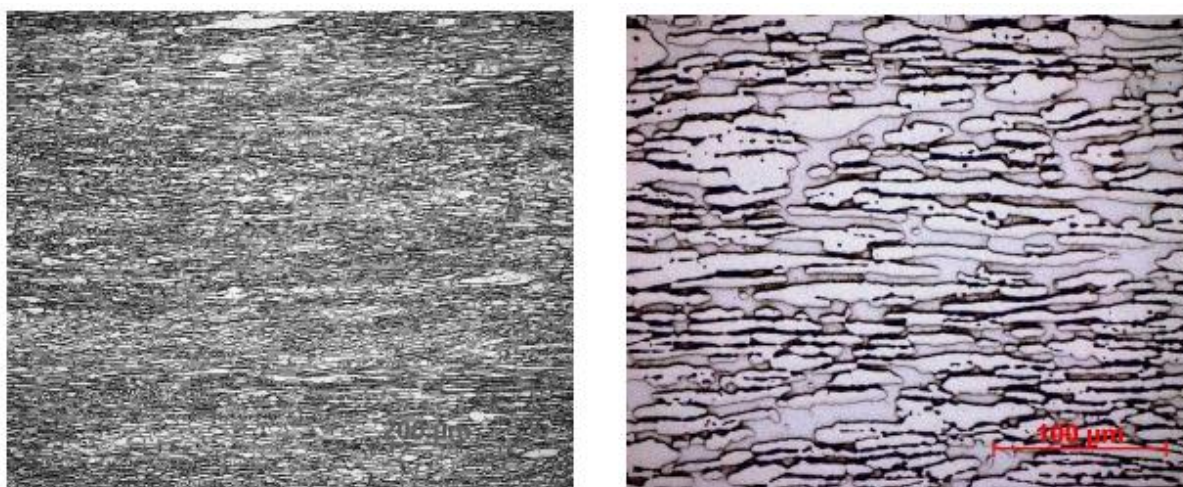
Obr. 30 Tvrdoměr LV 700 Leco [16;24].

Tabulka 13 Hodnoty tvrdosti HV10 ZM lopatky, ZM náboje a SK.

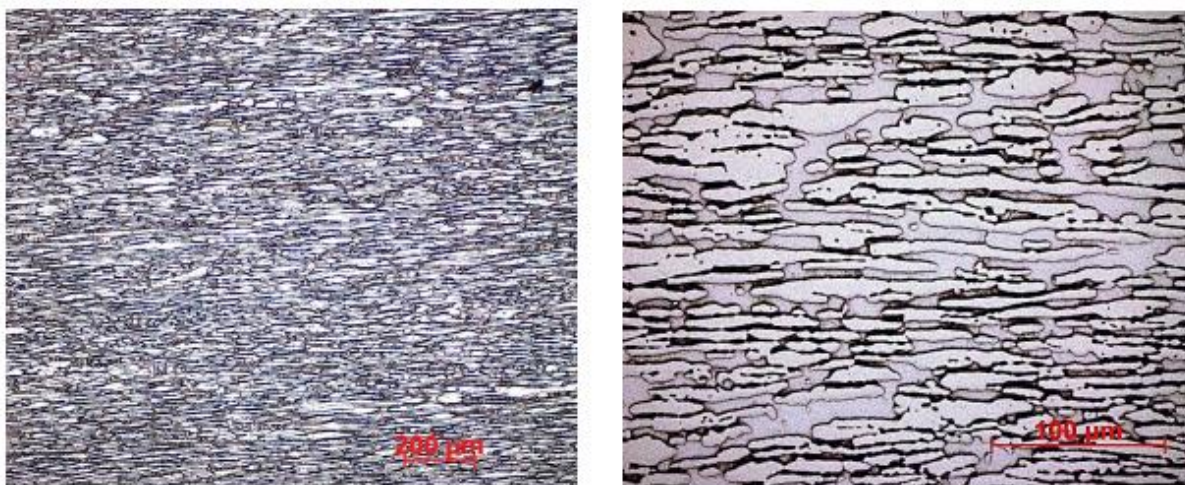
Plocha	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření	5. měření
ZM lopatky	240	236	-	-	-
ZM náboje	234	222	-	-	-
SK	273	236	253	262	239

Více hodnot měření pro ZM lopatek a ZM náboje nebylo potřeba, jelikož hodnota, která nás zajímá je hodnota tvrdosti svařovaného kovu. Z naměřených hodnot lze vyčíst, že nejspíše nedošlo v materiálu k rozpouštěcímu žíhání, kde předpokládáme tvrdost v hodnotách okolo 290HB (cca 305HV). Z uvedených hodnot HV10 je zřejmé, že nedošlo k vytvrzení materiálu lopatky (mikrotvrdost tepelně ovlivněné oblasti nebyla měřena vůbec).

Během měření mikrostruktury bylo pořízeno několik snímků (příloha 9), z nichž byla část použita k vyhodnocení mikrostruktury. Mikrostruktura tepelně neovlivněného základního materiálu lopatky je uvedena na obr. 31 a obrázku 32. (odpovídající označení na vzorku M1 a M2, pořízených ze vzorku B2 a B4, podélný a příčný řez).



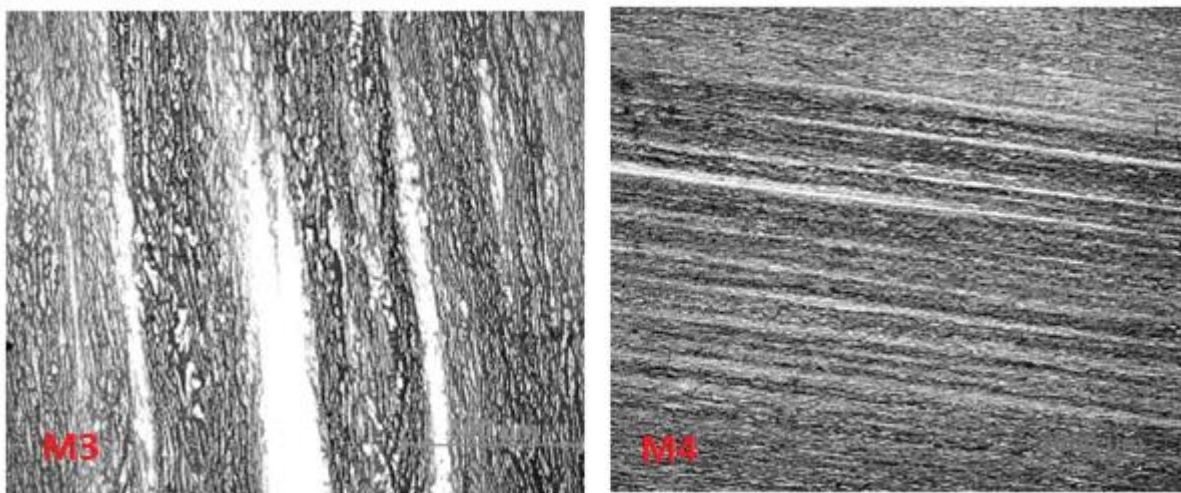
Obr. 31 Mikrostruktura vzorku B2 v místě označeného M1 (podélný a příčný řez).



Obr. 32 Mikrostruktura vzorku B4 v místě označeného M2 (podélný a příčný řez).

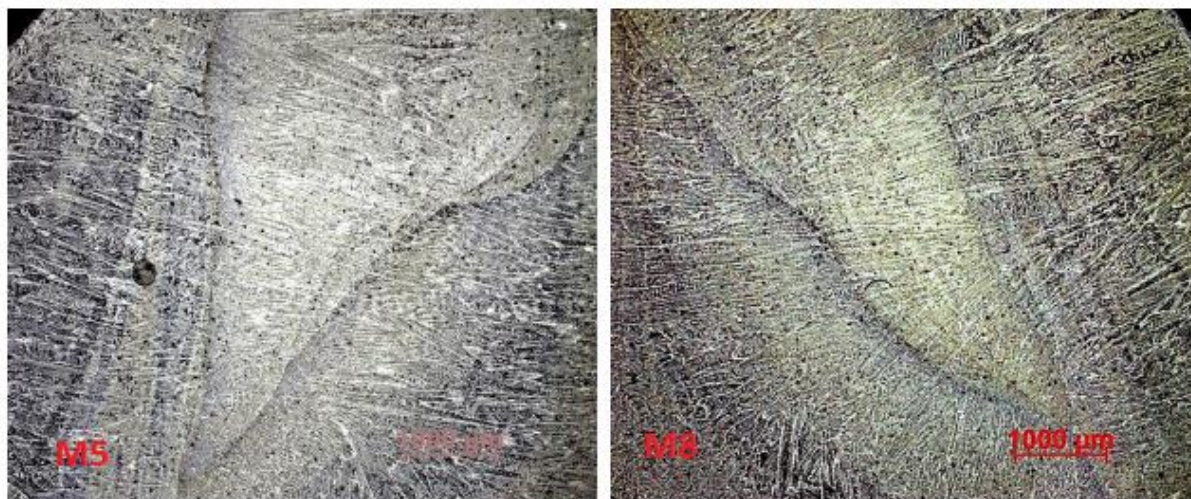
Zobrazovaná mikrostruktura u obou vzorků je dvoufázová tvořena obálkami feritu kolem austenitické fáze. Její orientace je usměrněná způsobem výroby plechu, a to ve směru tváření použitého plechu, přičemž austenit je hrubšího charakteru a vykazuje větší heterogenitu co se do velikosti týče.

Mikrostruktura lopatky a přivařené části náboje (vzorek A1), jsou zobrazeny na obrázku 33 (označení na vzorku M3 a M4). S porovnáním oproti předchozímu vzorku si lze navíc všimnout výskytu výrazně hrubých pásů austenitu.



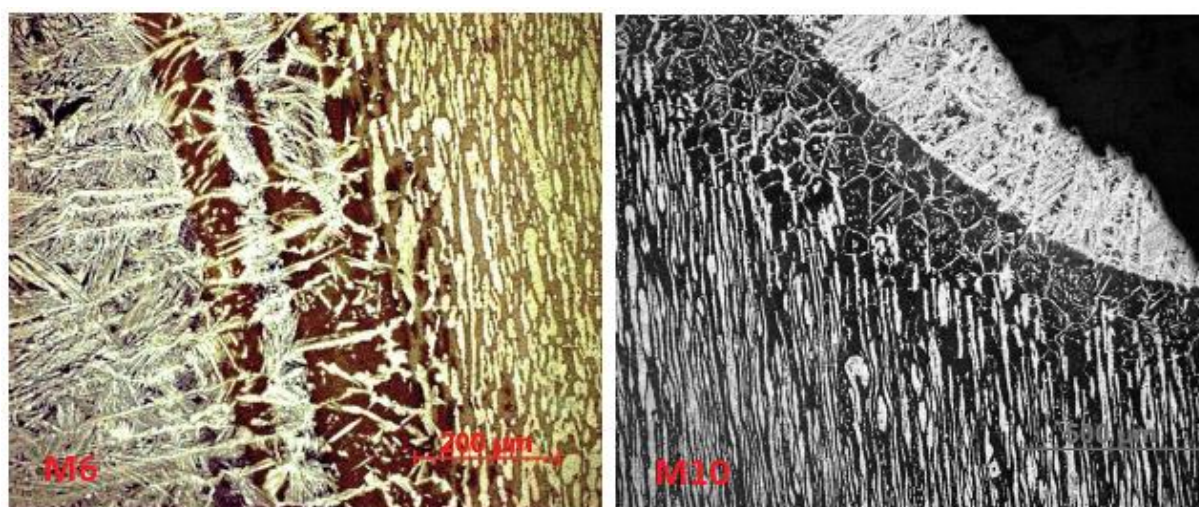
Obr. 33 Mikrostruktura vzorku A1 v místě označeném na vzorku M3 a M4.

Mikrostruktura svarového kovu tvořena z několika housenek je zobrazena na obrázku 34, pořízeného jednou ze vzorku A1 v místě označení M5 a v dalším případě ze vzorku A3 v místě označeném M8. V tomto místě, lze vidět svarový kov tvořen licí (dendritickou) strukturou austenitu s minoritním podílem delta feritu (δ feritu).



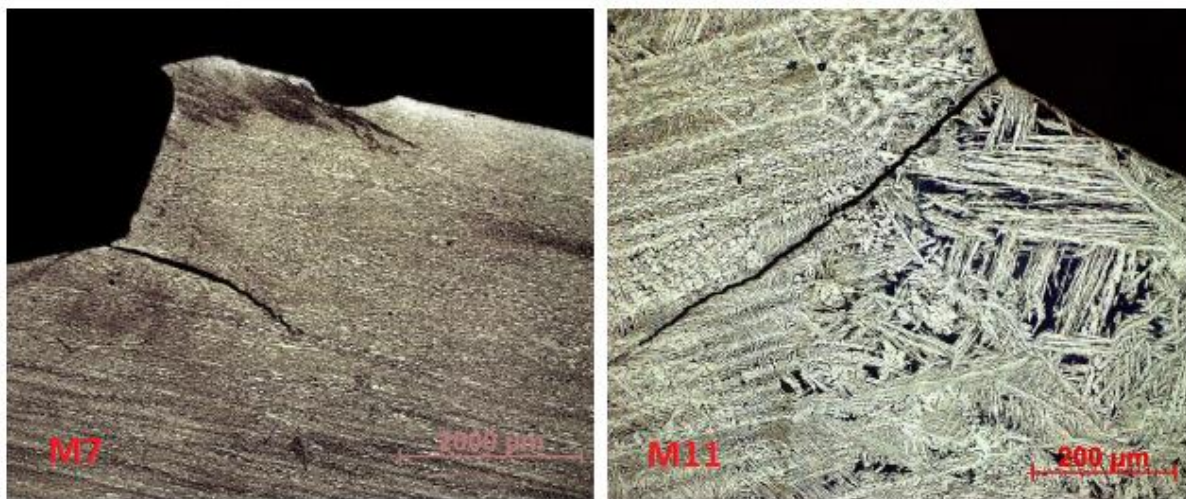
Obr. 34 Mikrostruktura vzorku A1 v místě M5 a vzorku A3 v místě M8.

Z dalších snímků lze pozorovat přechodové oblasti (části tepelně ovlivněné oblasti), nejspíše oblast natavení a přehřátí, mezi základním materiálem a svarovým kovem jsou zobrazeny na obrázku 35. pořízeného ze vzorku A1 v místě s označením M6 a na vzorku A3 v místě s označením M10. V těchto oblastech došlo nejpravděpodobněji k přeměně téměř veškerého austenitu základního materiálu na ferit. To má za důsledek, že mikrostruktura v této oblasti je tvořena převážně feritem a austenit se zde vyskytuje pouze jako forma obálek tohoto feritu. Toto zjištění je zcela nepříznivé, jelikož se jedná o výrazný strukturní vrub s možným negativním dopadem, a to zejména na houževnatost svarového spoje.



Obr. 35 Mikrostruktura vzorku A1 v místě M6 a vzorku A3 v místě M10.

V základním materiálu pak byla nalezena trhlina o velikosti více než 2 mm (obr. 36), nalezena na vzorku A1 v místě s označením M7. Tato trhlina, které je orientována kolmo k lomové ploše a její vnik byl pravděpodobně zaviněn únavovým mechanismem. Stejně jako na vzorku A1, tak na vzorku A3 byla nalezena trhlina (obr. 29) v místě s označením M11. Tato trhlina je však o menší délce než předchozí, a to zhruba o délce 0,7 mm vzniklá ve svarovém kovu. Vzniklá trhlina však nebyla vytvořena stejným mechanismem, ale patrně se jedná o trhlinu vzniklou za tepla.



Obr. 36 Trhlina na vzorku A1 v místě M7 a trhlina na vzorku A3 v místě M11.

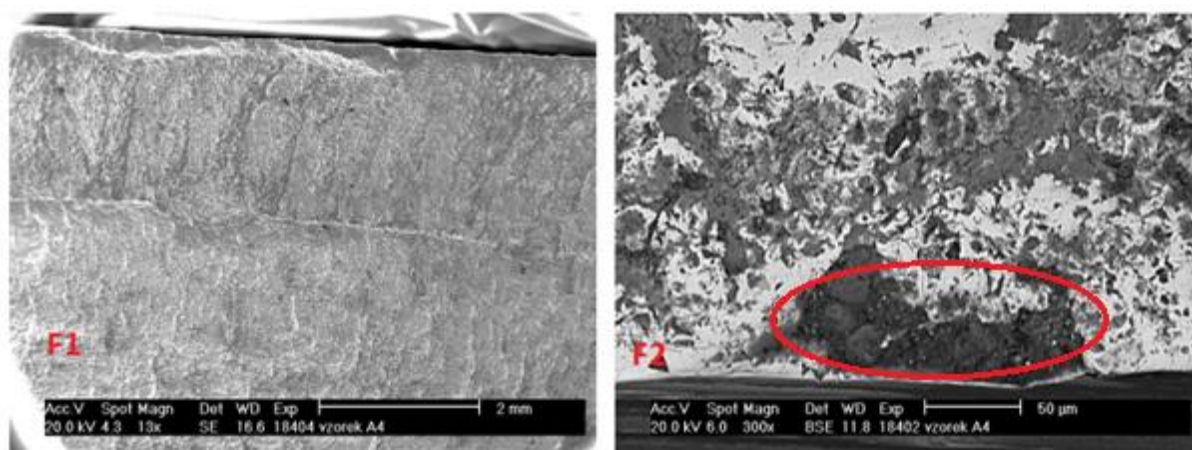
Z dodaných lopatek je na první pohled patrné, že se jedná o porušení lopatky, vzniklé únavovým mechanismem (obr. 37). Dále zde z doložených podkladů vypožarovat, že k iniciaci trhliny došlo minimálně ve dvou místech, a to z oblasti svaru vlastní lopatky a navažené desky náboje. Jak je uvedeno dříve pro fraktografické měření byly připraveny další vzorky. Pro detailní fraktografický rozbor s využitím obrazu sekundárních (SE) a zpětně odražených (BSE) elektronů byl proveden na vzorcích s označením A4, B1 a B3.



Obr. 37 Defekt lopatky vzniklý únavovým mechanismem.

- Vzorek A4

Jako jedno z možných míst iniciace bylo nalezeno na vzorku A4 v místě s označením F1 v detailu pak na F2 (obr. 38). Z umístění morfologie na obrázku detailu lze usuzovat, že lom se lokálně inicioval ze svarového kovu. Povrch lomové plochy v místě iniciace je pokryt úsadami s protonovým číslem menším, než má matrice na detailního snímku. Detekované tmavé úsady byly analyzovány metodou EDS a jejich střední hodnoty chemického složení z 5 analýz jsou zobrazeny v tabulce 14.

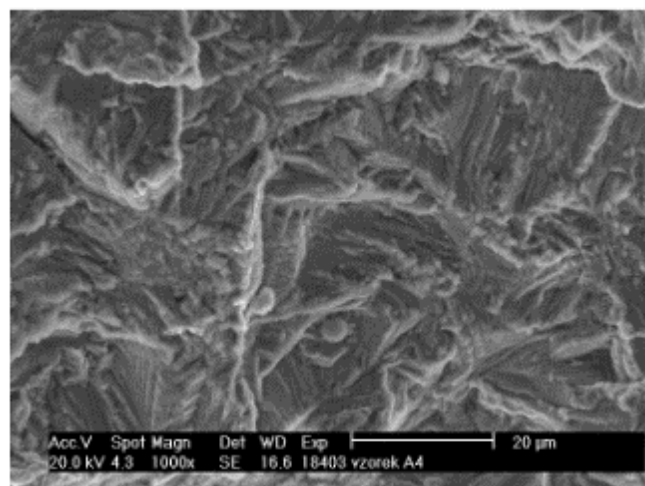


Obr. 38 Místo iniciace lomu na vzorku A4.

Tabulka 14 Chemické složení úsad zachycených na obr 31 v místě F2.

Prvek	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Mn	Ni
Výskyt [%]	1,2	8,1	12,3	0,5	0,4	5,8	0,6	1,1	8,6	0,5	0,2

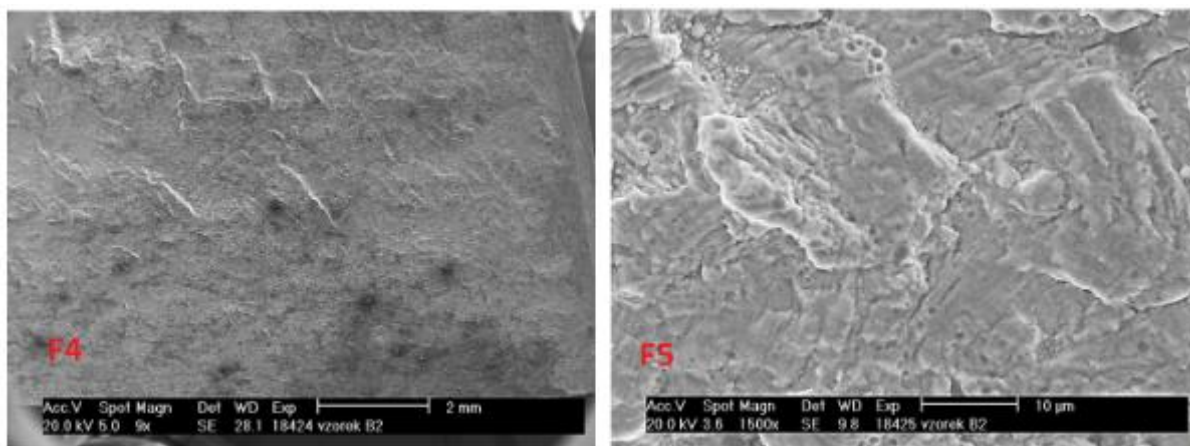
Úsady jsou tvořeny oxidy především Si, Al, Ca, Mg, Ti, ..., Fe, Cr a Mn odpovídají vybuzenému rtg. zařízení matrice. Jako jediným možným způsobem, jak by se takové prvky mohli dostat do svaru jsou struska z použitého svařovacího drátu, nebo výskytem trhliny již po svařování a vniknutím míchaného média (sádrovcové suspenze) do trhliny. Morfologie lomové plochy o velikosti zhruba 2 mm pod místem iniciace je zobrazena na obrázku 39, ta kopíruje strukturu v tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 39 Morfologie lomové plochy zhruba 2 mm pod místem iniciace.

- Vzorek B2

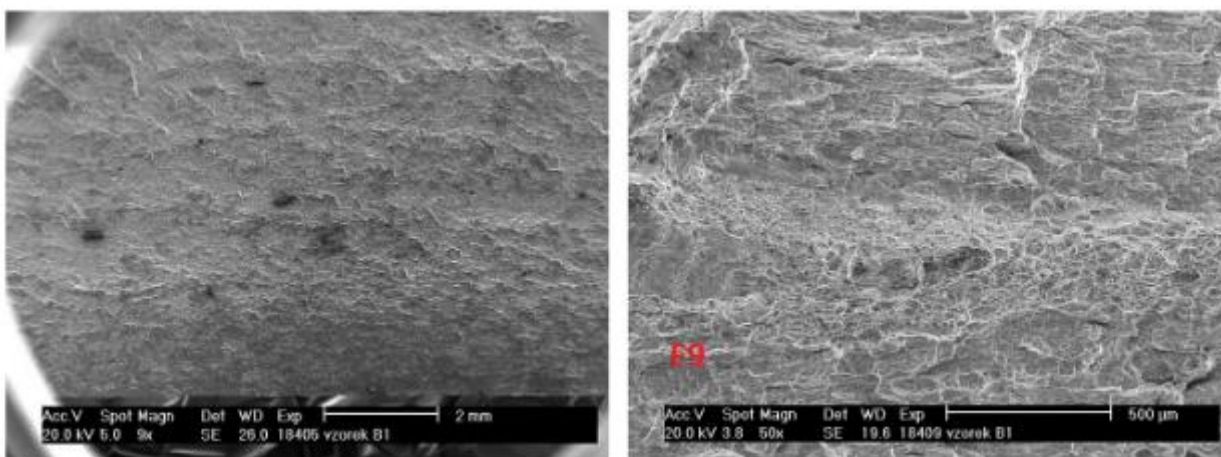
Hodnocená část lomové plochy se šířila z povrchu, který je zachycen na obrázku 40, jenž je pořízen ze vzorku B2 v místě s označením F4. Lom se šířil únavovým mechanismem, což je potvrzeno výraznými striacemi na snímku v místě F5 (obr.40).



Obr. 40 Lomová plocha na vzorku B2.

- Vzorek B1

Byl pořízen z konce lomové plochy (konce lopatky). Na lomové ploše daného vzorku lze pozorovat morfologicky odlišné oblasti (obr. 41). Větší horní – část lomové plochy vznikla únavovým mechanismem, jenž lze odvodit ze zdokumentovaných striací. Zbývá část lomové plochy vznikla tvárným mechanismem svědčícím o kvazistatickém dolomení lopatky (obr. 41) sledováno na vzorku B1 v místě s označením F9.



Obr. 41 Lomová plocha vzorku B1.

3.2.1 Zhodnocení lomu první lopatky

Zjištěné chemické složení materiálu lopatky i přivařeného plechu za pomoci metody EDS, odpovídá duplexní oceli s označením 1.4462. Ke svařování duplexních ocelí by se měl používat drát s chemickým složením blízkému základnímu materiálu, použití austenitické oceli povede k nižším mechanickým vlastnostem celého spoje a ke generaci vyšších zbytkových napětí v důsledku její vyšší tepelné roztažnosti. Ověřeno bylo i, že ke svařování byl použit drát s chemickým složením odpovídající drátu 1,2 T2312LRC (DW-309L). Tvrdost obou použitých plechů se pohybuje v rozsahu 222 – 246 HV₁₀ a odpovídá tak tvrdosti oceli po rozpouštěcím žihání. Avšak tvrdosti svarového kovu nabývají hodnot 236 – 273 HV₁₀, přičemž by naměřené veličiny měly dosahovat vyšších hodnot. Mikrostruktura obou plechů je tvořena feritem a austenitem s poměrem obou fází okolo 1:1.

K lomu lopatky došlo za pomoci únavového mechanismu, přičemž se únavová trhлина (trhlina) iniciovala ve svaru, případně v tepelně ovlivněné oblasti. Prvky nalezené ve svarovém kovu

pocházejí ze sádrovcové suspenze a zbytky strusky pouze v předpokládaném místě iniciace únavové trhliny (viz Obr. 31 a Tab. 13) nepřímou ukázkou, že v daném místě existovala povrchová trhlina již po svaření. Únavová trhlina o délce 2 mm ve vzorku A1 v materiálu lopatky vychází z konstrukčního vrubu a patrně iniciovala až jako sekundární. Trhlina ve svarovém kovu vzorku A3 pravděpodobně vznikla při svařování (tepelná trhlina). To opět ukazuje na možné místo iniciace únavové trhliny.

Struktura tepelně ovlivněné oblasti přiléhající ke svarovému kovu (pásma natavení, hrubozrnná oblast) tvoří ferit s obálkou austenitu po jeho hranicích. Tvrdost této části tepelně ovlivněné oblasti bude větší než v porovnání se svarovým kovem i základním materiálem = tato oblast bude výrazně křehčí než ostatní. K porušení tedy došlo v důsledku únavy materiálu, k oslabení únavové pevnosti přispěly faktory:

- ne zcela optimální volba přídavného materiálu,
- pravděpodobný výskyt trhlín ve svarovém spoji,
- nezanedbatelný vrub v TOO.

V případě existence trhlín ve svarovém spoji by bylo nutno zcela změnit pevnostní výpočet s cílem určit maximální velikost přípustných mezních trhlín svarů metodami lomové mechaniky.

3.3 Příprava vzorků z druhé lopatky

Stejně jako u předchozí lopatky bylo pro danou analýzu nutno zhotovit z poskytnutého materiálu lopatek odběrová místa, pro jednotlivé vzorky (Obr. 42). Místa byla označena čísly 3 a 4. Stejně jako u předchozí lopatky byly vzorky odebrány za pomoci vodního paprsku. Strukturní a fraktografický rozbor byly provedeny pouze na vzorcích odebraných z dodaného výřezu 4.



Obr. 42 Místa odběru pro vzorky.

Místa odběrů pro další pozorování jsou zobrazené na obrázku 43, ze kterých lze vypožarovat i místa odběru jednotlivých vzorků a jejich značení. Rozbor mikrostruktury byl proveden na vzorcích s označením 2, 3 a 5. Stejně jako u předchozích vzorků byly plochy výbrusů připraveny broušením za mokra a leštěním za pomoci diamantových past. Použité leptadlo k vyvolání mikrostruktur bylo také stejné jako u předchozí lopatky, a to Beraha II.

Mikrostruktury vzorků pak byly vyhodnocovány a dokumentovány na světelném mikroskopu Axio Zeiss.



Obr. 43 Místa odběrů pro vyhodnocení mikrostruktury.

Na vzorcích s označením 1 (lom) a 4 (lom2) byl proveden fraktografický rozbor, přičemž bylo použito opět stejné metody jako u předchozí lopatky (odrazu sekundárních a odražených elektronů REM XL300 Phillips, který je vybaven i EDS Oxford). Stejně tak byla provedena u vzorku výbrus 2 a výbrus 3 zkoušky tvrdosti podle Vickerse HV10 rozšířená o HV 0,5. Zkouška byla provedena na tvrdoměru LV 700 Leco.

3.4 Vyhodnocení experimentální části pro druhou lopatku

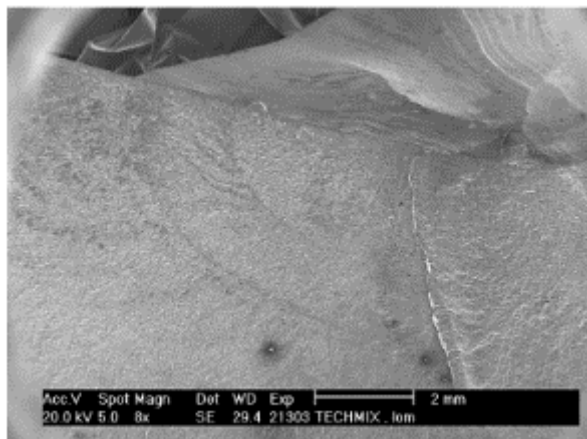
Pro měření tvrdosti byly vybrány dva výbrusy (výbrus 2 a výbrus 3). Z důvodu, že ve svařovacím drátu je vyšší obsah Ni, lze předpokládat vyšší obsah austenitu ve svarovém kovu v porovnání se základním materiálem. Proto bylo pro tuto část výbrusu 2 aplikováno zatížení o velikost HV0,5 namísto HV10 jako pro výbrus 2. Naměřené hodnoty na tvrdoměru jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15 Tvrdost výbrusu 3 a 4 při zatížení HV10 a HV0,5.

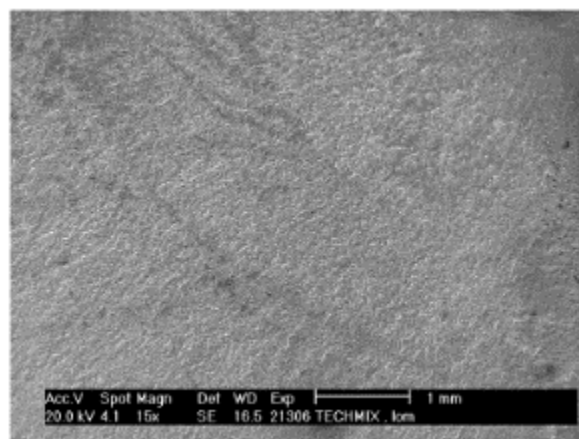
Vzorek	Oblast	HV10	HV0,5
Výbrus 2	ZM	247, 243, 243	-
	SK	262, 272, 270	260, 260, 257
	TOO	-	280, 277, 271
Výbrus 3	SK	-	256, 267, 259
	TOO	-	273, 279, 264

Tvrdost HV10 základního materiálu odpovídá stavu po rozpouštěcím žíhání. Tvrdost HV10 naměřena v oblasti svarového kovu je až o 30 HV10 vyšší, což koresponduje s odlišnou strukturou a vyšším obsahem niklu ve struktuře. Tvrdost HV0,5 v tepelně ovlivněné oblasti je ve srovnání s tvrdostí v místě svarového kovu zhruba o 10 až 20 HV0,5 vyšší.

Pro vyhodnocování fraktografické zkoušky byly lomové plochy natolik zoxidované, že nebylo účelné používat většího zvětšení, než bylo aplikováno. Lomová plocha zachycena na vzorku 1 (obr. 44) a následně i na vzorku 4 (obr. 45). V obou případech se jedná o lom způsobený únavovým poručením, což dokumentují takzvané postupové čáry, které je vidno především na obrázku 44. Stejně tak jsou ze snímku patrná místa iniciace únavových trhlin, K iniciaci únavových trhlin patrně došlo v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje, nebo trhlin a bublin ve svarovém kovu.



Obr. 44 Lomová plocha vzorku 1.



Obr. 45 Lomová plocha vzorku 4.

Z vyříznuté části lopatky označené číslem 3, nebylo potřeba vyřezávat vzorky pro mikrostrukturní analýzu. Z dodaného kusu bylo možno specifikovat lomovou plochu i bez dalších operací. Část lomové plochy na výřezu 3 vznikla únavovým mechanismem, kdy se trhlina šířila až do takové velikosti, že došlo k deformaci lopatky. V případě dolomení lopatky je vidět oblast, vzniklá po několika desítkách (stovkách) cyklů za současného vzniku velké plastické deformace. Z obrázku 46 je vidno, že se jedná o kvazistatický lom.

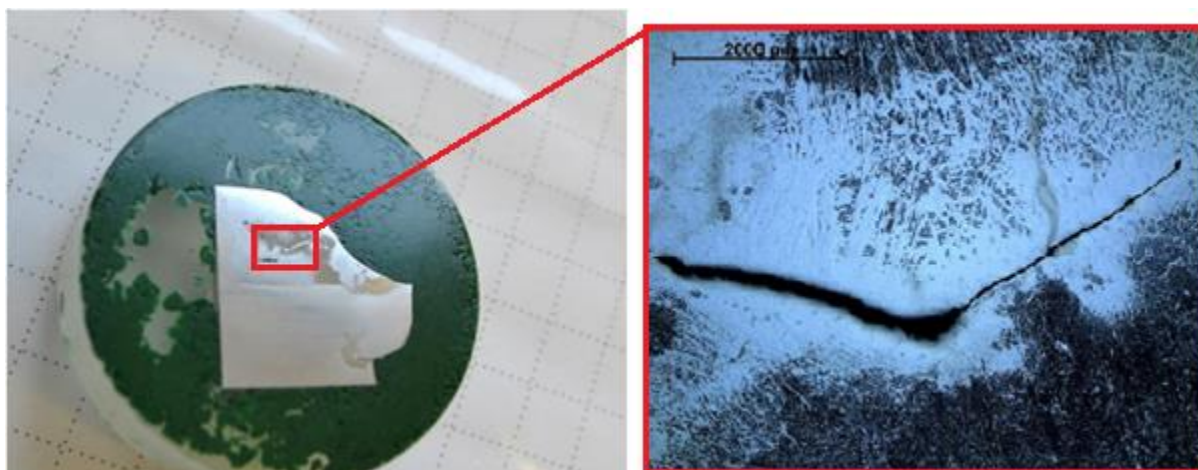


Obr. 44 Kvazistatický a únavový lom na konci lopatky (výřez 3).

Při následném provedení hodnocení mikrostruktury provedeném na výbrusech 2, 3 a 5, bylo zjištěno několik vad ve svarovém kovu. Výbrusy v místech s označením, viz obrázek 36 byly vyhodnoceny:

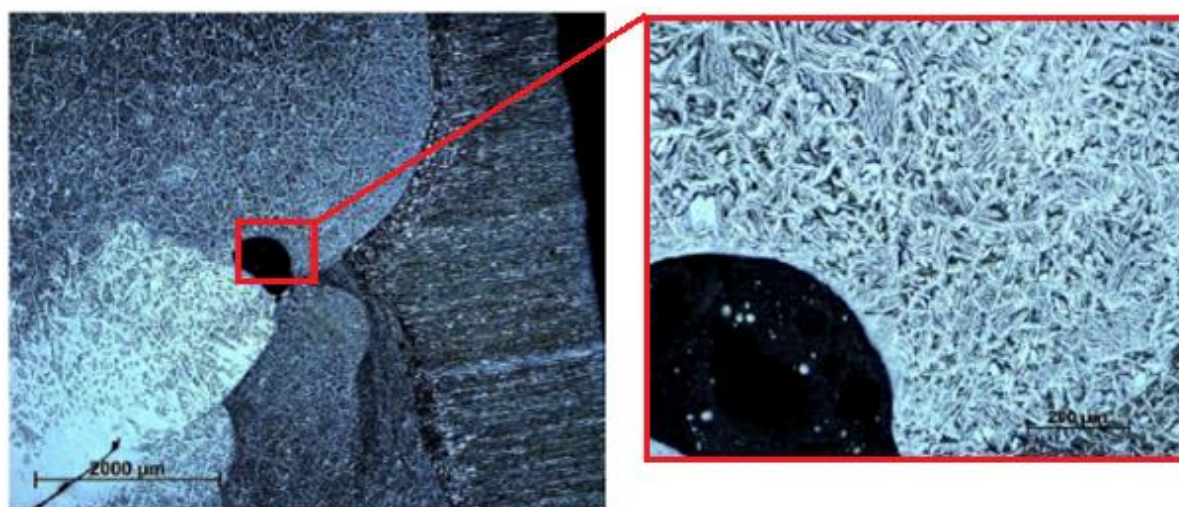
- Výbrus 2

Vzniklá trhlina byla na rozhraní dvou housenek (obr. 47). Předpoklad pro takovou trhlinu je, že vznikla v rozmezí dvou etap, otevřená trhlina – trhlina za tepla, uzavřená trhlina následně vznikla až během provozu.



Obr. 45 Trhlina ve výbrusu 2 s detailem na trhlinu.

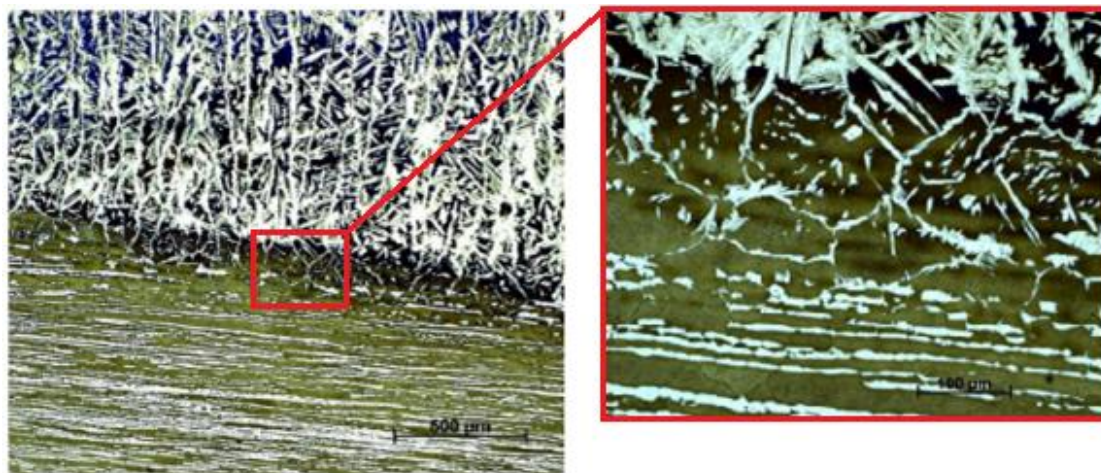
Na snímcích výbrusu 2 byla také zachycena bublina o maximálním rozměru 0,8 mm a je patrně vyplněna struskou. Mikrostruktura svarového kovu je tvořena obálkami austenitu po hranicích zrn feritu, což je příznivější než zjištění u první z lopatek, kdy struktura byla tvořena z velké části feritickou strukturou. Uvnitř zrn má austenit Widmannstättenovu morfologii (obr. 48). Struktura tepelně ovlivněné oblasti je hrubší v porovnání se základním materiálem. Austenit zde má morfologii téměř polygonálních zrn. Šířka tepelně ovlivněné oblasti činí až 0,4 mm. Struktura základního materiálu je dvoufázová (austeniticko-feritická) protažená výrazně ve směru válcování materiálu a odpovídá tak složení duplexních ocelí. V tepelně ovlivněné oblasti převládá zastoupení feritu, který tvoří téměř souvislé sítě.



Obr. 46 Bublina zachycena ve výbrusu 2 a detail austenitické struktury.

▪ Výbrus 3

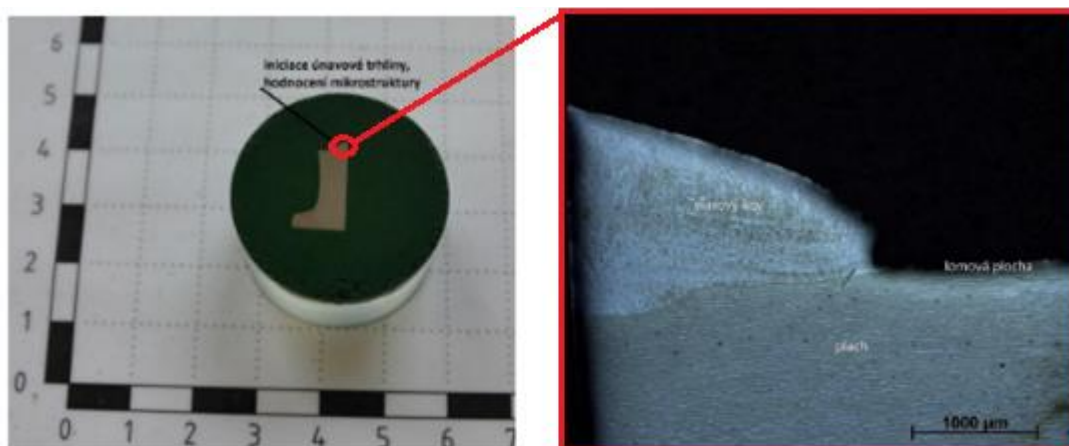
Při pozorování plochy tohoto výbrusu lze vidět výraznou „licí“ strukturu svarového kovu. Zde můžeme vidět zrna austenitu, které tvoří obálky po hranicích původních dendritů. Uvnitř těchto zrn má struktura opět Widmannstättenovu morfologii (obr. 49). Struktura tepelně ovlivněné oblasti je převážně tvořena feritem, austenit tvoří pouze nespojité sítě po hranicích těchto zrn. Na obrázku 42 lze vidět detaily z místa tepelně ovlivněné oblasti, snadno se leptají hranice zrn feritu, k jejich zcitlivění může přispět precipitace nežádoucí σ fáze.



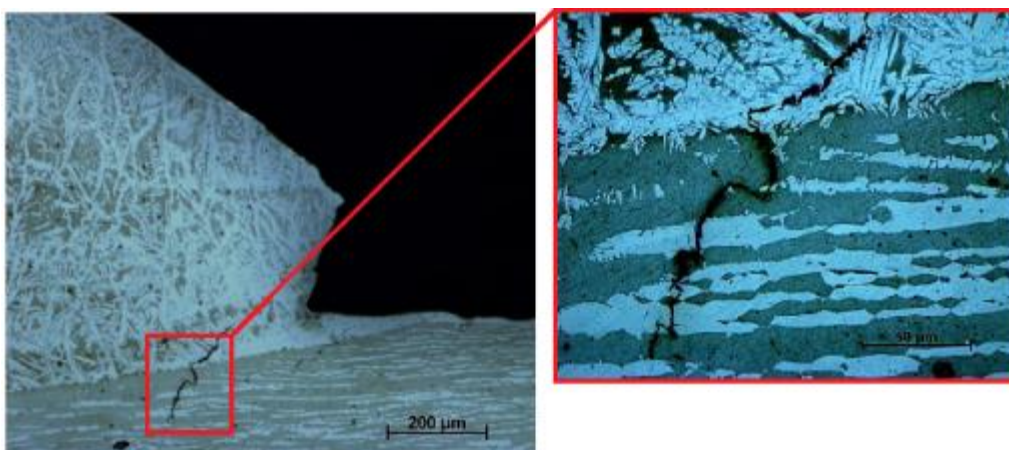
Obr. 47 Nespojité síťování po hranicích zrn na výbrusu 3.

▪ Výbrus 5

Vzorek byl stejně jako předchozí vyříznut z místa označeného na obrázku 43. Na tomto výbrusu byla provedena dokumentace pouze v oblasti zobrazené na obrázku 50, což je místo blízké v místě iniciace trhliny. Je patrné, že v místě iniciace se vyskytují dvě únavové trhliny (obr. 51) zasahující do svarového kovu i do tepelně ovlivněné oblasti. Přičemž je zde zdokumentovaná převládající feritická struktura v tepelně ovlivněné oblasti.



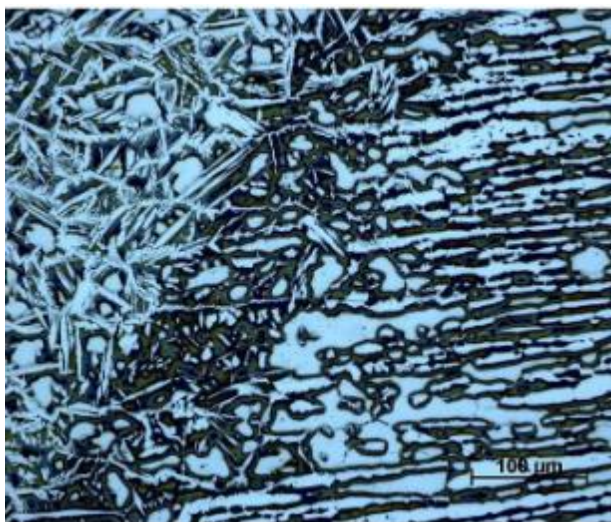
Obr. 48 Místo pozorování mikrostruktury na výbrusu 5.



Obr. 49 Trhlina nalezená ve výbrusu 5.

3.4.1 Zhodnocení lomu druhé lopatky

V tomto případě nebylo chemické složení materiálů kontrolováno. Bylo tak rozhodnuto, jelikož materiál pochází ze stejné šarže jako první, a tak předpokládáme stejný hutní atest. Mikrostruktura tedy stejně jako v prvním případě odpovídá tvářené duplexní oceli 1.4462, kde poměr obsahu feritu a austenitu odpovídá optimálnímu poměru 1:1. Převládající fází ve struktuře svarového kovu je austenit, což souvisí s vyšším obsahem niklu a objasňuje tak vyšší naměřené hodnoty tvrdosti HV10 ve srovnání se základním materiálem. Struktura svarového kovu je tvořena obálkami austenitu po hranicích zrn feritu, vnitrokrystalový austenit má morfologii rovnoběžných desek (obr. 52) jenž byli k pozorování na výbrusu 5 až Widmannstättnových útvarů (obr. 52). Lokálně bylo možno pozorovat relativně hrubá zrna austenitu. Sledování výskytu precipitátů v základním materiálu nebyl pozorován použitou světelnou mikroskopií.



Obr. 50 Morfologie vnitrokrystalového austenitu na výbrusu 5.

Ve svarovém kovu se vyskytují tyto poruchy integrity:

- trhliny, patrně trhliny za tepla o délce až 2 mm, v případě trhliny zobrazené ve výbrusu 2 vychází z trhliny další trhlina o velikosti 2 mm. Uvedené trhliny byly pozorovány na rozhraní na sebe navazujících svarových housenek,
- krátké trhliny na rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti, patrně vzniklé důsledkem zatěžování, nepřímé potvrzení nukleace únavových trhlin z uvedeného rozhraní,
- bubliny, bublina na obrázku 41 má maximální rozměr 0,8 mm a patrně je vyplněna struskou.

Šířka tepelně ovlivněné oblasti má až 0,4 mm. Ve struktuře tepelně ovlivněné oblasti převládá ferit, která buď tvoří síťoví okolo téměř rovnoosých zrn austenitu, nebo „souvislou“ matici ve které jsou izolované útvary austenitu. Výrazně zkřehlá část tepelně ovlivněné oblasti je zobrazena na obrázku 51 v detailu – snadná leptatelnost hranic zrn, precipitát ve feritické matici. Tvrdost tepelně ovlivněné oblasti je vyšší, v porovnání s tvrdostí svarového kovu.

Lomové plochy zobrazené na obrázcích 46, 47 a 50 vznikly únavovým mechanismem, pouze část lomové plochy na obr. 46 se na konci lopatky šířila kvazistatickým tvárným štěpným mechanismem. Únavové trhliny iniciovaly ve více místech, primární trhliny iniciovaly z tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. V případě lomové plochy na obrázku 39 trhlina iniciovala z povrchu svařovaného plechu, kde struktura nebyla ovlivněna svařováním.

3.5 Výpočet svařitelnosti

Pro kontrolu, zda byl proces svařování pro lopatky zvolen správně, se v této části zaměříme na výpočet svařovacích parametrů pro lopatky z austeniticko-feritického (duplexního) materiálu 1.4462. Jako vstupní hodnoty chemického složení základního materiálu použijeme dodané hodnoty v příloze 3 (dále zobrazené v tabulce 16) a pro přídavný materiál použijeme jednu chemické složení použitého přídavného materiálu 1,2 T2312LRC pro první lopatku (tab. 10) a pro další výpočet chemické složení druhého přídavného materiálu OK Autrod2206 (tab.11).

Tabulka 16 Použité chemické složení pro výpočty parametrů svařitelnosti.

Chemický prvek	(C)	(Cr)	(Mn)	(Si)	(P)	(S)	(Ni)	(N)	(Mo)
Výskyt [%] /atest	0,018	22,1	1,82	0,30	0,026	0,0005	4,9	0,166	2,51

Dle teorie v materiálové charakteristice, byl proveden výpočet chromového a niklového ekvivalentu, jak pro základní materiál, tak pro oba použité přídavné materiály. Výpočet zobrazuje promísení kovů a výslednou strukturu s procentuálním obsahem delta feritu ve svarovém kovu.

Výpočet chromového a niklového ekvivalentu pro základní materiál 1.4462:

$$Cr_e = \%Cr + \%Mo + 0,7\%Nb = 22,1 + 2,51 + 0,7 \cdot 0 = 24,61 \% \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} Ni_e &= \%Ni + 35\%C + 20\%N + 0,25\%Cu = \\ &= 4,9 + 35 \cdot 0,018 + 20 \cdot 0,166 + 0,25 \cdot 0 = 8,85 \% \end{aligned} \quad (2.4)$$

Výpočet chromového a niklového ekvivalentu pro přídavný materiál 1,2 T2312LRC:

$$Cr_e = \%Cr + \%Mo + 0,7\%Nb = 24,25 + 0,11 + 0,7 \cdot 0 = 24,36 \% \quad (2.3)$$

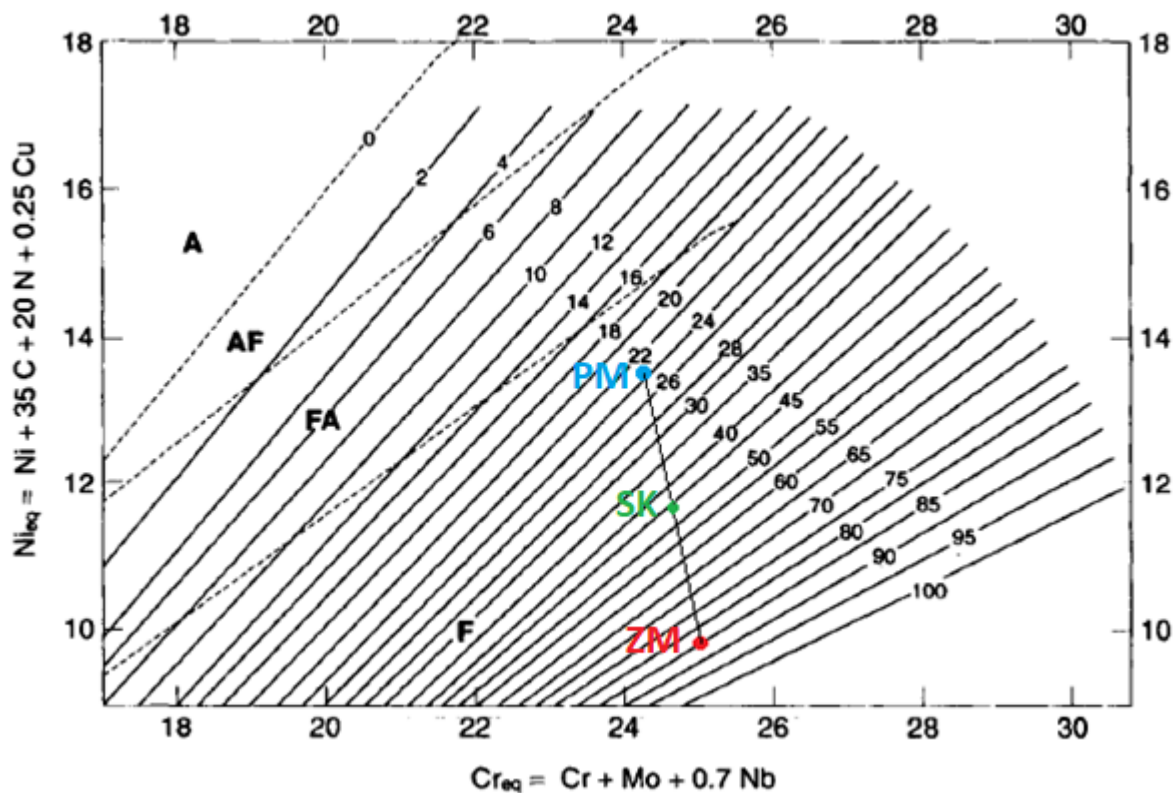
$$\begin{aligned} Ni_e &= \%Ni + 35\%C + 20\%N + 0,25\%Cu = \\ &= 12,4 + 35 \cdot 0,022 + 20 \cdot 0,019 + 0,25 \cdot 0 = 13,55 \% \end{aligned} \quad (2.4)$$

Výpočet chromového a niklového ekvivalentu pro přídavný materiál OK Autrod2206:

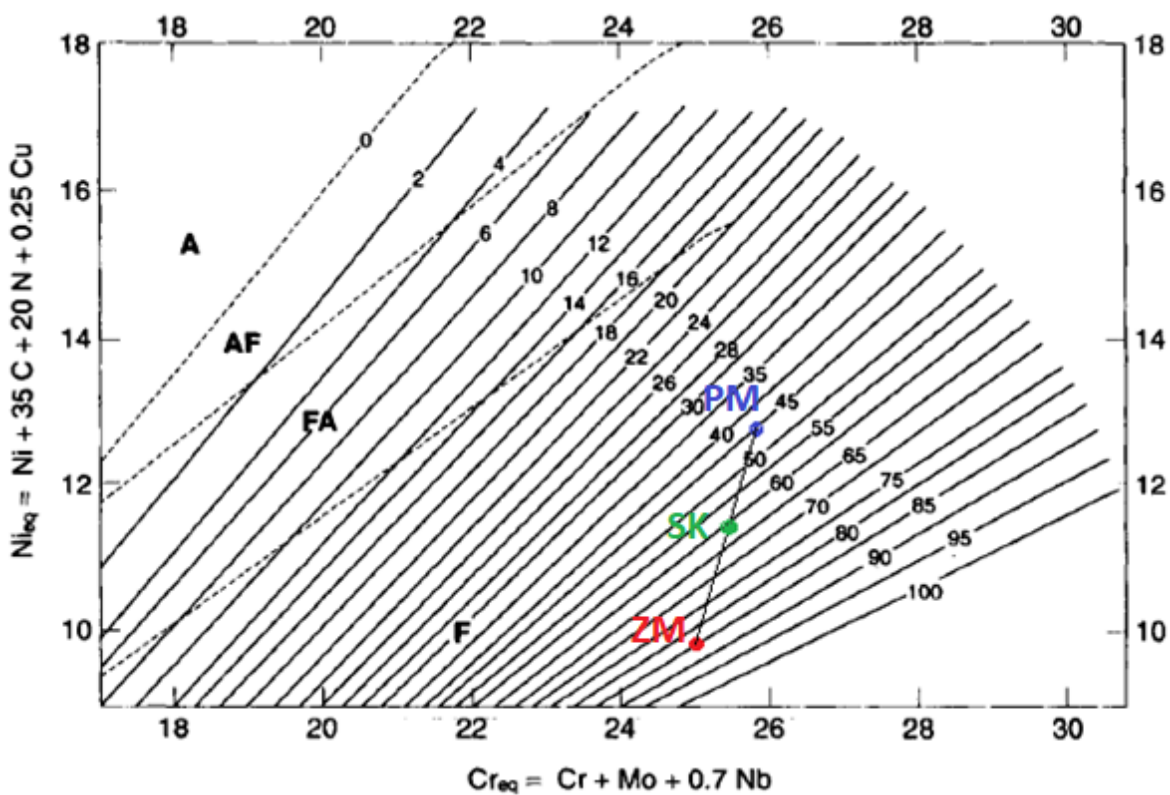
$$Cr_e = \%Cr + \%Mo + 0,7\%Nb = 22,7 + 3,2 + 0,7 \cdot 0 = 25,9 \% \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} Ni_e &= \%Ni + 35\%C + 20\%N + 0,25\%Cu = \\ &= 8,5 + 35 \cdot 0,011 + 20 \cdot 0,17 + 0,25 \cdot 0 = 12,285\% \end{aligned} \quad (2.4)$$

Vypočtené hodnoty jsem zaznamenal do dvou grafů (obr. 53 a obr.54), pro oba použité přídavné materiály. Z grafů je vidno, že chromový ekvivalent pro základní materiál, tak pro přídavné materiály je takřka totožný. Co se týká niklového ekvivalentu u obou přídavných materiálů je ekvivalent o něco vyšší než u základního materiálu. Jak víme z teoretické části, pro svařování duplexních ocelí chceme, aby právě základní a přídavný materiál měli co nejbližší chemické složení.



Obr. 51 Diagram WRC-1992 pro duplexní ocel 1.4462 a přídavný materiál 1,2 T2312TLC.



Obr. 52 Diagram WRC-1992 pro duplexní ocel 1.4462 a přídavný materiál OK Autrod2206.

Pro obě použité elektrody byly z grafu odečteny přibližné hodnoty chromového a niklového ekvivalentu nacházejícího se v 50 % zředění svarového kovu. Hodnoty jsou zobrazené v tabulce 17.

Tabulka 17 Hodnoty chromového a niklového ekvivalentu odečteny z diagramů.

Přídavný materiál	1,2 T2312TLC		OK Autrod2206	
Ekvivalent	Cr_e	Ni_e	Cr_e	Ni_e
Odečtená hodnota [%]	24,6	11,6	25,4	11,7

Pro určení obsahu delta feritu ve svarovém kovu, bylo použito pro oba přídavný materiály Séférianova vzorce:

$$\% \delta_{feritu} = 3 \cdot (Cr_e - 0,93 \cdot Ni_e - 6,7) \quad (2.5)$$

- Výpočet obsahu delta feritu ve svarovém kovu pro elektrodu 1,2 T2312TLC:

$$\% \delta_{feritu} = 3 \cdot (Cr_e - 0,93 \cdot Ni_e - 6,7) = 3 \cdot (24,6 - 0,93 \cdot 11,6 - 6,7) = 21,3 \%$$

- Výpočet obsahu delta feritu ve svarovém kovu pro elektrodu OK Autrod2206:

$$\% \delta_{feritu} = 3 \cdot (Cr_e - 0,93 \cdot Ni_e - 6,7) = 3 \cdot (25,4 - 0,93 \cdot 11,7 - 6,7) = 23,5 \%$$

U austeniticko-feritického materiálu 1,4462 je svarový kov dle teoretických výpočtů pro přídavný materiál 1,2 T2312TLC 21,3 % a pro přídavný materiál OK Autrod2206 23,5 %. Jak víme z teoretické části, tento prvek zabráňuje vzniku tepelných trhlin. Výpočet delta feritu podle Séférianova vzorce, je vhodnější použít pro austenitické oceli (což ocel 1.4462 není). Lze tak předpokládat určitou nepřesnost ve výpočtu, jelikož z grafu WRC-1992 můžeme vyčíst, že obsah feritu je kolem 48-62 %.

V následující části bylo spočítané vnesené celkové teplo do svaru. Jelikož pro svařování první lopatky nebyla doplněna rychlost svařování. Výpočet byl proveden pouze pro druhou lopatku. Zde WPS-postupu svařování S1 – 102/18 (příloha 6), kde jsou všechny potřebné parametry pro výpočet. Pro hodnoty v rozmezí, byla použita vždy průměrná hodnota. Vidíme, že svar byl zhotoven ze tří svarových housenek. Proto byl proveden výpočet pro všechny svarové housenky dle vzorce pro celkové vnesené teplo:

$$Q_s = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \quad (2.1)$$

- Výpočet vneseného tepla první housenky:

$$Q_{s1} = \eta \cdot \frac{U_1 \cdot I_1}{10^3 \cdot v_{s1}} = 0,8 \cdot \frac{24,5 \cdot 220}{1000 \cdot 3,74} = 1,153 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- Výpočet vneseného tepla druhé housenky:

$$Q_{s2} = \eta \cdot \frac{U_2 \cdot I_2}{10^3 \cdot v_{s2}} = 0,8 \cdot \frac{24,5 \cdot 220}{1000 \cdot 4,67} = 0,923 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- Výpočet vneseného tepla třetí housenky:

$$Q_{s3} = \eta \cdot \frac{U_3 \cdot I_3}{10^3 \cdot v_{s3}} = 0,8 \cdot \frac{24,5 \cdot 220}{1000 \cdot 4,08} = 1,057 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Vnesené teplo, které je během svařování dodávané do místa svaru se pohybovalo v hodnotách okolo $1 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$, což je pro metodu 135, kterou je materiál svařovaný přípustné. Avšak pro svařování duplexních materiálů je zapotřebí kontrolovat hodnotu interpass, která je v daném svařovacím postupu předepsána viz příloha 7 ($T_{\text{interpass}} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Při nedodržení této hodnoty, která je zpravidla zhruba o $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšší než teplota přehřevu, může dojít ve svarovém spoji k mnoha nepříznivým jevům od vnitřního napětí, až po vzniklé vady. V následujícím bodě bylo vypočteno celkové vnesené teplo, které by bylo do svaru dodáno, když by se teplota interpass nedodržovala a svářeč by nečekal, než daný svar vychladne.

- Celkové vnesené teplo se spočítá jako součet vnesených dílčích tepel:

$$Q_{SC} = Q_{S1} + Q_{S2} + Q_{S3} = 1,153 + 0,923 + 1,057 = 3,133 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Je tedy velice důležité, aby svařovací dozor dohlížel na správný proces svařování a hlídal mezihousenkovou teplotu během svařování. Velmi nízký tepelný příkon vede k prudkému zchlazení svaru, což zapříčiňuje ztvrdnutí a s tím spojené riziko vzniku trhlin.

3.6 Shrnutí analýzy lomu a doporučení pro výrobu lopatek

Při analýze první z lopatek, která byla zhotovena dle výkresu V583 356 rev.1 a WPS-svařovacího postupu S1 – 102/18 (příloha 6) byly ve svarovém kovu nalezeny trhliny o velikosti 2 mm a póry o velikosti 0,8 mm. Vznik těchto trhlin nejspíše není způsoben za horka, ale studenými spoji mezi housenkami (tzv. neprůvary), způsobené pravděpodobně použitou technologií svařování koutových svarů (a7, 8) na materiálu 1.4462 svařovací metodou 135 (GMAW).

- Jako doporučení do budoucna se z důvodu eliminace možných studených spojů jako potenciálních iniciací trhlin u koutových svarů, doporučuje vyloučit svařovací metoda 135 (GMAW) a svařovat koutové svary materiálu 1.4462, rovněž jako by se jednalo o tupé svary. Ke svařování pak použít svařovací metodu 141 (GTAW).

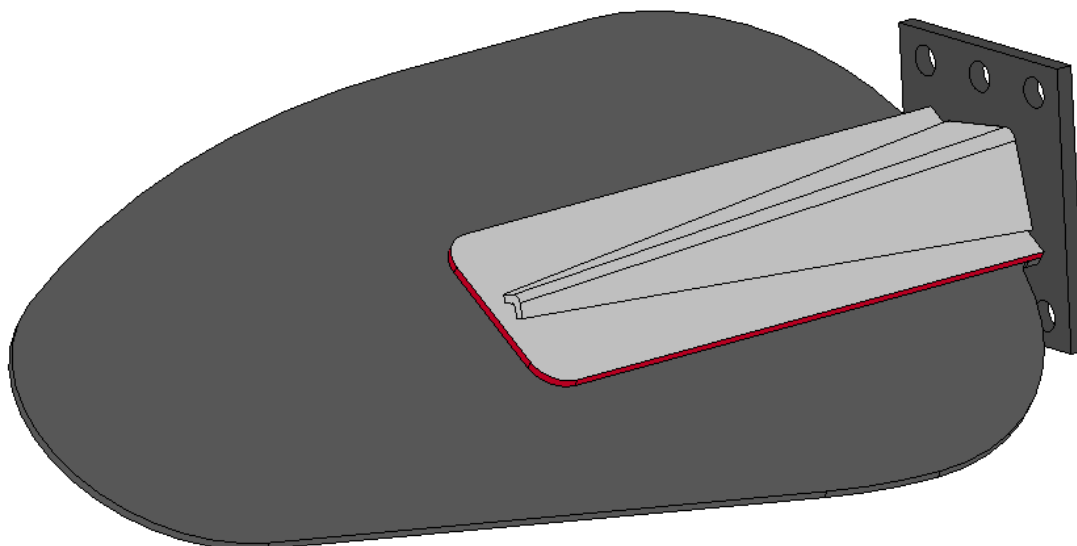
V tepelně ovlivněné oblasti svaru o velikosti 0,4 mm široké, převládá ve struktuře ferit. Ze získaných informací v literární rešerši však víme, že podíl feritu a austenitu by měl být 1:1. Tento ferit vytváří síťoví, až Widmannstättnové útvary, což je nepříznivá struktura, křehčí a tvrdší, v porovnání s austenitickou strukturou. Pokud dojde k iniciaci trhliny, tak se touto strukturou trhlina dobře šíří. Vyšší výskyt feritu ve struktuře, značí možné přehřátí tepelně ovlivněné oblasti procesem svařování a možnými nevhodně zvolenými svařovacími parametry.

- Doporučení pro budoucí svařování lopatek z materiálu 1.4462 je, že při svařovacím procesu je nutno měřit a zaznamenávat parametry svařování (vnesené teplo do svaru, proud, napětí, rychlost svařování) a měřit průběžně teplotu interpass pro každou svarovou housenku (po dokončení a před začátkem další housenky). Teplotu interpass dodržovat a dozorovat za asistence svářečského dozoru subdodavatelské firmy.

Na analyzovaných vzorcích byly pozorovány trhliny, které iniciovaly z povrchu svaru, tepelně ovlivněné oblasti i tepelně neovlivněného plechu základním materiálem. Lomové plochy byly vznikly jak při svařování, tak mohli iniciovat až při samotném provozu zařízení. V případě lomové mechaniky únavového lomu, jakmile dojde k iniciaci trhliny kdekoli (na povrchu nebo ve struktuře svaru svarového kovu, tepelně ovlivněné oblasti nebo základního materiálu) tak se vytvořená trhlina šíří až dojde k lomu, což se stalo i v tomto případě.

- Vzhledem k lomové mechanice únavového lomu (hodnoceno dvěma materiálými zprávami) se doporučuje upravit konstrukce lopatek. Byl vytvořen nový výkres lopatky, kde došlo ke zvětšení výztuhy a úpravě několika svarů (viz obrázek 55). Koutové svary upravit přebroušením po svařování (značka – nad a7, 8 koutový svar). Při této úpravě si

dát pozor na nesnížení svaru pod předepsanou hodnotu na výkresu. Přebrousit a přeleštit (kovový lesk) koutového svaru nebo ideálně všechny svary v plynulém přechodu mezi plechem a svarem. Ve výrobním postupu doplnit přebroušení a přeleštění svarů. Po zhotovení svarů provést vizuální kontrolu svarů proškolenou osobou. Poté přebrousit a po přebroušení provést penetrační kontrolu, kterou provede obsluha společně s dokladovaným protokolem a fotodokumentací.



Obr. 53 Doporučená konstrukční změna lopatek (prodloužení náboje, červeně označená oblast).

Vlastní hodnocení druhé analyzované lopatky po konzultacích s výpočtářem, který provedl MKP analýzu příčin prasklin lopatky T12/V583306 axiálního míchadla sádrovce (hodnocené na druhé prasklé lopatce). Na součásti lze identifikovat okem viditelné trhliny iniciované v svařovacím kovu, hranici ztavení a tepelně ovlivněné oblasti. Byly vizuálně pozorovány trhliny iniciované z povrchu svaru, i když vzhled svaru vizuálně vyhovuje dle normy ISO 5817 - C, horší kresba svaru i jednotlivých housenek, nesouvisí se zápaly a místní podkročení a překročení velikosti koutových svarů, vzhledem k lomové mechanice materiálu 1.4462 jsou nepřijatelné. Svařováním (kvalitou svaru) jsou způsobeny technologické vruby ze kterých došlo k iniciaci povrchových trhlin, nedošlo k dolomení (ulomení) celé lopatky. [36]

- Vzhledem k možnému vzniku technologických vrubů na povrchu doporučeno, přebrousit a leštit svary viz doporučený postup v předchozím odstavci. Pokud by přebroušení a konstrukční úpravy výztuhy lopatky nepomohly (došlo by k opětovnému lomu) není třeba hodnotit materiálovou a lomovou analýzu, spíše je zde doporučen přepočet pevnostního výpočtu (MKP) se zohledněním všech závěrů analýz lomové mechaniky, případně zvážit a přepočítat pojištění výztuh za pomoci šroubových spojů.

V případě další výroby lopatek z materiálu 1.4462 (dle výrobních i konstrukčních úprav), po doplnění požadavku (přebroušení svarů, ideálně vše svařit technologií 141 (GTAW) se záznamem parametrů svařování, vnesené teplo, teplota interpass z jednotlivých housenkových vrstev a penetrační zkouškou po přebroušení a přeleštění. Nechat si před svařováním těchto lopatek od subdodavatele poslat předvýrobní dokumentaci (en svářeči oprávnění, wps, wpqr, svařovací plán, atesty od základních materiálů k dané zakázce).

ZÁVĚR

V práci byla provedena analýza lomu lopatek axiálního míchadla T12/V583306 z materiálu 1.4462, která se opírá o přidanou řešeršní část, ve které jsou popsány možné úskalí při svařování duplexních materiálů a možné metody pro jejich svařování. Další část řešeršní části se zaměřuje na lomovou mechaniku svarů a jejich nedestruktivní metody zkoušení. Cílem bylo zjistit za jakých podmínek došlo k destrukci lopatky a po následném vyhodnocení analýz doporučit pro zadavatele možná východiska, aby se daná situace neopakovala.

Z analýz vzorků, které byly provedeny na dvou ze tří prasklých lopatek, se došlo k závěru, že vzniknutý lom v lopatkách byl způsoben lomovým mechanismem v místě svaru a tepelně ovlivněné oblasti. Stejně tak se došlo k závěrům u první analyzované lopatky, že ve struktuře po svaření nedošlo k rozpouštěcímu žíhání a hodnoty tvrdosti HV10 po měření nenabývaly hodno, které bychom očekávali. Tato zjištění vedla k vytvoření nového konstrukčního návrhu lopatky a změně technologie použité pro svařování. Navrhnutý nový konstrukční návrh lopatky včetně rozšíření technologického postupu a kontroly svarů během a po zhotovení by měl být dostatečný, aby k další deformaci lopatek nedošlo. (v případě, že by se tak stalo, je možné řešení shrnuto v poslední kapitole).

V praktické části bylo změřeno, že chemické složení odpovídá předloženému materiálu 1.4462. Mikrostruktura pak obsahovala v některých částech svaru vyšší výskyt feritických zrn, které jsou pro součásti namáhané cyklicky nebezpečné, jelikož jsou křehké, a tak při sebemenším defektu v jejich okolí dojde lehce k iniciaci lomu. Především v těžkém průmyslu, kde se síly působící na strojní součásti pohybují ve vysokých jednotkách.

V praktické části nebylo spočítáno, ani simulováno, jak se lopatky zatěžují během svého provozu, což by mohlo vést ke zjištění, kde jsou lopatky nejvíce namáhané a jak jsou v provozu deformované. Touto problematikou by se mohlo zabírat další rozšíření práce v následující době.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-227-3167-6.
2. ZKOUŠENÍ MATERIÁLU *Defektoskopie a technologické zkoušky*. [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11435923/>
3. Základy degračních procesů [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich-procesu/Lasek_Zaklady_degradacnich-procesu.pdf
4. LASEK, Stanislav. *Základy degračních procesů*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3373-6.
5. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování. 1. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 8085771721.
6. FUSEK, Martin. *Únava materiálu*. 1. Ostrava: vysoká škola Báňská – technická univerzita Ostrava fakulta, 2013. ISBN 978-80-248-3024-7.
7. AMBROŽ, Oldřich. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
8. MINAŘÍK, V., *Přehled metod svařování*, 2002, ZEROSS Ostrava 2011. ISBN 80-86698-18-1
9. Techmix s. r. o.: *výrobce míchacích zařízení a bioreaktorů* [online]. [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <http://www.techmix.cz/>
10. Svařování *duplexních* nerezavějících ocelí [online]. [cit. 2022-01-14]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/3349892-Svarovani-duplexnich-nerezavejicich-oceli.html>
11. Svařitelnost uhlíkových, mikro a nízkolegovaných ocelí pro tlaková zařízení [online]. 2008 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/userfiles/files2009/svaritelnost_oceli.doc
12. Strojirensky.NET: *Provádění NDT kontroly a hodnocení svarů na konstrukcích* [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <http://strojirensky.net/2009/11/26/provadeni-ndt-kontroly-a-hodnoceni-svaru-na-konstrukcich/>
13. ResearchGate [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/WRC-1992-diagram-Kotecki-Siewert-1992-The-FN-prediction-is-only-accurate-for_fig4_326557304
14. Prostor design: *SVAROVÁNÍ MIG/MAG A TIG/WIG* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.prostor-design.cz/sluzby/svarovani/>
15. Penetrační zkoušení při hodnocení povrchových vad [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://svv.cz/files/Kapilnbarevnzkouka.pdf>
16. NOVOTNÁ, EVA. Studijní opory pro výuku předmětů [online]. Nauka o materiálu [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/nomd/Index.html>
17. Microscopy the source for microscopy education [online]. [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <http://www.microscopyu.com/articles/formulas/formulasfielddepth.html>

18. BRAMFIT, B a Arlan o BENSCOTER. *Metallographer's guide: practice and procedures for irons and steels*. Materials Park: ASM International, 2002. ISBN 08 - 717-0748-9.
19. FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2*. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
20. *Materiály a jejich svařitelnost*. 09/1999. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, 1999. ISBN 80-85771-63-2.
21. KOUKAL, Jaroslav. *Materiály a jejich svařitelnost. 1*. Ostrava, 2009. ISBN 978 – 80 - 248-2025-5.
22. PILOUS, Václav. *Materiály a jejich chování při svařování. 1*. Plzeň: ŠKODA-WELDING, 2001.
23. Materialwelding [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.materialwelding.com/what-is-wrc-1992-diagram-application-of-wrc-diagram/>
24. LECO [online]. 2007 [cit. 2022-05-9]. *LECO Macro - Vickers Hardnesss Testers*. Dostupné z: http://www.leco.cz/cz/products/metallography/hardness_tester/lv_series/lv_series.htm.
25. GneeGarden [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <http://m.cz.china-stainless-steels.com/stainless-steel-plate/duplex-1-4462-stainless-steel.html>
26. MOHYLA, Miroslav. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 1992. ISBN 80-7078-138-6.
27. EWM we are welding: *Základy svařování MIG/MAG* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/fachwissen/mig-mag-schweissen-grundlagen.html>
28. Evek GmbH [online]. [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://evek.vip/nerezov%C3%A1-ocel/2328-nerezov--plech-05-3-mm-aisi-318-ln-14462-duplexn---desky-voliteln---ez-plech--po-adovan--rozm-r-mo-n--100-1000-mm-4066435018542.html>
29. ERNEMAN, J., *Quantitative metallography of sigma phase precipitates in AISI 347 stainless steel – a comparison between different methods*. Materials Science and Technology. 2004, vol. 20, issue 10, s. 1245-1251. DOI: 10.1179/026708304225022241 [online]. [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <http://www.maneyonline.com/doi/abs/10.1179/026708304225022241>
30. *Energie z fosilních paliv* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2014/05-kveten/encyklopedie_fosilni-paliva_e.pdf
31. *Elektronová mikroskopie. Metalografie Metodická příručka*. 2015. Praha: Centrum pro studium vysokého školství, 2015. ISBN 978-80-86302-67-6.
32. GUNN, Robert N. *Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications*. Cambridge: Abington Publishing, 1997. ISBN 1-85573-318-8.
33. ALVAREZ, A. I. *Duplex stainless steels*. October 2009. Wiley-ISTE, 2009. ISBN 978-1-84821-137-7.
34. *Defektoskopické zkoušení svarů - NDT* [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.svarovani-defektoskopie.cz/defektoskopie-svaru/>

35. ČSN EN ISO 6507-1 (420374): *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. 1-8-2018. 2018.
36. ČSN EN ISO 5817: *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů kvality*. 01.08.2014. 2014.
37. ČSN EN ISO 4063: *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*. 07/2011. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
38. Česká svářečská společnost ANB: *Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení* [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
39. Automig: TIG (Tungsten Inert Gas Welding) [online]. [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig/index.html>
40. Allforpower: informační portál a časopis. *AF Power agency* [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <http://old.allforpower.cz/clanek/michaci-centrum-a-zasobni-nadrz-sadrovcove-suspenze-noveho-zdroje-elektrarny-ledvice-660-mwe/>
41. KUNZ, Jan, *Aplikovaná lomová mechanika*, ČVUT, Pectus, s.r.o., 2005
ISBN 978-80-89435-28-9
42. ČSN EN ISO 6947 – (050024): *Svařování a příbuzné procesy - Polohy svařování*. 01/2021
43. ČSN EN ISO 14175 (052510) *Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. 10.2009.
44. ČSN EN ISO 17639 (051128) *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. 04/2014.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
T	Teplota	[°C]
t	čas	[s]
U	Napětí	[V]
I	Proud	[A]
Q	Teplo	[J]
T _{imax}	Maximální teplota interpass	[°C]
P	Tepelný příkon	[W]
F	Síla	[N]
v _s	Svařovací rychlost	[mm·s ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
η	Účinnost	[-]
C _{re}	Chromový ekvivalent	[%]
N _{ie}	Niklový ekvivalent	[%]
R _e	Mez kluzu	[MPa]
ΔK _p	Rozkmit prahové hodnoty faktoru intenzity napětí	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
ČR	Česká republika
Obr.	Obrázek
TIG	Tungsten Inert Gas (svařování wolframovou elektrodou)
WIG	Wolfram Inert Gas (svařování wolframovou elektrodou)
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
ZM	Základní materiál
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
SK	Svarový kov
max.	Maximální
min.	Minimální
s.r.o.	Společnost s ručením omezeným
Tab.	Tabulka
FN	Obsah feritu
F	Ferit
A	Austenit
FA	Feriticko-austenitická struktura
AF	Austeniticko-feritická struktura
např.	Například
rov.	Rovnice
tl.	Tloušťka
NDT	Nedestruktivní testování
ČSN	Česká státní norma
tzv.	Takzvaně
HV10	Měření tvrdosti podle Vickerese
δferit	Delta ferit
RTG	Rentgenové záření
EDS	Energiově disperzní spektrometrie

SEZNAM PŘÍLOH.

Příloha 1	Seznam přídatných materiálů pro duplexní oceli od firmy ESAB
Příloha 2	Polohy svařování podle normy ČSN EN ISO 6947
Příloha 3	Převzatý inspekční certifikát 2012-108647
Příloha 4	Dodaný WPS – postup svařování (PME 02_30/11)
Příloha 5	Dodaný WPS – postup svařování (PME 04_49/13)
Příloha 6	Dodaný svařovací plán + NDT plán (S1-102/18)
Příloha 7	Dodaný WPS-postup svařování (PME 02_59/18)
Příloha 8	Dodaný svařovací plán (03-044/13)
Příloha 9	Snímky analýz z fraktografie a metalografie obou analyzovaných lopatek

Seznam výkresů

Lopatka míchadla; V583 356 rev.1 (staré provedení dodané firmou)

Lopatka míchadla; 2022-DP-192311-01 (nové provedení)

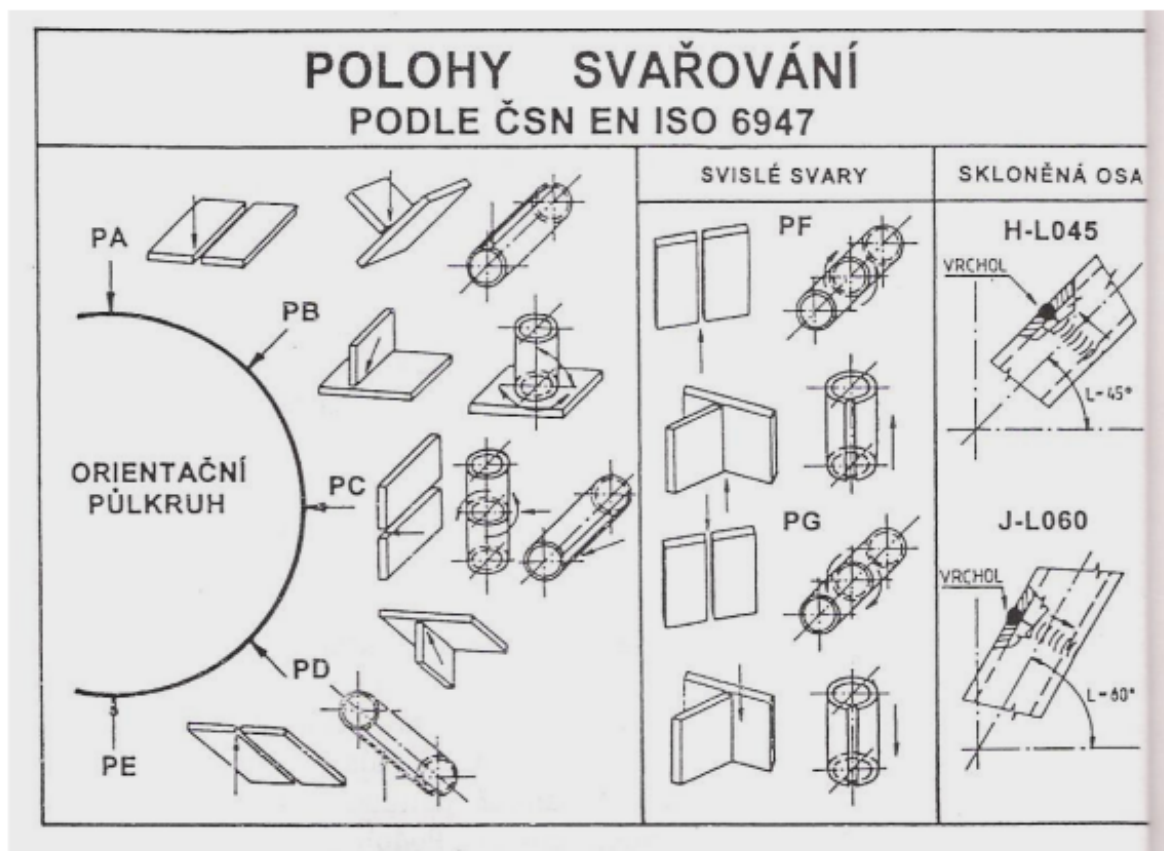
AISI/ UNS No.	EN No.	Grade	Lean duplex					Duplex					Super duplex				
			OK 67.56*	OK Autrod 2307	OK Tigrod 2307	Shield-Bright 2307	OK Autrod 2307/ OK Flux 10.93	OK 67.50, OK 67.53, OK 67.55	OK Autrod 2209	OK Tigrod 2209	OK Tubrod 14.27, OK Tubrod 14.37	OK Autrod 2209/ OK Flux 10.93	OK 68.53, OK 68.55	OK Autrod 2509	OK Tigrod 2509	OK Tubrod 14.28	OK Autrod 2509/ OK Flux 10.93
S32001	1.4482	19D	x [†]	x	x	x	x	†	†	†	†	†					
S32011		2102	x [†]	x	x	x	x	†	†	†	†	†					
S32101	1.4162	LDX 2101*	x [†]	x	x	x	x	†	†	†	†	†					
S32202	1.4062	2202	x [†]	x	x	x	x	†	†	†	†	†					
S32304	1.4362	2304	x [†]	x	x	x	x	†	†	†	†	†					
S32003		2003	2	2	2	2	2	†	†	†	†	†					
	1.4655		3	3	3	3	3	†	†	†	†	†					
S31803	1.4462	2205						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
S32205	1.4462	2205						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
S32550	1.4507	255											x	x	x	x	x
S32750	1.4410	2507											x	x	x	x	x
S32760	1.4501	Zaron 100											x	x	x	x	x
S39274		DP3W											x	x	x	x	x

* Použití "smíkování" nebo miného "kyvání". Nadměrný rozkvív může způsobit horší odstranitelnost střísky. AC/DC+ polární.
x: Doporučené použití.

†: Použitelné s výjimkou, kdy legury Mo snižují korozní odolnost.

2: Použitelné v případech, kdy snížení korozní odolnosti není na zřeteli.

3: Použitelné s výjimkou, kdy je požadováno použití mědi jako legovacího prvku.



Pojmenování	Popis	Symbol
Poloha vodorovná shora	Vodorovný směr svařování, svislá osa svaru, krycí vrstva nahoře	PA
Poloha vodorovná šikmo shora	Vodorovný směr svařování, krycí vrstva směrem šikmo nahoru	PB
Poloha vodorovná	Vodorovný směr svařování, vodorovná osa svaru	PC
Poloha vodorovná šikmo nad hlavou	Vodorovný směr svařování nad hlavou, krycí vrstva směrem šikmo dolů	PD
Poloha vodorovná nad hlavou	Vodorovný směr svařování nad hlavou, krycí vrstva dole, svislá osa svaru	PE
Poloha svislá nahoru	Svislý směr svařování zdola nahoru	PF
Poloha svislá dolů	Svislý směr svařování shora dolů	PG
Svařování nahoru k vrcholu svaru	Směr svařování nahoru pod úhlem 45°	H-L045
Svařování od vrcholu svaru dolů	Směr svařování dolů pod úhlem 60°	J-L060

INSPECTION CERTIFICATE

KOBELCO WELDING OF EUROPE B.V.

FLUX CORED WIRE

According to EN 10204-3.1

PURCHASER _____

CERTIFICATE NO: KC13-137

DATE OF ISSUE: 18-03-2013

TRADE DESIGNATION	DIAMETER (mm)	MFG. NO.	APPLICABLE SPECIFICATION AND CLASSIFICATION
DW-309L	1.2	N3040011204	AWS A5.22 E309L T0-1/4 ISO 17633-A - T 23 12 L R CM 3

1. CHEMICAL COMPOSITIONS OF ALL WELD METAL (wt%)

ELEMENT	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mg	N
WELD METAL	0.022	0.60	1.21	0.021	0.003	0.09	12.40	24.25	0.11	0.019
ELEMENT	FS	FN	FS	FN	FS	FN	FS	FN	FS	FN
WELD METAL			15.4	> 18		23.0				

FS: FERRITE CONTENT (%) (SCHAEPFLER DIAGRAM)
FN: FERRITE NUMBER (DELONG DIAGRAM)
FS+FN: FERRITE NUMBER (1992 WRC DIAGRAM)

2. TENSILE TEST OF ALL WELD METAL (ACCORDING TO ISO 17833)

YIELD STRENGTH at 0.2% OFFSET N/mm ²	TENSILE STRENGTH N/mm ²	ELONGATION GL-50 (%)
420	608	35

3. CHARPY IMPACT TEST OF ALL WELD METAL

TESTING TEMPERATURE (°C)	ABSORBED ENERGY (J) EACH	AVERAGE

4. WELDING CONDITIONS FOR THE TESTING

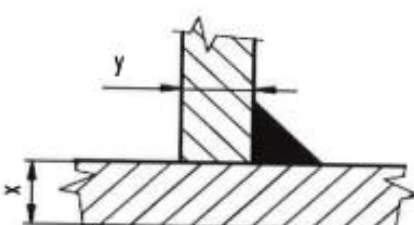
TYPE OF CURRENT	DC+	SHIELDING GAS	100% CO ₂
WELDING CURRENT	200 (A)	ARC VOLTAGE	29.0 (V)

WE HEREBY CERTIFY THAT THE TEST RESULTS OF THE ABOVE
WELDING MATERIAL ARE CORRECT

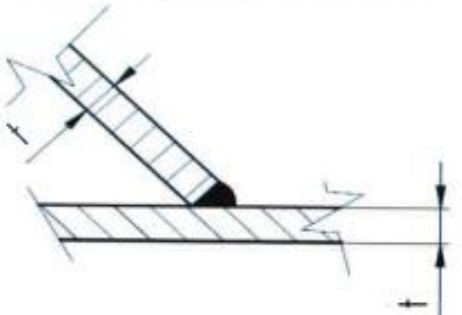
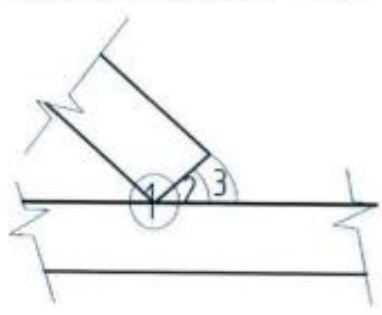


KOBELCO WELDING OF EUROPE B.V.

QA Manager

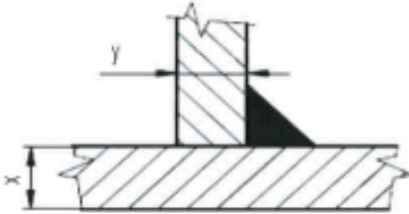
PME s.r.o.		WPS - POSTUP SVAŘOVÁNÍ Welding procedure specification				Norma: ČSN EN ISO 15 614-1		
Výrobce: PME s.r.o., Kojetínská 83, Přerov		Postup svařování č. : PME 02_30/11		WPQR č. : 1P - 1339		Zakázka č. (popř. účel): Techmix		
Metoda svařování / druh spoje : 136 / koutový (FW)		Druh svaru: a8		Poloha svař. : PB		Příprava svar.ploch+čištění : Řezání VP + obrábění		
Způsob přenosu kovu : zkrat., sprch.		Základní materiál : 1.4404, 1.4306		Tloušťka mat. (mm): 12-40		Vnější průměr (mm): -		
Tvar spoje :				Postup svařování :				
								
Parametry svařování								
Svar, housenka	Metoda svařování	Rozměr příd.mat. (např. Ø)	Proud [A]	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost pod. drátu [m/min]	Rychlost svařování [cm/min]	Teplotný příkon [KJ/mm]
1.	136	Ø1,2mm	215-230	~26 V	DC / +	-	-	-
2.	136	Ø1,2mm	210-225	~25 V	DC / +	-	-	-
3.	136	Ø1,2mm	195-210	~24 V	DC / +	-	-	-
4.	136	Ø1,2mm	195-210	~24 V	DC / +	-	-	-
5.								
6.								
7.								
8.								
9.								
10.								
Přídavný materiál (druh + značka):			Trub. drát Kobelco DW - 309L, EN ISO 17633-A: T 23 12 L R C/M 3					
Předpis pro sušení:			-					
Ochranný plyn:		CORGON 18, EN ISO 14175: M21				Množství:	12-13l / min.	
Plyn-ochrana kořene:		-				Množství:	-	
Wolframová elektroda (typ+vel.):		-				Drážkování kořene:		
Teplota předehřevu:		min.50°		Teplota/čas dohřevu:				
Teplota interpass:		max.70°C						
Teplotné zpracování po svařování :			-					
(rychlost ohřevu, teplota/čas výdrže, rychlost ochlaz., pozn.)								
Zpracoval:	Jakub Hostáček, EWT			Schválil:	Ing. Tomáš Borán, IWE			
Datum:	10.10.2012			Datum:	10.10.2012			



 PME s.r.o.		WPS - POSTUP SVAŘOVÁNÍ Welding procedure specification				Norma: ČSN EN ISO 15 614-1		
Výrobce: PME s.r.o., Kojetínská 83, Přerov		Postup svařování č. : PME 04_49/13		WPQR č. : 1P-2074		Zakázka č. (popř. účel): Techmix		
Metoda svařování / druh spoje : 136 / tupý (BW)		Druh svaru: 12 ½V		Poloha svař.: PB		Příprava svar.ploch+čištění : vodní paprsek		
Způsob přenosu kovu : zkrat. + pulz.		Základní materiál : 1.4462		Tloušťka mat. (mm): 12		Vnější průměr (mm): -		
Tvar spoje :				Postup svařování :				
								
Parametry svařování								
Svar. housenka	Metoda svařování	Rozměr příd.mat. (např. Ø)	Proud [A]	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost pod. drátu [m/min]	Rychlost svařování [cm/min]	Teplotný příkon [KJ/mm]
1.	136	Ø1,2 mm	195 - 210	~24 V	DC / +	-	-	-
2.	136	Ø1,2 mm	215 - 230	~25 V	DC / +	-	-	-
3.	136	Ø1,2 mm	215 - 230	~25 V	DC / +	-	-	-
4.								
5.								
6.								
7.								
8.								
9.								
10.								
Přídavný materiál (druh + značka):			Trub. drát Kobelco DW - 309L, EN ISO 17633-A: T 23 12 L R C/M 3					
Předpis pro sušení:			-					
Ochranný plyn:			CORGON 18, EN ISO 14175 : M21			Množství: 15l /min.		
Plyn-ochrana kořene:			-			Množství: -		
Wolframová elektroda (typ+vel.):			-			Drážkování kořene: -		
Teplota předehřevu:			min. 50°C			Teplota/čas dohřevu:		
Teplota interpass:			max. 70°C					
Tepelné zpracování po svařování :			-					
(rychlost ohřevu, teplota/čas výdrže, rychlost ochlaz., pozn.)								
Zpracoval: Jakub Hostášek, EWT			Schválil: Ing. Tomáš Boráň, IWE					
Datum: 21.3.2013			Datum: 21.3.2013					



		svařovací PLÁN + NDT plán				číslo : S1-102 / 18	
Název zakázky:		Pracoviště:		Přílohy:		Strana číslo:	
LOPATKY MÍCHADLA tl.12 a 15mm, akce LEDVICE		P M E , spol. s.r.o., ul. Kojetinská 83, Přerov				1/1	
Číslo zak. PME /PKZ:	Objednatel:		TECHMIX spol.s r.o., Křížkova 70, 612 00 Brno				
Druh NDT kontroly:	Kritéria NDT kontroly:		Název svařků:		Č.výkresů podsestav:		
VT 100% dle ČSN EN ISO 17637, PT 100% dle ČSN EN ISO 3452-1	VT: ČSN EN ISO 5817 "C", PT: ČSN EN ISO 23277 st.2X		Iopatky - duplex		V 583 306 rev.1, V 583 356 rev.1		
č.výkresů/ č.pozic	ozn. svaru	Materiály - pozice, jakost, rozměr,	Přidávány materiály	Číslo WPS	Číslo WPQR	Kvalifikace svařeče dle EN 287-1	Číslo razidla svařeče
V 583 356 V 583 306 poz. 8,9,10	a7	poz. 8: 1.4462 - Pl.12(15) poz. 8: 1.4462 - Pl.25 poz. 10: 1.4462 - Pl.12(15)	Ø1,2 G 22 9 3 N L	PME 02_59/18	ZI-18- 208/P02	135 P FW FM5 S 130 PB ml	40
V 583 356 V 583 306 poz. 7 a 8	a8	poz. 7: 1.4462 - Pl.12(15) poz. 8: 1.4462 - Pl.12(15)	Ø1,2 G 22 9 3 N L	PME 02_60/18	ZI-18- 208/P02	135 P FW FM5 S 130 PB ml	40
V 583 356 poz. 8 a 10	12 1/2V	poz. 8: 1.4462 - Pl.12 poz. 10: 1.4462 - Pl.12	Ø1,2 G 22 9 3 N L	PME 04_01/18	ZI-18- 208/P04	141 T BW FM5 S s12 D114,3 PH ss nb	22
V 583 306 poz. 8 a 10	15 1/2V	poz. 8: 1.4462 - Pl.15 poz. 10: 1.4462 - Pl.15	Ø1,2 G 22 9 3 N L	PME 04_02/18	ZI-18- 208/P04	141 T BW FM5 S s12 D114,3 PH ss nb	22
Jméno svařeče:	Pavel Jiřík	Číslo razidla:	225	Oprávněný pracovník NDT (jméno):			
Jméno svařeče:	Antonín Faber	Číslo razidla:	40	p.Koryčánek, VT2, PT2			
Jméno svařeče:	David Hlobil	Číslo razidla:	22	Vystavil :			
Jméno svařeče:	Jaromír Zdráhala	Číslo razidla:	50	Ing. Tomáš Boráň, IWE			
						dopor. svařeči: p.Minařovič, EWT	
						Datum vystavení: razidlo, podpis:	
						20.06.2018	

PME s.r.o.		WPS - POSTUP SVAŘOVÁNÍ Welding procedure specification				Norma: ČSN EN ISO 15 614-1		
Výrobce: PME s.r.o., Kojetínská 83, Přerov		Postup svařování č. : PME 02_59/18		WPQR č. : ZI-18-208/P02		Zakázka č.(popř.účel): Ledvice		
Metoda svařování / druh spoje : 135 / koutový (FW)		Druh svaru: a7		Poloha svař.: PB		Příprava svar.ploch+čištění : řezání vodním paprskem,odmaštění		
Přenos kovu : pulz		Základní materiál : 1.4462		Tloušťka mat. (mm): 10-30		Vnější průměr (mm): -		
Tvar spoje :				Postup svařování :				
								
Parametry svařování								
Svar. housenka	Metoda svařování	Rozměr příd.mat. (např. Ø)	Proud [A]	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost pod. drátu [m/min]	Rychlost svařování [mm/s]	Teplotní příkon [KJ/mm]
1.	135	Ø1,2mm	210-230A	23-26V	DC / +	7,7	3,74	1,28
2.	135	Ø1,2mm	210-230A	23-26V	DC / +	7,7	4,67	1,02
3.	135	Ø1,2mm	210-230A	23-26V	DC / +	7,7	4,08	1,17
Přidavný materiál (druh + značka):			Drát OK Autrod 2209 (EN ISO 14343-A : G 22 9 3 NL)					
Předpis pro sušení:			--					
Ochranný plyn:		Cronigon 2 (ČSN EN ISO 14175 : M12-Arc-2,5)				Množství:	12-14l /min.	
Plyn-ochrana kořene:						Množství:		
Wolframová elektroda(typ+vel.):						Drážkování kořene:		
Teplota předehřevu:						Teplota/čas dohřevu:		
Teplota interpass:		max.150°C						
Teplotné zpracování po svařování :								
(rychlost ohřevu,teplota/čas výdrže, rychlost ochlaz.,pozn.)								
Zpracoval:	Tibor Minarovič, EWT			Schválil:	Ing.Tomáš Boráň, IWE			
Datum:	1.6.2018			Datum:	1.6.2018			

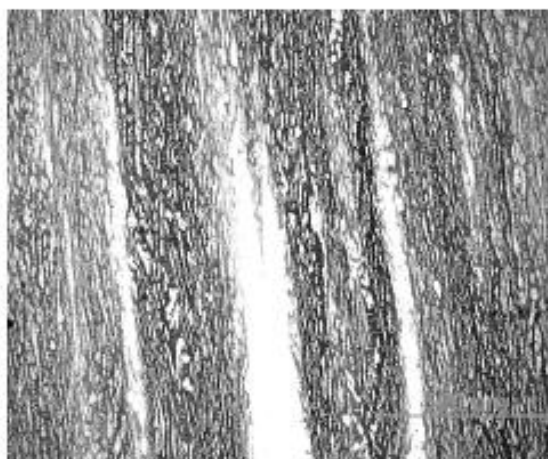
		SWAŘOVACÍ PLÁN				Číslo : 03 - 044 / 13			
Název zakázky: 1ks mích.ústrojí pro záložní nádrž sádrovcové sus penze		KKS: 4A1EUD81AM001_		Pracoviště: PME s.r.o., ul. Kojetinská 83, Přerov		Priorita: 1/1			
Číslo zakázky: 044/13		Objednatel: TECHMIX spol.s r.o., Křížkova 70, 612 00 Brno, kontakt.osoba: Ing.Toman							
Druh NDT kontroly: VT 100% dle ČSN EN ISO 17637		Kritéria NDT kontroly: ČSN EN ISO 5817 "C"		Název svařku: náboj míchadla - 1.4462, lopatky míchadla 1 - 1.4462		Č. výkresu podstav.: V 583 301, V 583 306, V 583 356			
Č. výkresu/č. pozic	ozn. svaru	Materiály - pozice, jakost, rozměr, IČM	Přídavný materiál, IČM	Číslo WPS	Číslo WPQR	Kvalifikace svářeče dle EN 287-1	Číslo razidla svářeče	Návod pro svařování	NDT protokol
V 583 301 poz. 2-4	a10	poz.2 - 4: 1.4462-Pl.25, A13/181	Ø1,2 TZ312LRC/M3 ..A12/457	PME 02_31/11	1P-1339	136 P FW 8 R t10 PB ml	50	Č.2	10 - 044 / 13
V 583 301 poz. 3a5	10½V	poz.3: 1.4462-Pl.25, A13/181, poz.5: 1.4462-KuJ.30, A13/187	Ø1,2 TZ312LRC/M3 ..A12/457	PME 04_47/13	1P-2074	136 P BW 8 R t15 PA bs	40	Č.2	
V 583 306 poz. 7-10	a7	poz.7,8 a 10: 1.4462-Pl.15, A13/182, poz.9: 1.4462-Pl.25, A13/181	Ø1,2 TZ312LRC/M3 ..A12/457	PME 02_44/12	1P-1339	136 P FW 8 R t10 PB ml	54	Č.2	11 - 044 / 13
V 583 306 poz. 8a10	15½V	poz.8 a 10: 1.4462-Pl.15, A13/182,	Ø1,2 TZ312LRC/M3 ..A12/457	PME 04_48/13	1P-2074	136 P BW 8 R t15 PA bs	40	Č.2	
V 583 356 poz. 7-10	a8	poz.7,8 a 10: 1.4462-Pl.12, A13/183, poz.9: 1.4462-Pl.25, A13/181	Ø1,2 TZ312LRC/M3 ..A12/457	PME 02_30/11	1P-1339	136 P FW 8 R t10 PB ml	54	Č.2	12 - 044 / 13
V 583 356 poz. 8a10	12½V	poz.8 a 10: 1.4462-Pl.12, A13/183,	Ø1,2 TZ312LRC/M3 ..A12/457	PME 04_49/13	1P-2074	136 P BW 8 R t15 PA bs	40	Č.2	
Jméno svářeče:		Ladislav Kašpárek		Číslo razidla:		20		Oprávněný pracovník NDT (jméno, podpis):	
Jméno svářeče:		Jaroslav Doležel		Číslo razidla:		54		Vystavil (jméno, příjmení, razítko, podpis):  Ing. Tomáš Boráň, IWE	
Jméno svářeče:		Antonín Faber		Číslo razidla:		40			
Jméno svářeče:		David Hlobil		Číslo razidla:		22			
Jméno svářeče:		Jaromír Zdráhala		Číslo razidla:		50			

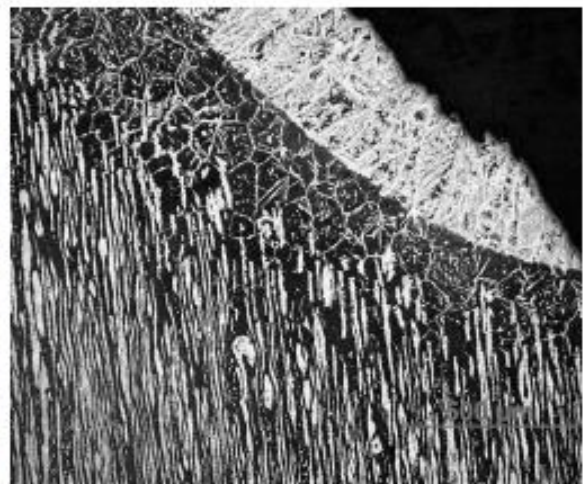
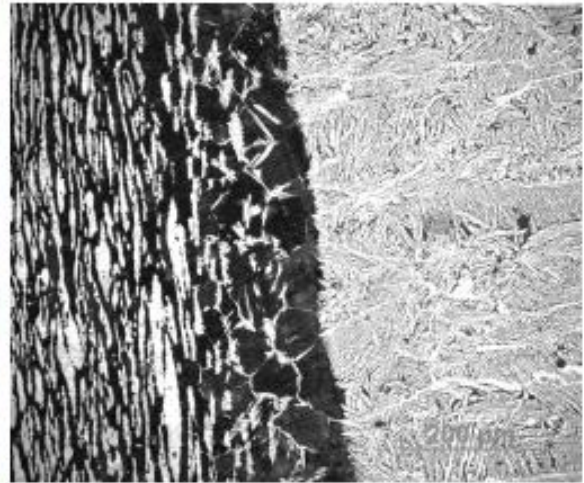
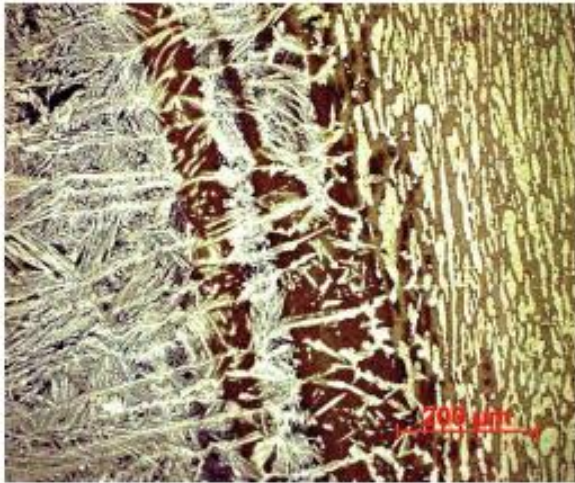
IČM.....dokument kontroly (atest)



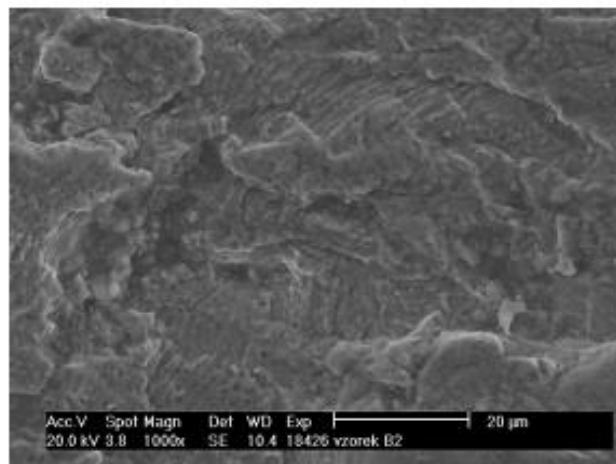
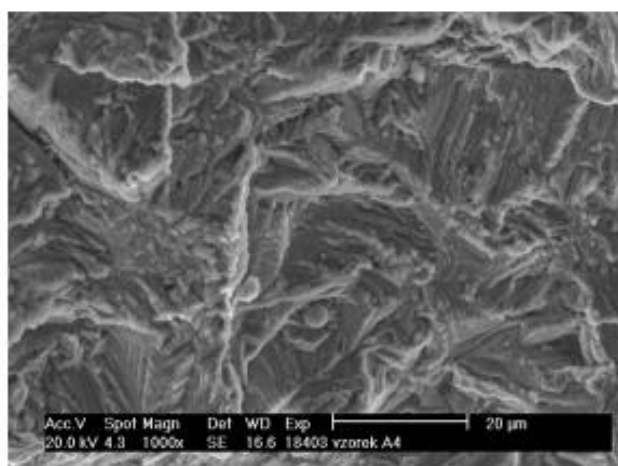
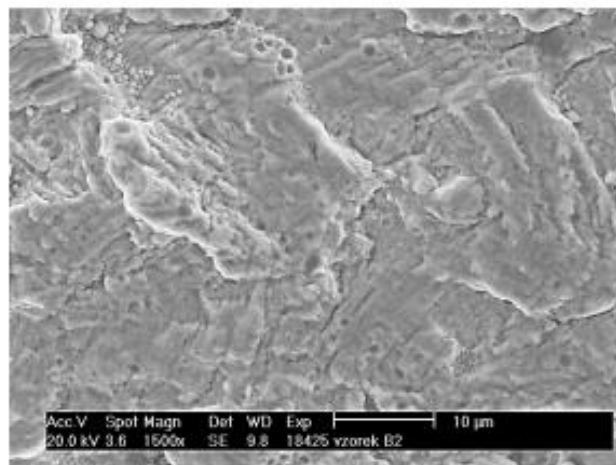
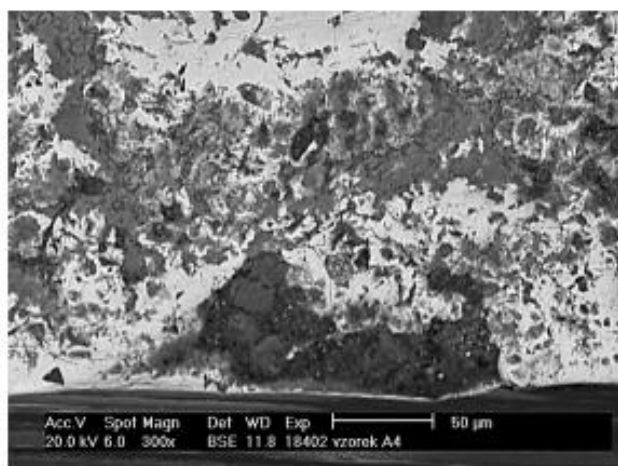
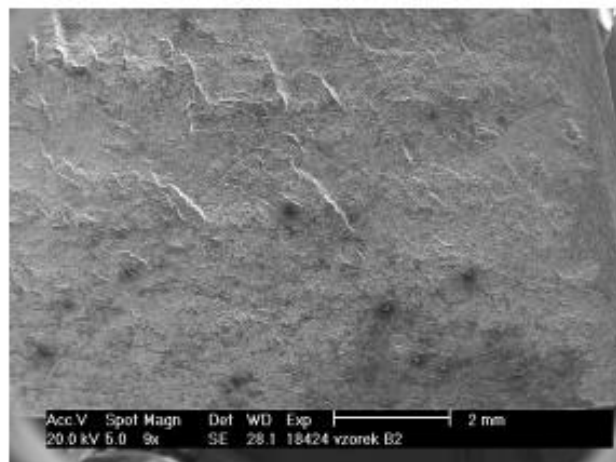
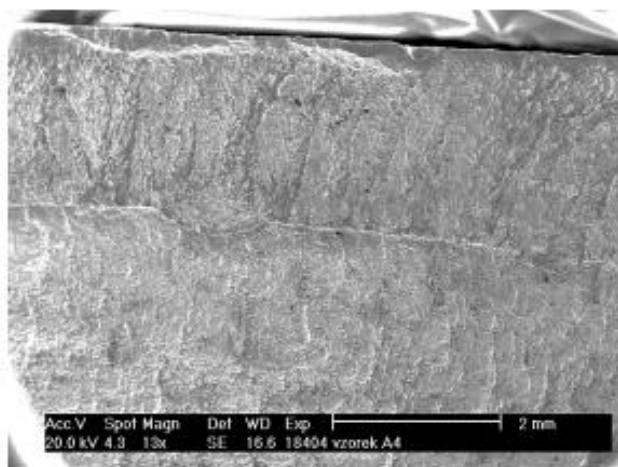
Snímky analýz z fraktografie a metalografie obou analyzovaných lopatek

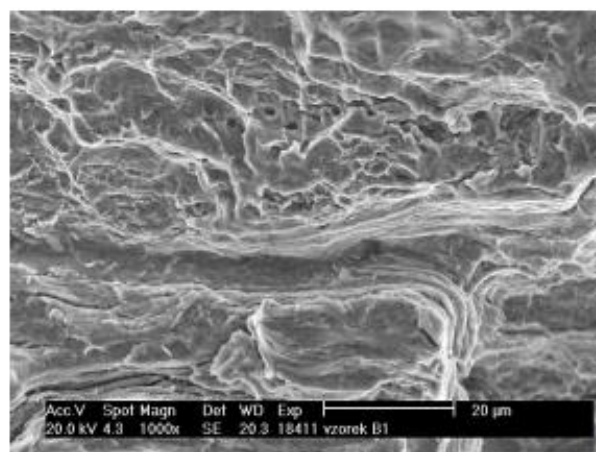
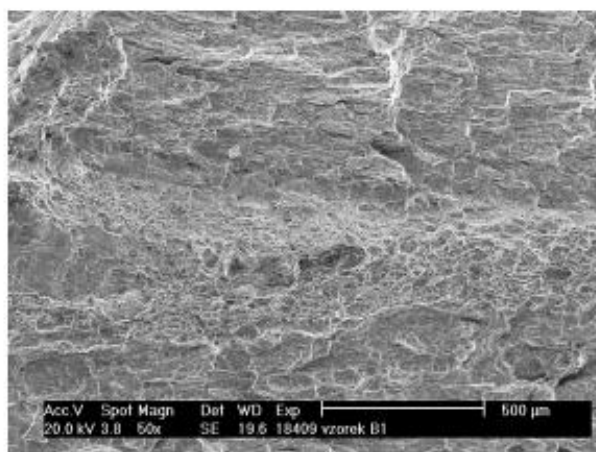
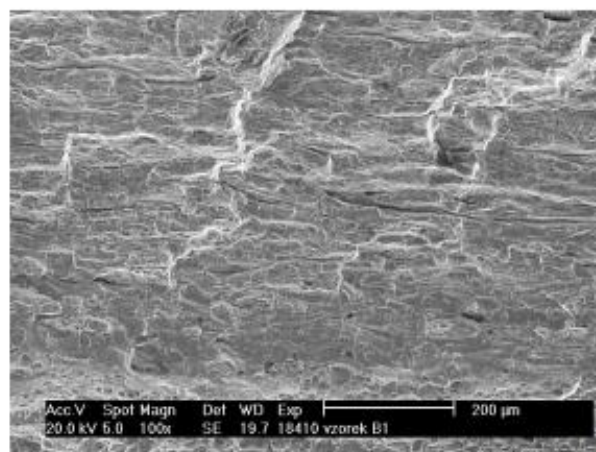
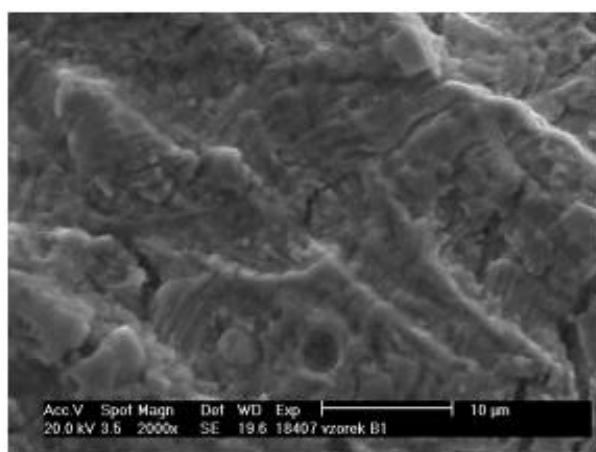
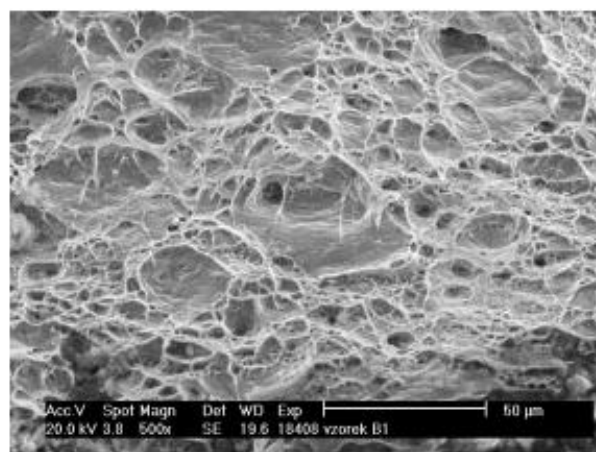
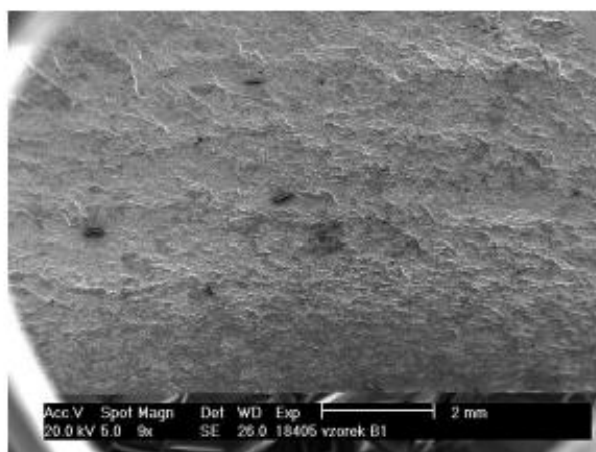
Metalografické snímky první analyzované lopatky



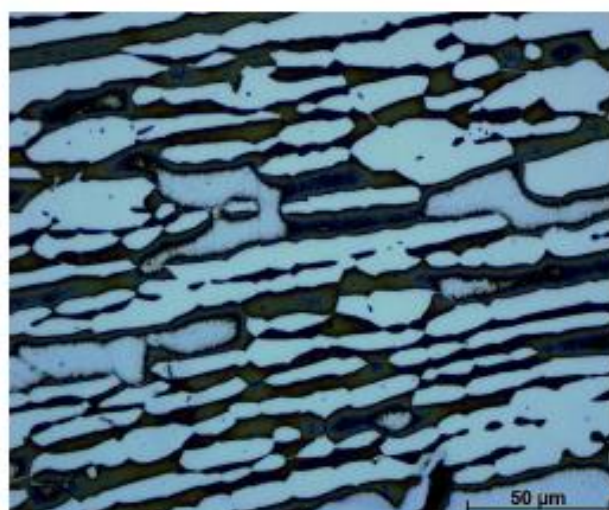
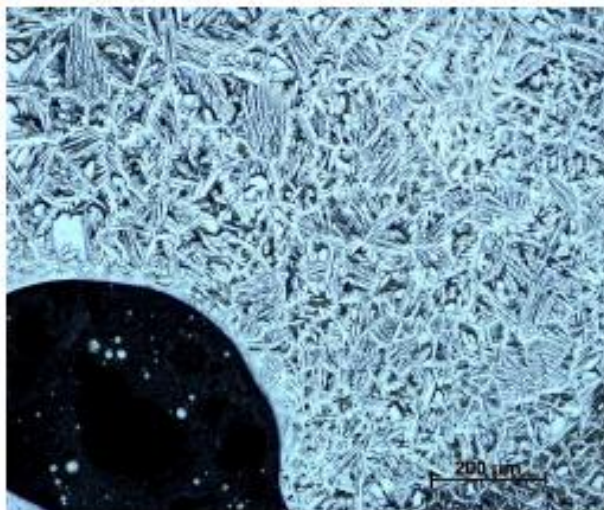
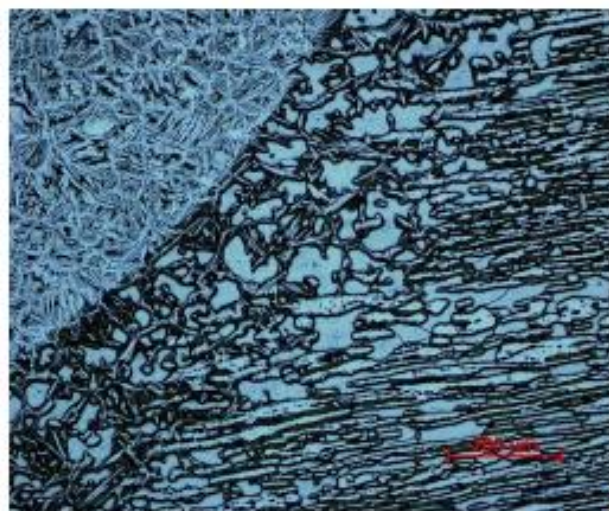
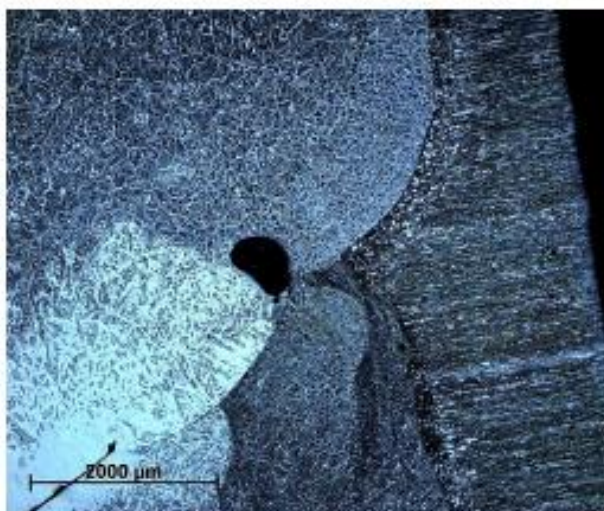
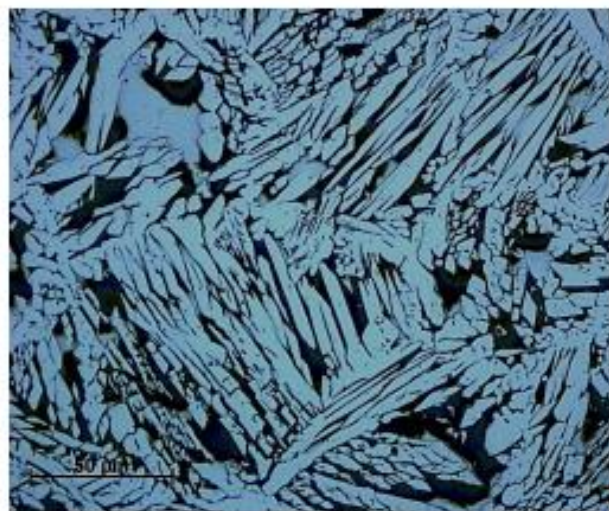
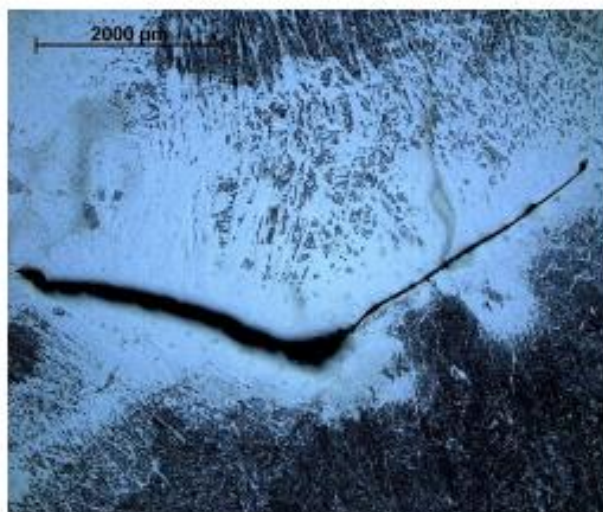


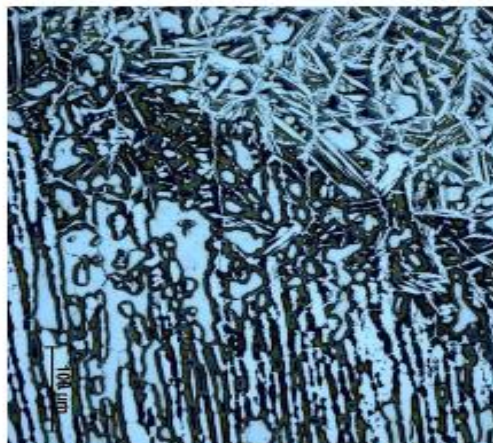
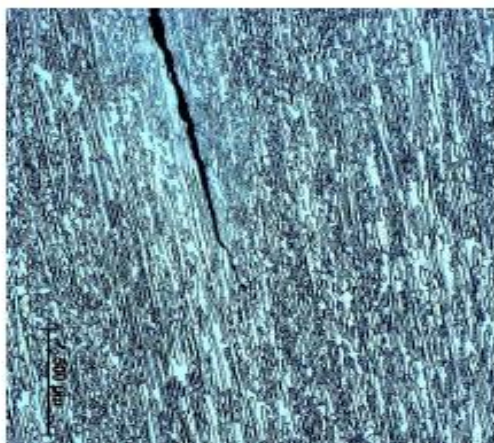
Fraktografické snímky první analyzované lopatky





Metalografické snímky druhé analyzované lopatky





Fraktografické snímky druhé analyzované lopatky

