



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

**KÕRGLEGEERITUD ROOSTEVABA TERASEST
SURVESEADME PÕHIKESTA
KEEVITUSTEHNOLGOOGIA VÄLJATÖÖTAMINE
ETTEVÖTTES ESTANC AS**

**DEVELOPMENT OF THE WELDING TECHNOLOGY FOR THE
HIGH ALLOY STAINLESS
STEEL PRESSURE EQUIPMENT MAIN SHELL AT ESTANC AS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Sergey Grigorash

Üliõpilaskood: 176865MATM

Juhendajad: Fjodor Sergejev, dotsent
Mart Kolnes, doktorant-nooremteadur

Tallinn 2020

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Sergey Grigorash (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 18.07.84)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Kõrglegeeritud roostevaba terasest surveseadme põhikesta keevitustehnoloogia väljatöötamine ettevõttes ESTANC AS",

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on dotsent Fjodor Sergejev ja kaasjuhendaja on doktorant-nooremteadur Mart Kolnes,

(*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

_____ (*allkiri*)

_____ (*kuupäev*)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Sergey Grigorash, 176865MATM
Õppekava, peeriala: MATM02/15, Tootearendus ja tootmistehnika
Juhendaja(d): Fjodor Sergejev, dotsent, tel +372 620 3346
Mart Kolnes, doktorant-nooremteadur, tel +372 620 3347
Konsultant: Ivan Kovba, vanem kvaliteediinsener
ESTANC AS, tel +372 5837 0484, ivan.kovba@estanc.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Kõrglegeeritud roostevaba terasest surveseadme põhikesta keevitustehnoloogia väljatöötamine ettevõttes ESTANC AS

(inglise keeles) Development of the welding technology for the high alloy stainless steel pressure equipment main shell at ESTANC AS

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Vajalikke keevituse lisamaterjalide ja teoreetiliste keevitusparameetrite valimine
2. Valitud keevituse parameetrite ja põhimaterjalide katsetamine
3. Keevitustehnoloogia väljatöötamine saadud tulemuste põhjal

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teostada katsekeevitamised	15.10.19
2.	Analüüsida mittepurustava- ja purustava kontrolli tulemusi	01.11.19
3.	Analüüsida defektide vältimise võimalusi, mida leitakse mittepurustava- ja/või purustava kontrolliga	15.11.19
4.	Andmete analüüs ja järeldused	25.11.19
5.	Eksperimentaalosa koostamine	01.12.19
6.	Lõputöö kirjutamine ja kokkuvõtte kirjeldamine	16.12.19

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: 05.01.2020 a

Üliõpilane: Sergey Grigorash ".....".....201....a
/allkiri/

Juhendaja: Fjodor Sergejev ".....".....201....a
/allkiri/

Kaasjuhendaja: Mart Kolnes ".....".....201....a
/allkiri/

Konsultant: Ivan Kovba ".....".....201....a
/allkiri/

Programmijuht: Martin Eerme ".....".....201....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISUKORD	5
EESSÕNA	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
SISSEJUHATUS	9
1. ÜLEVAADE ETTEVÕTTEST	11
1.1 Ettevõttes kasutatavad keevituse tehnoloogiad kõrgleegeritud roostevaba terase kokku keevitamiseks.....	12
1.2 Ülevaade kõrgleegeritud roostevaba terastest ja nende keevitustehnoloogiad.....	16
1.2.1 Kõrgleegeritud austeniit roostevaba teras 254 SMO	17
1.2.2 Kõrgleegeritud austeniit-ferrit roostevaba teras Super Duplex	22
1.2.3 Keevituse kaitsegaasi soovitused	31
1.3 Ülevaade kõrgleegeritud roostevaba teraste põhidefektidest ja nende tekkemehhanismid	31
1.3.1 Pooride ja poorsuse mõiste ja tekkemehhanism	31
1.3.2 Tardumise- või likvatsiooni kuumpragumise mõiste ja tekkemehhanism.....	35
1.3.3 Sigma faasi mõiste ja tekkemehhanism	39
2. PRAKTILINE OSA	41
2.1 2 toodangut, mis on kõrgleegeritud roostevaba terasest keevitustehnoloogia väljatöötamisega seotud.....	41
2.2 Keevisliidete valik uuringuks	43
2.2.1 Katsekehade valmistamine ja keevitamine	44
2.2.2 NDT- ja DT-uurimine ja katsetamine	47
2.3 SEM ja EDS analüüs ja tulemuste analüüs.....	51
2.3.1 Katsekeha nr pWPS257-I, põhimaterjal on 1.4547 ehk 254 SMO.....	52
2.3.2 Katsekeha nr pWPS258-M, põhimaterjal on 1.4410 ehk Super Duplex.	58
Tulemuste analüüs [49]:.....	58
2.4 XRD faasiline analüüs	60
2.4.1 Katsekeha nr pWPS257-I, põhimaterjal on 1.4547 ehk 254 SMO.	60
2.4.2 Katsekeha nr pWPS258-M, põhimaterjal on 1.4410 ehk Super Duplex.	61
2.5 KOKKUVÕTE, JÄRELDUSED JA TULEVASED UURINGUD.....	62
2.6 SUMMARY, CONCLUSION AND FUTURE DEVELOPMENT	64
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	67

LISAD 70

EESSÕNA

Lõputöö teema valik ja käesolev uurimistöö on innustanud ja toetanud minu pikaajalise tööandja ja inseneride meeskonna ESTANC ASi poolt. Mittepurustava- ja purustava kontrolli on teostanud Inspecta Estonia OÜ ja TalTechi Mehaanika ja metroloogia katselabori ekspertide poolt. Samuti soovin tänada oma lõputöö mõlemat juhendajat TalTechi dotsent Fjodor Sergejevit ja doktorant-nooremteadlane Mart Kolnest, ESTANC ASi lõputöö juhendajat Kovbat töö loomisel osutatud abi eest.

Võtmesõnad: surveseade, põhikest, keevitustehnoloogia, roostevaba, 254SMO (EN nr 1.4547), Super Duplex (EN nr 1.4410), NDT ja DT-kontroll.

Key words: pressure equipment, main shell, welding technology, stainless steel, 254 SMO (EN no 1.4547), Super Duplex (EN no 1.4410), NDT ja DT-test.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

EN – Euroopa standardid (ingl k European Standards or European Norms);

ITP – inseneri-tehnilise personaal;

NDT – mitte purustav kontroll (ingl k Non destructive testing);

DT – purustav kontroll (ingl k Destructive testing);

NoBo – akrediteeritud järelevalve asutus (ingl k Notified Body);

RT – röntgenkatse (ingl k X-Ray test);

DRT – digitaalne röntgenkatse (ingl k digital X-Ray test);

MT – magnetpulberkatse (ingl k magnetic particle test);

PT – penetrantkatse (ingl k penetrant test);

UT – ultraheli katse (ingl k ultrasonic test);

VT – visuaalne katse (ingl k visual test);

PRE – kontaktväsimuse ekvivalent (ingl k Pitting resistance equivalent)

SISSEJUHATUS

Esimene Estanc AS-i poolt toodetud roostevaba terasest survemahuti valmis aastal 2003. Tänapäevaks on ESTANC AS survemahutite tootmise alal tõusnud positsioonile, kus ettevõtte tooted on esindatud nii nafta-, energia-, toiduainete-, keemia-, kaevandus-, põllumajandus-, aga ka näiteks paberitööstuses kogu maailmas. Esmaseks prioriteediks on toodete kõrge kvaliteet, oluline on konkurentsivõimeline hind ja pidevalt arendada tehnilistes lahendustes, et säilitada ettevõtte saavutatud kõrge positsioone [1].

Tööstuses kasutatavad surveanumad on lekkekindlad, tavaliselt silindrilise või sfäärilise kujuga, erinevate peakonfiguratsioonidega. Surveanum koosneb kestast ehk mahutist ning siseosadest (torustikud, restid, kanalid ja võrgud), mis tuleb kompaktselt väliskesta sisse paigaldada. Seadmete suurusest ja projektipõhisusest tingituna on kogu koostamine ja keevitamine automatiseerimata. Surveseadete on tavaliselt valmistatud süsinikterasest või roostevabast terasest ja kokkupandud keevitamise teel [2].

Surveanuma konstruktsioon sisaldab pingeid, mis jaotakse risti ehk radiaalselt mõjutavateks pingideks, mis tekivad siserõhu mõjul, paindemomendist, tuulekoormustest ja seismilistest koormustest põhjustatud erinevad paindepinged, surve- ja tõmbepinged platvormi ja anuma sisu omakaalu, maksimaalne pinge ebakorrapärasuse tõttu, eriti lokaliseeritud piirkondades, ja pinged termilise gradiendi pärast. Soojuspinged on rõhuanumate kujundamisel üliolulised [2].

Töösurve mõjutab materjali stabiilsust kasutustingimustes, näiteks vesinikhaprumine kõrgsurvel ja H₂S (vesiniksulfiid) kõrgel temperatuuril [2].

Surveanumate materjali valik põhineb korrosioonimääral ja muudel materjali tõsiselt kahjustavatel mehhanismidel, mis hõlmavad pingekorrosiooni pragunemist ja vesiniku dispersiooni. Korrosiooni kiiruse andmed aitavad otsustatud korrosiooni- ja laborikatsete abil kindlaks teha, kas valitud materjal oli sobiv [2].

Roostevaba teras on ideaalne materjal püsivate lahenduste loomiseks nõudlikes rakendustes sh surveseadme valmistamise valdkonnas. Selle kasutusviise on lõputult. Tänu sellistele ainulaadsetele omadustele nagu vastupidavus, vähene hooldus ja korrosioonikindlus on roostevaba teras mitte ainult tugevaim, vaid ka majanduslikult kõige jätkusuutlikum valik [2].

Roostevabadest terasest, milles kroomi sisaldus on üle 13% ja mis on olemuselt ferriitsed ja martensiitsed, on kalduvuses sigma faasi [3]. Üldiselt ei ole austeniitsed roostevaba terasid eriti tundlikud korrosiooni suhtes, kuid korrosioonikindlust võib vähendada neis tekkiv sigma faas, kui neid hoida temperatuuril vahemikus 538 kuni 816°C. Eriti tundlikud on need valamisele ja keevitusele, mis võib lühikese aja jooksul

tekitada ulatuslikku kroomi kadumise 649 kuni 704°C. Dupleksterased on tundlikud sigma faasi tekke suhtes, mis omakorda toob kaasa ferriitse faasi vähenemise [2].

Roostevaba teras kasutamiseks üle 400°C on kõrge kroomi baasil valmistatud roostevabad terased tekitavad kõrgel temperatuuril sigma faasi ja madalamatel temperatuuripiiridel toimub nende vesinikpragumine. Sigma faas on oma olemuselt kõva, habras ja mittemagnetiline ning see koostis põhineb sulamist, milles seda toodetakse. See ei mõjuta terase omadusi kõrgel temperatuuril, kuid võib madalamatel temperatuuridel vähendada selle elastsust, mille tõttu võib süsteemi käivitamise või sulgemise ajal kahjustada [2].

Roostevabast terasest Super Duplex (EN nr 1.4410) on vesinikpragumise vältimiseks lubatud maksimaalne töötemperatuur 343°C. Martensiit klassid on tundlikud vesinikhaprumiseks. Keevisõmblused on kuumtöötlemise teel peaaegu pehmenenud ja seetõttu on nad murdumise suhtes tundlikud. Keevisõmbluse tugevus ja kõvaduse piiramine võib vältida pragunemist [2].

Niklisulamit 254 SMO (EN nr 1.4547) kasutatakse spetsiaalsetes rakendustes ja sageli plakeeritud ehk pealekeevitatud kujul. Vähesed niklisulamid pakuvad sobivat vastupidavust kloriidilahustele, kui roostevabast terasest klassid ei paku piisavat jõudlust. Niklisulamite keevitus nõuab ITP-personaali ja keevitaja ettevõtte eriteadmisi ja oskusi keevitusvaldkonnas [2].

Kasutatud keevitustehnoloogia ettevõttes peab olema heaks kiidud ja sertifitseeritud surveadmete direktiivile 2014/68/EL (vana direktiiv 97/23/EL) vastavate toodete valmistamiseks. Katsetuste nõudmised tulevad mitte laborist vaid keevitamise atesteerimise protseduurist ja tellija poolt esitatud nõuetest.

Antud lõputöö teemaks on kahest kõrglegeeritud roostevaba terasest 254 SMO (EN nr 1.4547) ja Super Duplex (EN nr 1.4410) surveadme põhikesta keevitustehnoloogia väljatöötamine ettevõttes ESTANC AS.

Lõputöö eesmärk on valida vajalikke keevituse lisamaterjale ja teoreetiliste keevitusparameetreid kaasates maailma üldtunnustatud tehnikakirjanduse ja teadusartiklite ülevaatus, seejärel katsetada valitud keevituse parameetreid ja põhimaterjale mittepurustava- ja purustava katsetamise kontrolli katselaboris sh kasutades füüsikalisi ja füüsikalisi-keemilisi uuringumeetodeid (EDS, SEM ja XRD). Lõplikul faasil saadud tulemuste põhjal tuleb välja töötada keevitustehnoloogiat.

1. ÜLEVAADE ETTEVÖTTEST

Ettevõtte on rajatud aastal 1992. aastal, mis praeguseks hetkeks on moodustunud rohkem kui 2 dekaadi pikkuseks kogemuseks turul. Tänapäevaks on Estanc suurim omataoline ettevõtte nii Baltikumi kui ka Põhjamaade regioonis. Ettevõtte 2018. aasta käive oli 18,7 miljonit eurot ja 2019. aasta oodatav käive 31 miljonit eurot, sealjuures 97% meie ärist moodustab eksport [1].

Estanc on oma võimekuse üle toota erineva suuruse ja kujuga tooteid nii süsinik- kui roostevabast terasest, terasest mis on mõeldud eriti korrosiooni tekitavatesse keskkondadesse ning kõrge temperatuuriga keskkondadesse, duplexist, alumiiniumist, titaaniumist, plakeeritud materjalidest. Meie tootespektri laiuusest annab aimu fakt, et meie majast lähevad välja tooted kaaluvahemikus 2kg kuni 200 tonni.

Tootmine toimub modernses tootmiskompleksis, kus on eraldatud 5300 m² musta terase ja kaks 2600 m² roostevaba terase tootmishalli. Tallinna külje all Jüri tehнопargis paiknev asukoht võimaldab meil tänu vahetus läheduses asuvale ringteele hõlpsat ligipääsu nii Paldiski kui Muuga sadamatele, mis on sobivad rahvusvahelisteks vedudeks. [1]

Estanc on valmistanud tooteid eri paikadesse üle kogu Maailma. Meie tooteid leiad Lõunast- põhja teljel näiteks Uruguaist, Mehhikost, Brasiiliast kuni meie põhiliste turgudeni Soomes, Rootsis ja Norras. Idast- läände teljel Venemaast ja Hiinast kuni Kanada, Ameerika ühendriikideni ja igal pool nende äärmuste vahel.

Estanc kliendid on peamiselt maailmas juhtpositsioonidel asuvad ettevõtted, kes opereerivad globaalselt sellistes baasmajandusharudes nagu energia, naftakeemia, tselluloos ja paber, merendus, kaevandus, puidu töötlemine, vee käsitlemine, aga ka teistel aladel [1].

Estanc omab laiemat rahvusvahelist kogemust suurte projektidega ja mitmekülgsest nomenklatuurist leiab [1]:

- Surveseadmed – survemahutid, reaktorid, kollonnid, auruakud ja toitevee mahutid ja teised survemahutid;
- LNG mahutid;
- Soojusvahetid – torusoojusvahetid ja õhuelsoojendid (luvod);
- Suitsugaaside pesurid;
- Survevabad mahutid– kütusemahutid ja survevabad mahutid;
- Korstnad;
- Torustikud;

Klientidele pakutakse erinevad inseneri lahendused näiteks soojustehnilised arvutused soojusvahetite, toiteveemahute ning aurustilindrite jaoks sealhulgas lisaabi klientidele

uute seadmete arendamisel. Projekteerimine toimub vastavalt EN13445, EN12952, ASME Section VIII div1, ASME Section I, Gost ja EN14015 standardile [1].

Toodete disain ja 3D modellerimine toimub SolidWorks, AutoCAD ja Inventor tarkvara abil. Toodete kontroll teostatakse mittepurustava katsetamise põhjal (NDT) erinevate partnerite abil, näiteks Inspecta Estonia OÜ, Dekra, TÜV Eesti ja muud [1].

Ettevõttes kasutatakse mittepurustava kontrolli meetodid näiteks radiograafiline kontroll (X-Ray test (RT) või digital X-Ray test (DRT)), magnetic particle test (MT), penetrant test (PT), ultrasonic test (UT), visual test (VT) ja muud. Survekatse abil katsetatakse toodangud rõhuga rohkem kui 300 baari. Põhikesta lehtmestallist valtsimine on võimalik kuni 65 mm-ni [1].

Ettevõttes kasutatavad keevitusprotsessid on 111(MMA), 121(SAW), 123(SAW), 131(GMAW/MIG), 135(GMAW/MIG), 136(FCAW), 138(FCAW), 141(GTAW/TIG), 142(GTAW/TIG), 721 (WOL) ning orbitaalkeevitus toru ja torulaua liites. [11] Ettevõtte on sertifitseeritud vastavalt EN ISO 9001 ja EN ISO 3834-2 standardile. Euroopa Liidu piirkonnas ESTANC AS järgib direktiivi PED 2014/68EU, kus ettevõtte kasutab harmoniseeritud EN standardid EN 13445, EN 12953, EN 12952, EN 14015, EN 13480, EN 1090 ja muud [1].

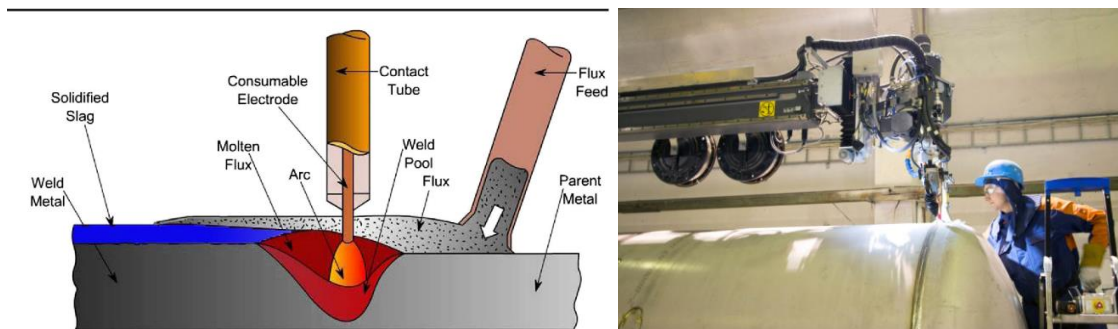
Ettevõtte kasutab surveanumate valmistamiseks järgmised põhimaterjalid sealhulgas süsinikterased (P-terased survemahutite jaoks P235GH, P265GH, P355GH või P355NL1/2), 16Mo3, CrMo-terased (10CrMo9-10, 13CrMo4-5), ASME / ASTM materjalid ja roostevaba terased (EN no 1.4301/1.4307, 1.4306, 1.4401/1.4404, 1.4432/1.4436), Duplex terased – EN no 1.4162, 1.4362, 1.4462, Super duplex teras (EN no 1.4410), kõrgleegeritud austeniit roostevaba terased ja niiklisulamid (254SMO, Alloy 31, Alloy 59, Alloy 904, Alloy 926, Hastelloy C22 ja C276, Inconel 600 ja 625, Incoloy 800) [1].

1.1 Ettevõttes kasutatavad keevituse tehnoloogiad

kõrgleegeritud roostevaba terase kokku keevitamiseks

ESTANC ettevõtte kasutatavate keevituse tehnoloogiate loetelu on allpool. Keevituse protsesside nimetused on toodud vastavalt EN ISO 4063 standardile [10].

121 - Räbustikaarkeevitus täistraadiga (Submerged arc welding with solid wire electrode), vt joonis 1.1 [10]:

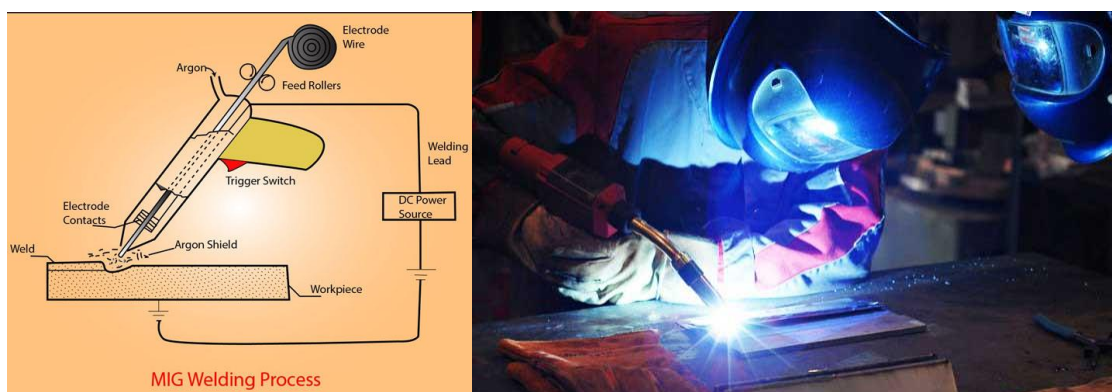


Joonis 1.1 Rästikaarkeevituse täistraadiga tööprotsessi kirjeldus [12].

Eelised: takistab kuumade materjalide pritsimist, voog takistab kõrge kiirguse taseme õhku eraldumist, vette sukeldatud kaarkeevitus ei vaja keevituseks lisarõhku, kuna see on elektroodi juba tekitatud, rakendus sobib suurepäraselt õhukeste metallplekkide kiireks keevitamiseks ja loob keevisliidete vahel kindla sulandumise, annab suure produktiivsuse, kiire sõidukiiruse, kõrge korratavuse ja kvaliteetsed tulemused [11].

Puudused: kaarkeevituse sukeldamises mõned piirangud, SAW-ga keevitatavad materjalid on piiratud terase, roostevaba terase ja mõne nikliga, on piiratud ka pikkade ja sirgete materjalidega või keeratavate torudega materjalidega, endiselt on oht, et neist jääb järele jäänud volav jääk, mis võib kahjustada töötajate tervist [11].

131 MIG-keevitus täistraadiga (MIG welding with solid wire electrode, Gas metal arc welding using inert gas and solid wire electrode, USA) vt joonis 1.2 [10]:

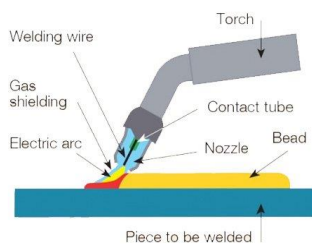
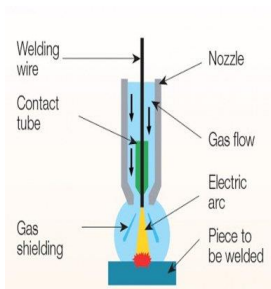


Joonis 1.2 MIG-keevitus täistraadiga tööprotsessi skeem (vasakul) ja foto (paremal) [13].

Eelised: Loob kvaliteetseid keevisõmblusi, väike keevisõmblus, võib kasutada erinevate metallide liitmiseks, võib olla täielikult või poolautomaatne, hea keeviskiirus [14].

Puudused: Ei sobi väliskeevitamiseks, ei sobi paksude metallide jaoks, vajab metalli ettevalmistamist [14].

135 - MAG-keevitus täistraadiga (MAG welding with solid wire electrode, Gas metal arc welding using active gas with solid wire electrode, USA), vt joonis 1.3 [10]:

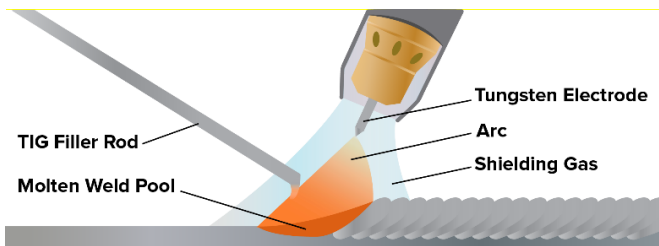


Joonis 1.3 MAG-keevitus täistraadiga tööprotsessi skeem (vasakul) ja foto (paremal) [15].

Eelised: keevisõmbelus on oksüdeerimise eest kaitstud, räbu ei toodeta, töökiirus on väga kõrge, tulemuseks on ümbritseva materjali madalam kuumusmõju, seda protseduuri saab kasutada mis iganes keevitusasendis, nende eriliste eeliste tõttu on see nüüd kõige enam kasutatav keevitusprotseduur [14].

Puudused: tuule vastuvõtlikkus - metallist varjestusega gaasi keevitamine ei saa toimuda õues, MAG-keevitamine nõuab palju kogemusi ja seda pole lihtne kontrollida, lisaks tuleb keevispinnalt eelnevalt eemaldada kogu rooste, lisaks nõuetekohasele kaitseriietusele tuleb erilist tähelepanu pöörata ka silmaümbruse rangele kasutamisele õiges seisundis, kuna keevisõmbeluse leek moodustab märgatavalt ereda kaare [14].

141 - TIG-keevitus täisliisamaterjaliga (traat/varras) (TIG welding with solid filler material (wire/rod), Gas tungsten arc welding using inert gas and solid filler material (wire/rod) GTAW, USA) vt joonis 1.4 [10]:



Joonis 1.4 - TIG-keevitus täisliisamaterjaliga tööprotsessi skeem (vasakul) ja foto (paremal) [20].

Eelised: väga puhtad keevisõmbelused, pakub keevitajale suurt kontrolli, võib kasutada täitematerjaliga või ilma, saab teha käsitsi või automaatselt, loob tugevad keevisõmbelused [15].

Puudused: aeglane aja järgi, vajab kvalifitseeritud keevitajaid, ei saa kasutada paksemate metallühenduste jaoks [15].

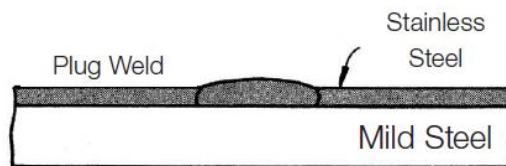
721 - Elektriräbukeevitus lintelektroodiga (Electroslag welding with strip electrode) [10] vt joonis 1.5 [10]:



Joonis 1.5 - Elekträrbukeevitus lintelektroodiga tööprotsessi skeem (vasakul) ja foto (paremal) [18].

Madalsüsinikterasest protsessi ja ladustamise seadmed on mõnikord pealekeevitatud roostevaba terasega korrosioonikindluse jaoks. Minimaalselt kolm erinevaid meetodi kasutatakse [19]:

- 1) Suured vormitud roostevaba terasest lehed on korkõmblusega sagedaste intervallidega pealekeevitatud, vt joonis 1.6;



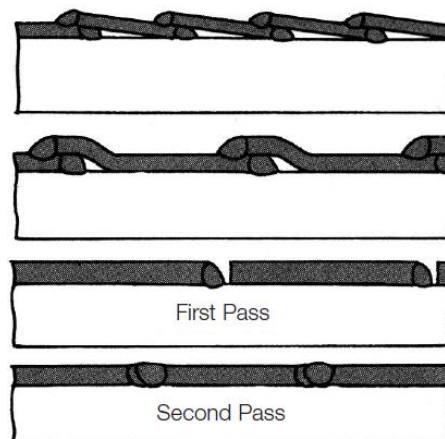
Joonis 1.6 Plug weld cladding method [19].

- 2) Ülekaetud õmblused, mis on pealekeevitatud põhimaterjalile, vt joonis 1.7;



Joonis 1.7 Stringer beads cladding method [19].

- 3) Väikesed ribad on üle kaetud või pealekeevitatud kõrvuti kesta peale. Mõnikord see meetod nimetatakse „wallpapering“, vt joonis 1.8;



Joonis 1.8 „Wallpapering“ cladding method [19].

Näidis Estanc AS-i tootmise praktikast, vt joonis 1.9:



Joonis 1.9 Keevitusprotsess 721 - elekträrbukeevitus lintelektroodiga. Mahuti ots pealkeevitusega [1].

1.2 Ülevaade kõrglegeeritud roostevaba terastest ja nende keevitustehnoloogiad

Mõned roostevaba teraste margid, mis on kasutamisel ettevõttes ESTANC AS:

- Duplex terased – EN no 1.4162, 1.4362, 1.4462 ja muud;
- Super duplex teras – EN no 1.4410;
- High alloy stainless steel – 254SMO, Alloy 31, Alloy 59, Alloy 904, Alloy 926, Hastelloy C22 ja C276, Inconel 600 ja 625, Incoloy 800 ja muud;

Käesolevas lõputöös uuritakse 2 kõrglegeeritud roostevaba terast 254 SMO (EN nr 1.4547) ja Super Duplex (EN nr 1.4410).

1.2.1 Kõrgleegeritud austeniit roostevaba teras 254 SMO

Raskete korrosioonitingimustele vastamiseks on välja töötatud molübdeeni sisaldavad tugevalt leegeritud rauast, nikkel-kroomist roostevabad terased.

Super austeniit roostevabad terased on suure molübdeeni (>6%) ja lämmastiku lisandite tõttu väga vastupidavad kloriidi torudele ja pragude korrosioonile. Suurem nikli sisaldus tagab parema vastupidavuse stressi-korrosioonipragunemisele võrreldes 300-seeriaga. Need terased lähevad väga korrosioonikindlate nikkelpõhiste sulamite jõudlusele märkimisväärselt madalamate kuludega. Üleausteniitsed terased on amagneetilised ja nende hea keevitatavus ning suurepärase vormitavus.

“Super” austeniit roostevaba terased kasutatakse paberimassi ja paberi, väetiste, heitvee töötlemise, FGD ja keemiliste töötlemiste jaoks.

On välja töötatud kasutamiseks merevees ja muudes agressiivsetes kloriidi kandvates keskkondades [5].

Terast iseloomustavad järgmised omadused [5]:

- Suurepärase vastupidavus punnide ja pragude korrosioonile, PRE = $\geq 42,5^*$;
- Suur vastupidavus üldisele korrosioonile;
- Suur vastupidavus pingekorrosiooni pragunemisele;
- Suurem tugevus kui tavalistel austeniitsetel roostevabadel terastel;
- Hea keevitatavus;

* PRE on määratletud kui massiprotsent, $PRE = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + 16 \times \% N$.

Standardid [5]:

- UNS: S31254;
- En Number: 1.4547;
- En Name: X1CrNiMoCuN20-18-7;

Tootestandardid [5]:

- Õmblusteta toru: ASTM A269, A213, A312, NFA 49-217, EN 10216-5;
- Norsok MDS R11 / R18, IOGP S-563 MDS IR111 / 111S / IR118 / IR118S;
- Keevitatud toru ja toru: ASTM A249, A269, A312, A358, A409;
- Liitmikud: ASTM A182;
- Riba: ASTM A276, A479, EN 10088-3;
- Sepistatud tooted: ASTM A473;

Heakskiidud [5]:

- Ameerika mehaanikainseneride selts (ASME) on heaks kiitnud UNS S31254 (Sandvik 254 SMO) õmblusteta toru kujul kasutamiseks vastavalt ASME katla ja surveanumate koodeksi jaotise VIII jaotisele. 1. UNS S31254 kinnitust õmblusteta toruna ei ole siiski heaks kiidetud, kuid vastavalt ASME punktile UG-

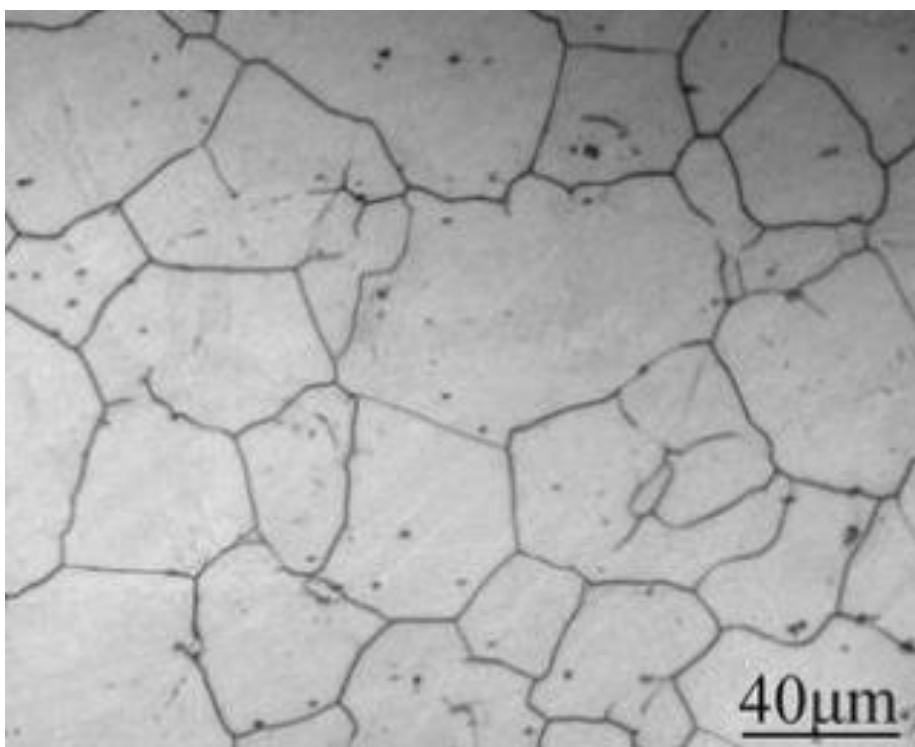
15 on lubatud kasutada õmblusteta toru projekteerimisväärtusi vastavalt ASME jaotise VIII jaotisele div. 1 ka õmblusteta toru jaoks;

- NACE MR 0175 (sulfiidstressi mõranemiskindel materjal naftamaardlate jaoks);

Tabel 1.1 Keemiline koostis (nominaalne) [5].

Keemiline koostis (nominaalne) %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu
≤0.020	≤0.80	≤1.00	≤0.030	≤0.010	20	18	6.1	0.20	0.7

Struktuur (vt joonis 1.10):



Joonis 1.10 254 SMO (EN nr 1.457) roostevaba terasel on austeniit terade mikrostruktuur [5].

Rakendusala [5]:

254 SMO kasutatakse järgmistes rakendusala:

- Seadmed merevee käitlemiseks, näiteks merevee jahutamine, jahutusveetorud, ballastveesüsteemid, tuletõrjesüsteemid jne.;
- Hüdraulilised ja seadmestiku torud;
- Tselluloosi pleegitusettevõtete seadmed;
- Gaasipuhastussüsteemide komponendid;
- Suure halogeniidisisaldusega kemikaalide paagid ja torustikud;

Kaubamärgi teave: 254 SMO on Outokumpu OY omanduses olev kaubamärk.

Mehaanilised omadused (vt tabel 1.2) [5]:

Tabel 1.2 Mehaanilised omadused [5].

Mõõtühikud temperatuuril +20°C						
Materjali paksus, mm	Tinglik voolavuspiir, MPa		Tõmbetugevus, MPa	Suhteline pikenemine, %		Kõvadus
	R _{p0,2} ^{a)}	R _{p1,0} ^{a)}	R _m	A ^{b)}	A ₂ ^{''}	HRB
<5.0	≥ 310	≥ 340	675 - 850	≥ 35	≥ 35	≤ 96
>5.0	≥ 310	≥ 340	655 - 850	≥ 35	≥ 35	≤ 96

1 MPa = 1 N/mm²

a) R_{p0,2} ja R_{p1,0} vastavad vastavalt 0,2% nihetele ja 1,0% nihete tugevustasemele;

b) Põhineb:

$$L_0 = 5,65\sqrt{S_0} \quad (1.1),$$

kus

L₀ - algne gabariidipikkus, mm;

S₀ - algne ristlõikepindala, mm²;

Löögitugevus [5]:

Tänu oma austeniitsele mikrostruktuurile on Sandvik 254 SMO väga hea löögitugevus nii toatemperatuuril kui ka krüogeensetel temperatuuridel.

Katsed on näidanud, et teras vastab Euroopa standarditele EN 13445-2 (UFPV-2) ja EN 10216-5 temperatuuril -196°C esitatud nõuetele.

Kõrgel temperatuuril [5]:

Metallidevahelised faasid sadestuvad temperatuurivahemikus 600–1000°C. Seetõttu ei tohiks terast pikema aja jooksul nende temperatuuridega kokku puutuda.

Tabel 1.3 Mehaanilised omadused kõrgel temperatuuril [5].

Mõõtühikud		
Temperatuur	Tinglik voolavuspiir, MPa	
°C	R _{p0,2}	R _{p1,0}
	min.	min.
100	230	270
200	190	225
300	170	200
400	160	190
500	148	180

Keevitamine ja roostevaba terase maailma tootjatelt soovitus:

SANDVIK AB [5]:

254 SMO keevitavus on hea, madal soojusjuhtivus ja kõrge soojuspaisumine. Seetõttu tuleks keevituskavad eelnevalt hoolikalt valida, nii et keevitatud liigendi moonutused oleksid võimalikult väikesed. Kui probleemiks on jääkpinged, saab pärast keevitamist saab lõõmutada.

Sandvik 254 SMO puhul on soovitatav soojussisestus <1,5 kJ/mm ja läbimitevaheline temperatuur <100°C. Tuleks kasutada sirgläbimi (ingl k stringer bead) keevitustehnikat.

Täitemetallidena tuleb kasutada kõrge molübdeeni ja kroomi sisaldavaid niklisulameid, et neil oleks keevitatud olekus hea korrosioonikindlus.

MIG / MAG keevitamine [5]:

Positiivse elektroodi abil saavutatakse hea läbitungimine igat tüüpi keevitatud vuukides. Järgmises tabelis on toodud MIG-keevituse üldised tingimused.

Tabel 1.4 Soovitavad keevitusparameetrid MIG/MAG keevituse protsessiks [5, 6].

Traadi läbimõõt, mm	Traadi etteande kiirus, m/min	Vool, A	Pinge, V	Keevituse kaitsegaasi kulu, l/min.
Pihustuskaar (ingl k Spray-arc welding)				
1.0	6-12	150-230	26-31	22
1.2	5-9	170-280	27-32	22
Impulsskaar (ingl k Pulsed-arc welding ¹⁾)				
1.2	3-10	150-250	23-31	20

1) Impulsi parameetrid: tippvool 300–400A, taustvool 50–150A, sagedus 80–120Hz (ingl k Pulse parameters: Peak current 300-400A, Background current 50-150A, Frequency 80-120Hz)

Lühikaarega keevitamist kasutatakse õhukese läbimõõduga materjaliga, mille paksus on alla 3 mm, juurekaevude sadestamiseks ja tasapinnast väljapoole jäävate kohtade keevitamiseks.

Mida suurem on lühikese kaare keevitamise induktiivsus, seda suurem on sula sujuvus. Pihustuskaarkeevitust kasutatakse tavaliselt suurema paksusega materjali puhul.

TIG / GTAW keevitamine [5]:

TIG-keevitamise parameetrid sõltuvad suuresti põhimaterjali paksusest ja keevitusviisist. Keevismetalli oksüdeerumise vältimiseks tuleb kasutada elektroodide negatiivse polaarsusega ja argooni või heeliumi kaitsegaasi.

Räbustikeevitus (SAW) [5]:

Hea läbitungimise tagamiseks soovitatakse liigese keevitamiseks positiivse polaarsusega elektroodide kasutamist.

Tabel 1.5 Soovitavad keevitusparameetrid SAW keevituse protsessiks [5, 6]

Traadi läbimõõt, mm	Vool, A	Pinge, V
2.0	200-300	30-33
2.4	250-400	30-33
3.2	300-450	30-33

Soovitav räbusti on Sandvik 50SW.

Soovitavad lisamaterjalide standart ja keemiline koostis [5]:

TIG / GTAW või MIG / GMAW keevitamine

EN ISO 18274 S Ni 6625 / AWS A5.14 ERNiCrMo-3 (nt Exaton Sanicro 60)

OUTOKUMPU OY [3]

254 SMO omab head keevitatavust. Stabiilse austeniitstruktuuri tõttu on see mõnevõrra tundlikum keevitamisel tekkiva kuuma pragunemise suhtes ja üldiselt tuleks keevitamiseks kasutada vähest soojusenergiat. Tarnimisel on leht, plaat ja muud töödeldud tooted homogeenset austeniitstruktuuri legerivate elementide ühtlase jaotusega materjalis. Tahkumine pärast osalist ümbersulatamist, nt keevitusega põhjustab elementide, näiteks molübdeeni, kroomi ja nikli ümberjaotumist. Need erinevused, segregatsioon, jäävad keevisõmbeluse valatud struktuuri ja võivad teatud keskkondades kahjustada materjali korrosioonikindlust.

Keevituse lisamaterjalide soovitused [3]:

Tavaliselt kasutatakse standardsete austeniitse täitemetallide omadusi kättesaadavus, suurepärase sitkus ja hea korrosioonikindlus.

Ferriitse struktuuriga täistraatide eelistatakse termiliste pingete korral, happelises keskkonnas või olukorras, kus võib esineda pingekorrosiooni lõhenemist.

Ferriitsisaldavate täistraatide kasutamisel on vastupidavus piiratud, ehkki kõrge töötemperatuurid taluvad seda probleemi. Ferriit täistraadid võib kasutada ainult ühepoolse keevisõmbeluse jaoks, kuna on suurenenud oht tera kasv keevismetallis.

Outokumpu soovitab kasutada 254 SMO keevitamiseks järgmist keemilist koostist EN ISO 18274 S Ni 6625 / AWS A5.14 ERNiCrMo-3.

DRATEC DRAHTTECHNIK GMBH [21]:

Soovitab EN ISO 18274 S Ni 6625 / AWS A5.14 ERNiCrMo-3.

ESAB AB [6]:

Pakub kasutada EN ISO 18274 S Ni 6625 / AWS A5.14 ERNiCrMo-3.

LINCOLN ELECTRIC [22]:

Soovitab EN ISO 18274 S Ni 6625 / AWS A5.14 ERNiCrMo-3.

ELGA [23]:

Soovitab EN ISO 18274 S Ni 6625 / AWS A5.14 ERNiCrMo-3.

Tabel 1.6 Soovitatavad keevitusparameetrid MIG/MAG keevituse protsessiks [23].

Traadi läbimõõt, mm	Traadi etteande kiirus, m/min	Vool, A	Pinge, V	Keevituse kaitsegaasi kulu, l/min.
Pihustuskaar (ingl k Spray-arc welding)				
1.0	-	170-200	26-28	20-25
1.2	-	175-250	26-28	20-25
Impulsskaar (ingl k Pulsed-arc welding ¹⁾)				
1.2	-	130-160	18-21	20-25

Seoses sellega, et paljud keevituse lisaainete tootjad varjuvad keevitusparameetrid, välja arvatud nende individuaalsed visiivid koos konsultatsiooniga ettevõttele, seepärast etaloniks tavaliselt valitakse 2 brändit SANDVIK ja ELGA ning valitakse keskmised soovitatud keevituse parameetrid.

1.2.2 Kõrgleegeritud austeniit-ferriit roostevaba teras Super Duplex

Duplex-roostevabad terased on leiutatud ja neid on Euroopa ettevõtted aktiivselt arendanud alates 1935. aastast. Pidades silmas nende omaduste pidevat parendamist ja kasvavat kättesaadavust, jäävad Duplexi roostevabad terased atraktiivseks lahenduseks masinaehituse disainerite ja kasutajate tulevastele vajadustele.

Need esindavad suurepäraseid kulude ja omaduste suhteid, eriti kriitilistes rakendustes, sealhulgas nafta- ja gaasitööstuses, tselluloosi- ja paberitööstuses, veesüsteemides, magestamistehastes, saastetõrjeseadmetes ja kemikaalitankerites.

Jätkusuutlikkuse arvestamine ja olulistsükli kulud viivad muud rakendused duplekskasutusse (arhitektuur ja ehitus, mahutid), tagades kahtlemata kogu dupleksperekonna edasiarendamise [5].

Nende omadused tegid nad võrdväärsete austeniit klassidega võrreldes väga atraktiivseks [5]:

- Suurepärase vastupidavus stresskorrosiooni mõranemisele kloriidi kandvas keskkonnas Suurepärase vastupidavus punnkorkide ja pragude korrosioonile;
- Suur vastupidavus üldisele korrosioonile;
- Väga kõrge mehaaniline tugevus;
- Füüsikalised omadused, mis pakuvad konstruktsiooni eeliseid;
- Suur vastupidavus erosioonkorrosioonile ja korrosiooniväsimus hea keevitatavus;
- Madalam sulami maksumus;

Standardid [5]:

- UNS S32750;
- EN Number 1.4410;
- EN Name X 2 CrNiMoN 25-7-4;

Tootestandardid [5]:

- EN 10088-3, EN 10088-3 (dimensions up to 160 mm);
- EN 10272, EN 10222-5;
- ASTM A479, ASTM A276;
- Statoil MDS D35 Rev F;
- NORSOK MDS D57 Rev 3, Rev 4;
- Chemical composition and mech. properties acc. ASTM A182;

Heakskiidud [5]:

- Surveseadmete direktiiv 2014/68/EL (vana direktiiv 97/23/EL),
- NORSOK M650 Rev 4, M630 Rev 5, mõõtmed kuni 250 mm,

- PMA eelkinnitus.

Tunnistus [5]:

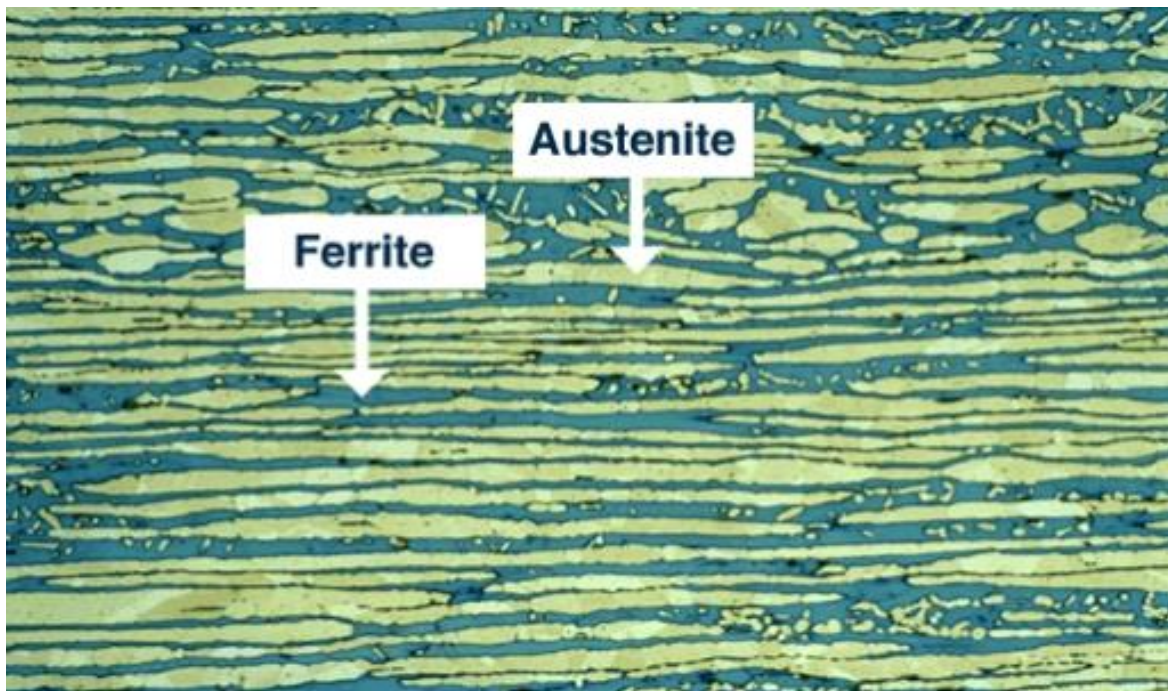
- Staatus vastavalt standardile EN 10 204 / 3.1.

Tabel 1.7 Keemiline koostis (nominaalne) [5].

Keemiline koostis (nominaalne), %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu
≤0.030	≤0.80	≤1.2	≤0.035	≤0.015	25	7	4	0.3	≤0.5

Struktuur (vt joonis 1.11) [5]:

Kahepoolseid roostevabast terasest terasid nimetatakse dupleksteks, kuna neil on kahefaasiline mikrostruktuur, mis koosneb ferriit ja austeniit roostevaba terasest. Pilt näitab kollast austeniit faasi kui saart, mida ümbritseb sinine ferriitfaas. Roostevaba dupleksterase sulatamisel tahkub vedelast faasist täielikult ferriitiliseks struktuuriks. Kui materjal jahtub toatemperatuurini, muutuvad umbes pooled ferriitteradest austeniitseteks teradeks ("saared"). Tulemuseks on umbes 50% austeniidi ja 50% ferriidi mikrostruktuur.



Joonis 1.11 Duplex roostevaba terasel on austeniidi ja ferriidi terade kahefaasiline mikrostruktuur [24].

Rakendusala [5]:

Sandvik SAF 2507 ehk Super Duplex on dupleks roostevaba teras, mis on spetsiaalselt ette nähtud kasutamiseks agressiivsetes kloriide sisaldavas keskkonnas. Tüüpilised rakendused on: [5]

- nafta- ja gaasitööstus;
- merevee jahutamine;
- soola aurustustööstus;
- magestamistehased;
- geotermilised kaevud;
- rafineerimistehased ja naftakeemiaettevõtted;
- suurt tugevust nõudvad mehaanilised komponendid;
- tselluloosi- ja paberitööstus;

Tarnimise vormid [5]:

Super Duplex (EN nr 1.4410) ehk Sandvik SAF 2507 ribateras on varutud paljudes suurustes. Varude standardne suurusjärg hõlmab 20–250 mm, vaata taskukaarti S-02909. Ümarvarras tarnitakse lahusega lõõmutatud ja veega kustutatud olekus. Pind kooritakse keeratud ja poleeritud.

Pikkused [5]:

Vardad tarnitakse juhusliku pikkusega 3–7 m, sõltuvalt läbimõõdust.

Mehaanilised omadused [5]:

Ribateras on testitud tarnetingimusel.

Järgmised joonised kehtivad lahuse lõõmutatud ja kustutatud olekus oleva materjali kohta.

Väikeste lõikude puhul on tõendusjõu väärtused 20°C korral kõrgemad kui allpool loetletud.

Tabel 1.12 Mehaanilised omadused [5].

Tinglik voolavuspiir, MPa	Tõmbetugevus, MPa	Suhteline pikenemine, %	Kõvadus, HB
R _{p0,2a)}	R _m	Ab)	ca
≥ 550	760-930c)	≥ 25	260

1 MPa = 1 N/mm²

a) R_{p0,2} ja R_{p1,0} vastavad vastavalt 0,2% nihetele ja 1,0% nihete tugevusastmele.

b) Põhineb:

$$L_0 = 5,65\sqrt{S_0} \quad (1.2),$$

kus

L₀ - algne gabariidipikkus, mm;

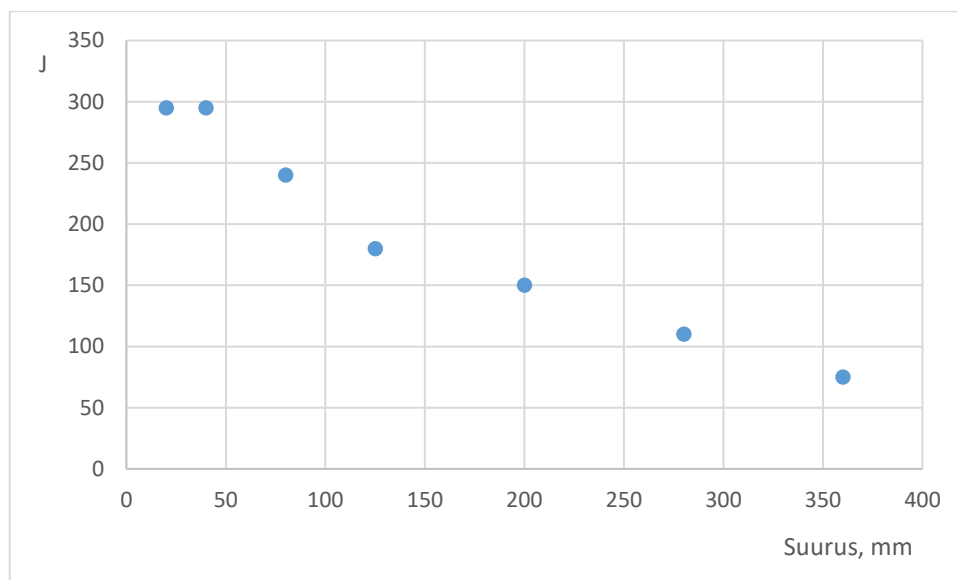
S₀ - algne ristlõikepindala, mm²;

Kõrgematel temperatuuridel [5]:

Kui 2507 ehk Super Duplex puutub pikaajaliselt kokku temperatuuridega üle 250°C, siis mikrostruktuuri muutused, mille tulemuseks on löögivõime vähenemine. See mõju ei mõjuta tingimata materjali käitumine töötemperatuuril.

Löögitugevus [5]:

Sandvik SAF 2507 ehk Super Duplex omab head löögitugevust. Joonisel 1.12 on näidatud Sandviku tüüpilised löögienergia väärtused. Erinevates suurustes SAF 2507 temperatuuril -20°C , kasutades standardset Charpy V proovi. Proovid on võetud pikisuunas suund.



Joonis 1.12 Löögienergia (Charpy V) temperatuuril -20°C on min 100 J [5].

Keevitamine ja roostevaba terase maailma tootjalt soovitus

SANDVIK AB [5]:

2507 ehk Super Duplex-i keevitatavus on hea. Sobivateks keevitusmeetoditeks on metallkaare käsitsi keevitamine kaetud elektroodid või gaasiga varjestatud kaarkeevitus. Keevitamine peaks toimuma soojusvõimsuse vahemikus $0,2-1,5 \text{ kJ/mm}$ ja ristmike temperatuur on maksimaalselt 150°C . Kuumuse eelsoojendus või järelkeevitus ravi ei ole vajalik. Optimaalse korrosioonikindlusega keevismetalli saamiseks on soovitatav kasutada vastavaid täitemetalle mehaanilised omadused. Kaarkeevitusel kaitsegaasiga Sandvik soovib kasutada lisaainematerjali Sandvik 25.10.4.L või käsikaar kaarkeevitusel kaetud elektrood Sandvik 25.10.4.LR.

MIG / MAG keevitamine (vt tabel 1.13) [5]:

Positiivse elektroodi abil saavutatakse hea läbitungimine igat tüüpi keevitatud vuukides. Järgmises tabelis on toodud MIG-keevituse üldised tingimused.

Tabel 1.13 Soovitatavad keevitusparameetrid MIG/MAG keevituse protsessiks [5].

Traadi läbimõõt, mm	Traadi etteande kiirus, m/min	Vool, A	Pinge, V	Keevituse kaitsegaasi kulu, l/min.
Lühike kaar (ingl k Short-arc welding)				
1.0	4-8	60-140	15-21	12
Pihustuskaar (ingl k Spray-arc welding)				
1.0	6-12	140-220	23-28	18
1.2	5-9	180-260	24-29	18

Impulsskaar (ingl k Pulsed-arc welding ¹⁾)				
1.2	3-10	150-250	23-31	18

¹⁾Impulsi parameetrid: tippvool 300–400A, taustvool 50–150A, sagedus 80–120Hz (ingl k Pulse parameters: Peak current 300-400A, Background current 50-150A, Frequency 80-120Hz)

Lühikaarega keevitamist kasutatakse õhukese läbimõõduga materjaliga, mille paksus on alla 3 mm, juurekaevude sadestamiseks ja tasapinnast väljapoole jäävate kohtade keevitamiseks.

Mida suurem on lühikese kaare keevitamise induktiivsus, seda suurem on sula sujuvus. Pihustuskaarkeevitust kasutatakse tavaliselt suurema paksusega materjali puhul.

TIG / GTAW keevitamine [5]:

TIG-keevitamise parameetrid sõltuvad suuresti põhimaterjali paksusest ja keevitusviisist. Tuleb kasutada negatiivse polaarsusega elektroode ja argooni segu 2-3% N₂-ga kaitsegaasis.

Räbustikeevitus (SAW) [5]:

Hea läbitungimise tagamiseks soovitatakse liigese keevitamiseks positiivse polaarsusega elektroodide kasutamist, vt tabel 1.14.

Tabel 1.14 Soovitatavad keevitusparameetrid SAW keevituse protsessiks [5].

Traadi läbimõõt, mm	Vool, A	Pinge, V
2.0	200-300	28-32
2.4	250-450	28-32
3.2	300-500	29-34

Soovitatav räbusti on Sandvik 15W.

Soovitatavad lisamaterjalide standart ja keemiline koostis [5]:

Soovitatakse kasutada EN ISO 25 9 4 NL.

OUTOKUMPU OY [3]:

Super duplex terasel on hea keevitatavus ja saab keevitada, kasutades enamikku austeniit roostevabast terasest kasutatavatest keevitusmeetoditest teras [3]:

- Käsikaarkeevitus MMA (SMAW);
- TIG-keevitus täislisamaterjaliga (GTAW);
- MIG-keevitus täistraadiga (GMAW);
- MAG-keevitus täidistraadiga (FCAW);
- Plasmakaarkeevitus (PAW);
- Räbustikaarkeevitus täistraadiga (SAW);
- Laserkeevitus;
- Takistuskeevitus;
- Kõrgsageduskeevitus;

Tasakaalustatud koostise tõttu saab kuumusega mõjutatud tsoon piisavalt head austeniit sisaldust, et seda säilitada vastupidavus lokaliseeritud korrosioonile. Üksikute dupleksteraste keevitusomadused on pisut erinevad [3].

Kvaliteedi tagamiseks Outokumpu soovib järgida järgmisi juhiseid [3]:

- materjal tuleb keevitada ilma eelsoojendusega;
- materjalil tuleb lasta läbimite vahel jahtuda, eelistatavalt temperatuurini alla 150° C;
- keevismetalli heade omaduste saamiseks keevitatud olekus tuleb kasutada täitematerjali;
- ferriidi ja austeniidi vahel heas tasakaalus tuleks soovitatud kaareenergiat hoida teatud piirides keevitada;
- soojussisestust tuleks kohandada vastavalt terase kvaliteedile ja reguleerida vastavalt materjali paksusele keevitatud;
- keevitusjärgne lõõmutamine pärast täiteainega keevitamist pole vajalik;
- GTAW ja PAW meetodite kasutamisel optimaalse torude vastupidavuse tagamiseks tuleb varjestamis- / puhastusgaasis lisada lämmastikku soovitatav;

Outokumpu 2507 ehk Super Duplex (EN nr 1.4410) on rohkem kaldu keevismetalli metallidevahelise sadestumise suhtes. Sel põhjusel peaks soojusvõimsus olema allpool 1–1,5 KJ/mm ja läbimitevaheline temperatuur ei tohiks ületada + 100°C. Super Duplexil on rohkem kalduvus teradevahelisele keevismetallis. Kui keevitus teostatakse ühepoolset, aga juureõmbluse külg hakkab sattuma agresiivset keskkonda, siis oluliselt juureõmbluse paksemaks teha ja tagapoolt madalama soojussisestusega. Need tegevused vähendavad ehk minimiseerivad kahjulikku sigma faasi juurel. 121 (SAW) keevitusprotsessi kasutamisel täistraadi läbimõõtu ei peaks ületama üle 2.4 mm selleks, et vähendada tagapoolt madalamat soojussisestust [3].

Outokumpu 2507 soovib keevitamiseks täiteaine keemilise koostis EN ISO 25 9 4 NL [3].

DRATEC DRAHTTECHNIK GMBH [21]:

Soovib EN ISO 25 9 4 NL.

ESAB AB [6]:

Pakub kasutada EN ISO 25 9 4 NL.

LINCOLN ELECTRIC [22]:

Soovib keevitada EN ISO 25 9 4 NL.

ELGA [23]:

Soovib keevitada EN ISO 25 9 4 NL, soovitatud parameetrid vaata tabelis 1.15.

Tabel 1.15 Soovitatavad keevitusparameetrid MIG/MAG keevituse protsessiks [23].

Traadi läbimõõt, mm	Traadi etteande kiirus, m/min	Vool, A	Pinge, V	Keevituse kaitsegaasi kulu, l/min.
Pihustuskaar (ingl k Spray-arc welding)				
1.0	-	170-200	26-28	16-21

1.2	-	175-250	26-28	16-21
Impulsskaar (ingl k Pulsed-arc welding ¹⁾)				
1.2	-	130-160	18-21	16-21

Seoses sellega, et paljud keevituse lisaainete tootjad varjuvad keevitusparameetrid, välja arvatud nende individuaalsed visiidid koos konsultatsiooniga ettevõttele, seepärast etaloniks tavaliselt valitakse 2 brändit SANDVIK ja ELGA ning valitakse keskmised soovitatud keevituse parameetrid.

Kasutatud keevituslisaainete loeteluga ja nende keemiste koostiste analüüsiga võib tutvuda allpool tabelis 1.16-1.19.

Tabel 1.16 Kasutatud keevituslisaaainete ja nende keemiste koostiste analüüs 254 SMO (EN nr 1.4547)-st katsekehade keevitamisel[5, 23].

Filler material chemical composition, Element by weight (%)													
Set no	Weld process	Filler material	Ni	C	Cr	Mn	Fe	Mo	Nb	Si	P	S	Shielding gas and group
pWPS257_A,B,C	131 MIG	I	64	0,02	22	< 0,1	< 1	9	3,5	0,1	0,002	< 0.01	Ar99.9%, I1
pWPS257_A,B,C	121 SAW	I	64	0,02	22	< 0,1	< 1	9	3,5	0,1	0,002	< 0.01	see flux
pWPS257_A,B,C	121 flux	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pWPS257_D,E,F	131 MIG	II	63,9	0,013	22	0,039	0,234	9,16	3,66	0,059	0,003	0,0005	Ar99.9%, I1
pWPS257_D,E,F	121 SAW	II	63,9	0,013	22	0,039	0,234	9,16	3,66	0,059	0,003	0,0005	see flux
pWPS257_D,E,F	121 flux	II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pWPS257_G,H,I	131 MIG	III	64,6	0,008	22,26	0,02	0,27	8,68	3,64	0,07	0,003	0,001	Ar99.9%, I1
pWPS257_G,H,I	121 SAW	III	65	0,03	22	0,2	< 0,5	8,6	3,6	0,25	0,003	0,001	see flux
pWPS257_G,H,I	121 flux	III	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Keskmine väärtus:			64,233	0,0173	22,043	0,0745	0,246	8,9333	3,593	0,1063	0,002667	0,00075	-

Tabel 1.17 Kasutatud katsekehade ja nende keemiste koostiste analüüs 254 SMO (EN nr 1.4547)-st katsekehade keevitamisel [3].

Base material chemical composition, Element by weight (%)												
Set no	Materjali paksus	Ni	C	Cr	Mn	Fe	Mo	Nb	Si	P	S	
min. lubatud	t=8	17,5	-	19,5	-	-	6	-	-	-	-	
max. lubatud	t=8	18,5	0,02	20,5	1	-	6,5	-	0,7	0,03	0,01	
pWPS257_A,_D,_G	t=5	17,79	0,018	19,88	0,44	N/A	6,04	0,004	0,4	0,022	0,001	
pWPS257_B,_E,_H	t=8	18,4	0,015	20,2	0,53	-	6,4	-	0,29	0,021	0,001	
pWPS257_C,_F,_I	t=10	18,06	0,012	19,74	0,57	-	6,24	-	0,14	0,018	< 0,0003	
pWPS257_C,_F,_I	t=10	17,9	0,011	20,2	0,3	-	6,1	-	0,43	0,02	0,001	
Keskmine väärtus:				18,025	0,0152	20,003	0,568	#DIV/0!	6,2133	0,004	0,392	

Tabel 1.18 Kasutatud keevituslisainete loetelu ja keemised koostised Super Duplexi (EN nr 1.4410)-st katsekehade keevitamisel [5, 23].

Filler material chemical composition, Element by weight (%)											
Set no	Weld process	Filler material	Ni	C	Cr	Mn	Mo	Nb	Si	P	S
pWPS258_J	135 MAG	IV	9,39	0,011	25,03	0,41	3,85	0,01	0,38	0.018	5E-04
pWPS258_J	121 SAW	IV	9,39	0,011	25,03	0,41	3,85	0,01	0,38	0.018	5E-04
pWPS258_J	121 flux	IV	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pWPS258_K,L	131 MIG	IV	9,39	0,011	25,03	0,41	3,85	0,01	0,38	0.018	5E-04
pWPS258_K,L	121 SAW	IV	9,39	0,011	25,03	0,41	3,85	0,01	0,38	0.018	5E-04
pWPS258_K,L	121 flux	IV	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pWPS258_M	135 MAG	V	9,5	0,02	25	0,4	4	-	0,3	0,015	0,02
pWPS258_M	121 SAW	V	9	0,02	25	0,8	3,7	-	0,05	-	-
pWPS258_M	121 flux	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pWPS258_N,O	131 MIG	V	9,5	0,02	25	0,4	4	-	0,3	0,015	0,02
pWPS258_N,O	121 SAW	V	9	0,02	25	0,8	3,7	-	0,05	-	-
pWPS258_N,O	121 flux	V	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Keskmine väärtus:			9,306	0,0166	25,112	0,7267	3,88	0,01	0,3578	0,017	0,0089

Tabel 1.19 Kasutatud katsekehade ja nende keemiste koostiste analüüs Super Duplex (EN nr 1.4410)-st katsekehade keevitamisel [3].

Base material chemical composition, Element by weight (%)										
Set no	Materjali paksus	Ni	C	Cr	Mn	Mo	Nb	Si	P	S
min	t=8	6	-	24	-	3	-	-	-	-
max	t=8	8	0,03	26	1,2	4,5	0,1	0,8	0,035	0,015
pWPS258_J,_M	t=5	6,91	0,014	25,07	0,82	3,79	-	0,38	0,029	0,001
pWPS258_K,_N	t=8	6,593	0,021	24,794	0,815	3,717	0,01	0,345	0,0199	3E-04
pWPS258_L,_O	t=10	6,574	0,015	24,632	0,824	3,704	0,01	0,329	0,0234	2E-04
Keskmine väärtus		6,8154	0,02	24,899	0,9148	3,7422	0,04	0,4635	0,0268	0,004

1.2.3 Keevituse kaitsegaasi soovitused

Tabel 1.20 Kaitsegaaside lisamaterjalide tootjate soovitused [5].

Põhimaterjali tüübid						
Kaitsegaasi keemiline koostis	Austeniit roostevaba terased	Dupleks terased	Super Duplex terased	Ferriit roostevaba terased	Kõrglegeeritud roostevaba terased	Nikli sulamid
Ar	X	X	X	X	X	
Ar+Hea	X	X	X	X	X	X ^a
Ar+(2-5)% H ₂ ^{a,b}	X ^b	-	-	-	X ^b	X ^b
Ar + (1-2)% N ₂	-	X	X	-	-	-
Ar + 30% He + (1-2)% N ₂	-	X	X	-	-	-

a) Parandab voolamist puhta Ar-ga;

b) Eelistatavalt automaatseks keevitamiseks, suur keevituskiirus ja mitmekihiliste keevisõmbluste poorsuse oht.

Ülaltoodust tabelist 1.20 on näha, et 254 SMO keevisvanni gaasikaitsmiseks soovitatakse kasutada puhtat argooni (Ar 99,9%) ehk heeliumiga gaasisegu vähemalt 30% sisaldusega sealhulgas õmbelse juure kaitsmise korral [5].

Super Duplex-iks soovitatakse kasutada gaasisegu 2% CO₂-ga ehk puhtat argooni (Ar 99,9%) ehk heeliumiga vähemalt 30% sisaldusega sealhulgas õmbelse juure kaitsmise korral [5].

1.3 Ülevaade kõrglegeeritud roostevaba teraste põhidefektidest ja nende tekkemehhanismid

Antud lõputöö käsitleb ainult kõrglegeeritud roostevaba teraste keevitamisel 2 põhidefekt – poorsus ja tardumise kuumpragumine, mis on kõige levinud 254SMO (EN nr 1.4547) ja Super Duplex (EN nr 1.4410) põhimaterjalis [3].

1.3.1 Pooride ja poorsuse mõiste ja tekkemehhanism

Identifitseerimine [25]:

Poorsus on õmbelse olemasolu keevismetallis, mille põhjustab keevisõmbelsebasseinist eralduva gaasi külmumisel selle külmumisel.

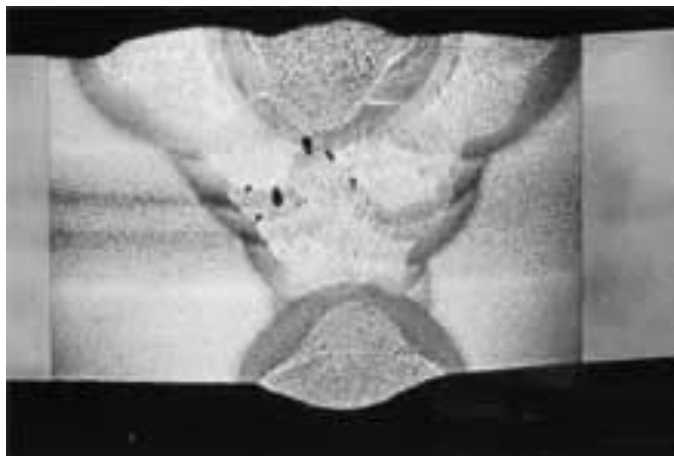
Poorsus võib esineda mitmel kujul:

- ühtlaselt jaotatud poorid (ingl k distributed);
- katte ehk pinna purustavad poorid (ingl k surface breaking pores);
- ussiauk (ingl k wormhole);

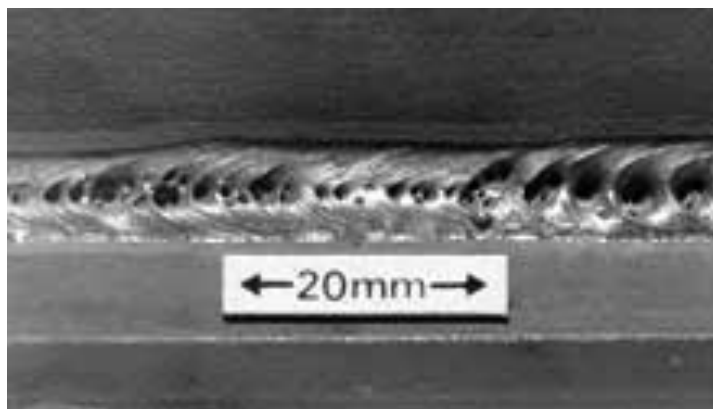
- kraaterpoor / toru kujuline poor (ingl k crater pipes);

Jaotatud poorsus, vt joonis 1.13 on kogu keevisõmbuse korral tavaliselt peene poorina.

Pinna murdvad poorid, vt joonis 1.14 näitavad tavaliselt suurt jaotatud poorsust.



Joonis 1.13 Ühtlaselt jaotatud poorsus.



Joonis 1.14 katte ehk pinna purustavad poorid (T-kujulise nurkliite keevisõmbus krunditud plaadi peal).

Poorsuse põhjustab lämmastiku, hapniku ja vesiniku imendumine sulas keevisõmbuse basseinis, mis seejärel tahkestumisel eraldub, et see jääks keevismetalli lõksu.

Lämmastiku ja hapniku imendumine keevisõmbusbaasis tuleneb tavaliselt halvast gaasikaitsmisest. Nii vähe kui 1% õhu sattumine varjestamisgaasi põhjustab jaotunud poorsuse ja üle 1,5% põhjustab pinna täielikku purustamist. Gaasitorustiku lekked, liiga suur gaasi voolukiirus, tuuletõmbused ja liigne turbulents keevisõmbuse basseinis on poorsuse sagedased põhjused.

Vesinik võib pärineda paljudest allikatest, sealhulgas niiskusest ebapiisavalt kuivatatud elektrodide, vooluhulkade või tooriku pinnalt. Tooriku või täitetraadi pinnal olev rasv ja õli on samuti tavalised vesinikuallikad.

Pinnakatted, nagu kruntvärvid ja pinnatöötused, näiteks tsinkkatted, võivad keevitamise ajal tekitada ohtralt suitsu. Tekkinud gaasi kinnijäämise oht on suurem T-liigestes kui tagumikühendustes, eriti kui filee keevitatakse mõlemalt poolt, vt joonis 1.14. Eraldi tuleks mainida nn keevitatavaid (madala tsingisisaldusega) praimereid.

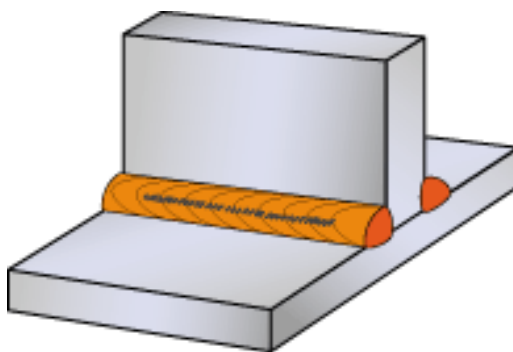
Praimerite eemaldamine ei peaks olema vajalik, kuid kui praimeri paksus ületab tootja soovitusi, on poorsus tõenäoline, eriti kui kasutatakse muid keevitusprotsesse kui MMA. Ärahoidmise reeglid:

Gaasi allikas tuleb tuvastada ja eemaldada järgmiselt:

- Õhu sisenemine:
 - sulgeda õhulekked;
 - vältida keevisõmbluste turbulentsi;
 - kasutada täiteainet koos piisava koguse deoksüdantidega;
 - vähendada liiga suurt gaasi voolu;
 - väldi mustandeid;
- Vesinik:
 - kuivatada elektrood ja vool;
 - puhastada ja rasvatage tooriku pind;

Ussiaugud [25]

Iseloomulikult on ussiaugud piklikud poorid, vt joonis 1.15, mis annavad radiograafil heeringa luu välimuse.



Joonis 1.15 Piklikud poorid või ussiaugud.

Põhjus. Ussiaugud näitavad suure hulga gaasi moodustumist, mis jääb seejärel kinni tahkestudes keevismetallis. Liigne gaas moodustub pinna ulatuslikust saastumisest või väga paksu värvi- või krunkattest. Kinni jäämine on tõenäolisem lõheded, näiteks horisontaal-vertikaalse T-liite vertikaalse detaili all oleva pilu all, mis on mõlemalt poolt keevitatud fileega. T-liidete keevitamisel krunditud plaatide puhul on oluline, et vertikaalse detaili serva kattedekihi paksus ei ületaks tootja poolt soovitatud maksimaalset, tavaliselt 20 µm, ülepihustamise teel.

Ärahoidmise meetodid:

Gaasi ja õõnsuste eemaldamine kõrvaldab ussiaugu tekkimist.

Gaasi generatsioon:

- puhastada tooriku pinnad keevisõmbluse valmistamise kohas ja selle läheduses;
- eemaldada NDT toimingutest tekkinud pinnasaaste, eriti õli, määrded, rooste ja jäägid;
- eemaldada vuugipinnalt kõik pinnakatted, et paljastada ere materjal;

- kontrollida, et krundi paksus oleks alla tootja lubatud piiri;

Liigese geomeetria:

- vältida liigesegeomeetriat, mis loob õõnsuse.

Kraatri torukujuline pragu [25]:

Keevisõmbluse lõpliku tahkumise ajal moodustub kraatritoru, mida sageli seostatakse gaasi poorsusega.

Põhjus. See ebatäiuslikkus tuleneb keevisõmbluse tahkumise kokkutõmbumisest. Järelikult soodustavad vedeliku muutumist tahke ruumala muutumisega tingimused selle moodustumist. Keevituskaare kustutamine põhjustab keevisõmbluse kiire tahkumise. TIG-keevitamisel põhjustavad autogeensed tehnikad või keevisõmblusbasseini siseneva keevitustraadi peatamine enne keevituskaare kustutamist kraatri moodustumist ja võivad soodustada torude ebatäiuslikkust.

Ärahoidmise meetodid:

Kraatritorude ebatäiuslikkust saab vältida, kontrollides keevituskaare kustumise kiirust või keevitaja tehnikat, manipuleerides keevituskaare ja keevitustraadiga

Peatuse eemaldamine:

- kasutada äravoolumärgist, et keeviskaar kustutataks väljaspool keevitatud liigendit;
- enne järgmise elektroodiga jätkamist või sellele järgneva keevisõmbluse panemist lihvide keevisõmbluse stopp-kraater välja;

Keevituse tehnika:

- vähendada järk-järgult keevitusvoolu, et vähendada keevisõmbluse suurust (kasutage kaldega allapoole või kraatriga täidetud funktsioone);
- lisada keevisõmbluse kahanemise kompenseerimiseks täiteainet (TIG);

Materjalide poorsuse tundlikkus, vt tabel 1.21:

Gaasid, mis võivad poorsust põhjustada tavaliselt kasutatavas materjalivalikus, on toodud tabelis.

Tabel 1.21 Peamised poorsuse põhjustavad kaitsegaasid ja soovitatavad puhastuse meetodid.

Põhimaterjal	Kaitsegaas	Puhastamine
Roostevaba teras	Vesinik	Rasvaärastus + metallhari + rasvaärastus
Nikkel ja Ni-sulamid	Vesinik	Rasvaärastus + metallhari + rasvaärastus

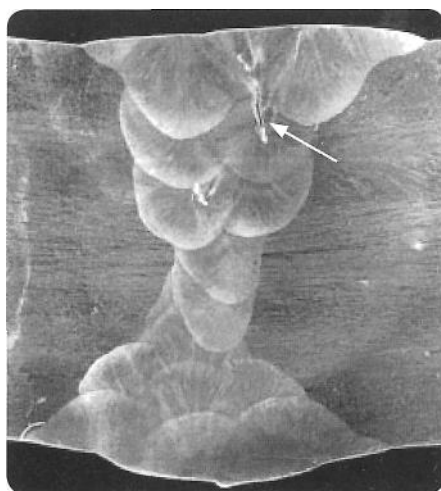
Avastamine ja parandusmeetmed. Kui puudused rikuvad pinna, saab neid tuvastada läbitungiva või magnetiliste osakeste kontrollimise abil. Aluspinna puuduste avastamiseks kasutatakse radiograafiat või ultraheli. Radiograafia on poorsuse puuduste tuvastamiseks ja iseloomustamiseks tavaliselt kõige tõhusam. Eriti väikestes poorides on väikeste pooride tuvastamine keeruline.

Parandusmeetmed vajavad tavaliselt eemaldamist lokaliseerimisega või lihvimisega, kuid kui poorsus on ühtlaselt jaotatud, siis tuleb kogu keevisõmblust käiata. Vuuk tuleks uuesti ette valmistada ja uuesti keevitada vastavalt kokkulepitud keevitusprotseduurile.

1.3.2 Tardumise- või likvatsiooni kuumpragumise mõiste ja tekkemehhanism

Identifitseerimine ja tähtsus [4]:

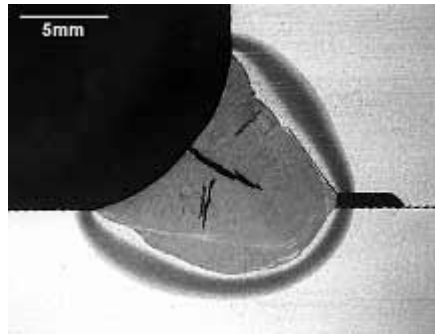
Ingl k solidification and liquation cracking. Nii tahkestamisel kui ka vedeliku kuumpragumisel tekib kahjulik mõju korrosioonikindlusele ja konstruktsiooni peale tervikuna, vt joonis 1.16. Halvimal juhul võib pragunemine põhjustada komponentide tõrke. Teatud koodide all võib olla vastuvõetav väike kogus mikrokihti ($h \times l \text{ Al mm}'$).



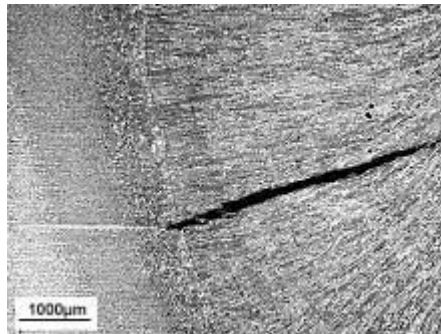
Joonis 1.16 Näide kuumpragumisega räbustikeevituse protsessis 121 (SAW), põhimetalli paksus on $t=20 \text{ mm}$ [4].

Esinemissagedus [4]:

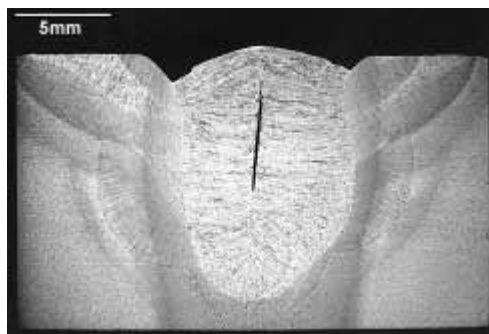
Täielikult austeniitseterased on kuumade mõranemiste suhtes üldiselt tundlikumad kui mingit ferriiti sisaldavad austeniitseterased. Samuti on tundlikumad erinevused näiteks roostevaba ja maheda teraste vahel. Tahkumispraod võivad ilmnedas mitmes kohas ja orientatsioonis, kuid kõige sagedamini on need pikisuunalised keskjoone praod (mis langevad kokku keevisõmbluse vastaskülgedest kasvavate terade ristumiskohaga) või "põletatud" praod, jällegi pikisuunalised, kuid läbiva nurga all - paksuse suund (vt joonis 1.17). Kui plaadil on keskne eraldatud riba, võib pragunemine sellest positsioonist sulamispiiril ulatuda (vt joonis 1.18). Kõigi kohtade pragusid võib matta (vt joonis 1.19) või pinda murda [26].



Joonis 1.17 Keskjoone ja kiudude tahkestamise pragude tüüpiline asukoht [26].



Joonis 1.18 Pragunemine, mis algab plaadi segregatsiooni ribast [26].



Joonis 1.19. Maetud keskjoone lõhenemine (ingl k Buried cracks) [26].

Avastamine [26]:

Tahkestamise lõhenemine ja võib-olla ka vedeliku pragunemine võib keevisõmbluse pinna purustada ja seda saab seega tuvastada visuaalse kontrolli või PT abil. Maetud pragusid (ingl k Buried cracks) saab tuvastada UT või mõnedel juhtudel ka RT abil. Keevisõmbluste ristlõigete uurimine, nt. keevitusprotseduuride kvalifitseerimise ajal osutab tahkumise ja vedeliku pragumise valmisolekule.

Tekkemehhanism ja kõige levinumad põhjused [26]:

- Tahkestamise pragunemine on põhjustatud keevisõmbluse tahkestamisel suure pinge, ebasoodsate tahkestumissuundade ja saasteainete segregatsiooni kombinatsioonist. Pragunemine on üldiselt teradevaheline;
- Keevise või HAZ-i vedeliku lõhenemist seostatakse mitmeläbimite keevitamisega (peamiselt seadusega, ingl k LAW). Korduvad keevituslähimid võivad põhjustada

sekundaarsete faaside ümbersulatamise. Koos kõrge vaashoitusega võib see põhjustada lõhenemist. Prao morfoloogia on üldiselt graanulitevaheline;

- Pragunemine toimub siis, kui vedela keevismetalli olemasolev varustus on ebapiisav, et täita keevismetalli tahkestamise vahelised ruumid. Seega on lõhenemise peamised põhjused:
 - ✓ Keevisõmbusbasseini koormus on liiga kõrge;
 - ✓ Ebapiisava varustuse või ummistuste / kitsaste kanalite tõttu tahkete terade vahel ei pääse vedelik piirkondadesse, kus seda vajatakse;

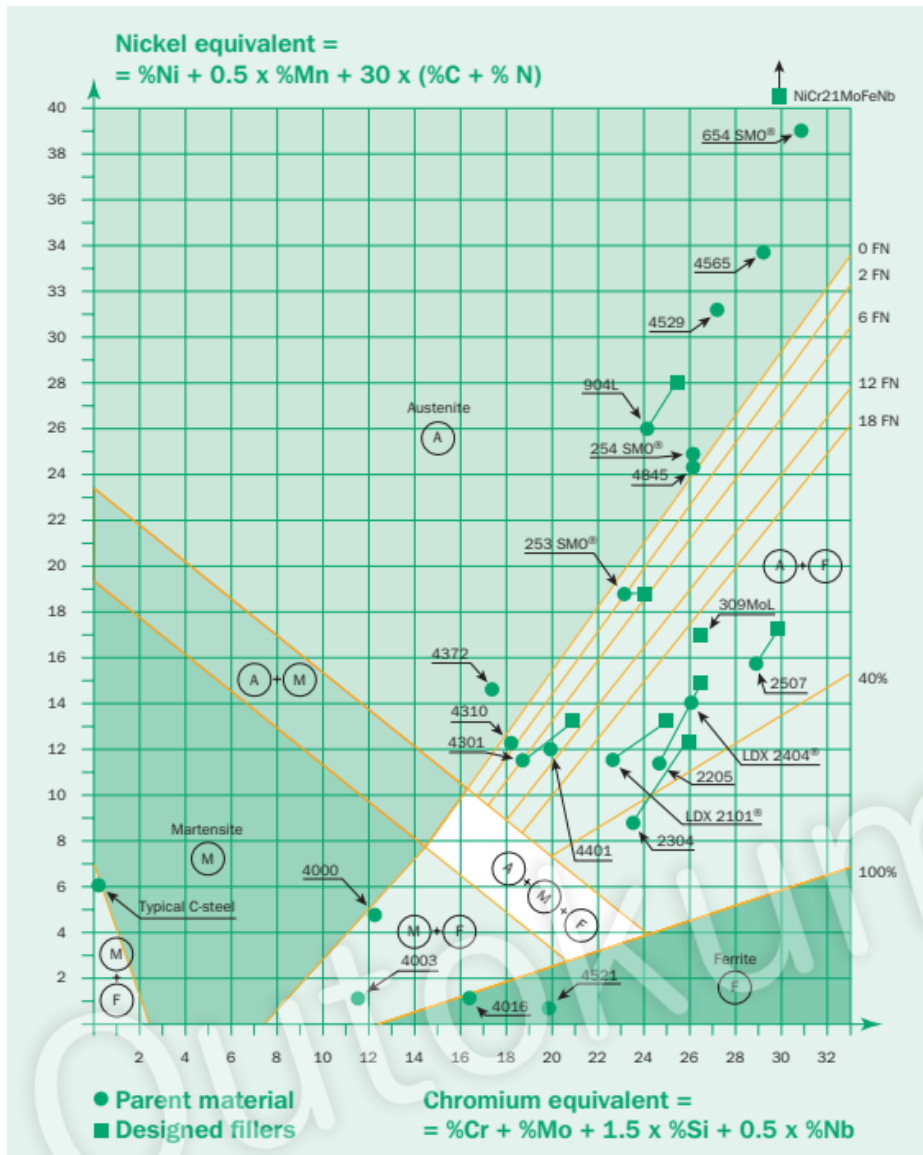
Tüüpilised lahendused [26]:

- Vältida või vähendada vaashoitust (ingl k Restraint);
- Minimiseerida jääkpinged tasakaalustatud ja kahepoolse keevitusmeetodi abil. Vältida liigset soojusenergiat (maksimaalselt 1,5 kJ/mm täielikult austeniitsete teraste puhul). Veenduda, et keevisõmbuluse tsoon on puhas;
- Kasutada põhivoolu või katteid - need annavad vähem lisandeid;
- Kasutada keevitusmeetodeid ilma räbu lisandeta (nt TIG ja MAG) - need annavad puhtamad keevisõmbused, milles on vähem lisandeid;
- Keevitada lisaaaine materjaliga, mille ferriidisisaldus on 3–10 FN;
- Kontrollida keevisõmbuluse kuju, et saada laiuse ja sügavuse suhe 1,5 kuni 2,0;
- Minimiseerida kergete ja vähese legeerteraste lahjendused erinevates keevisliidestest;
- Valida madala lisandiga terase klass [26];
- Mikrostruktuuri mõju ehk Schaeffleri DeLongi diagram (Legeerivate elementide mõju roostevaba terase mikrostruktuurile on kokku võetud empiirilises Schaeffler DeLongi diagrammis (vt joonis 1.20 ja 1.21). Diagramm põhineb asjaolul, et legeerivad elemendid saab jagada ferriidi-stabilisaatoriteks ja austeniidi-stabilisaatoriteks. See tähendab, et nad eelistavad ferriidi või austeniidi moodustumist mikrostruktuuris. Kui austeniidi stabilisaatorite võime soodustada austeniidi moodustumist on seotud nikli omaga ja ferriidi stabilisaatorid on sarnased kroomi suhtes. on võimalik arvutada terases legeerivate elementide kogu ferriiti ja austeniiti stabiliseeriv toime. See annab Schaeffleri DeLongi diagrammis niinimetatud kroomi ja nikli ekvivalendid[3]:
 - Ni-ekvivalent = $\%Ni + 0,5 * \%Mn + 30 * (C\% + N\%)$ (1.3);
 - Cr-ekvivalent = $\%Cr + \%Mo + 1,5 * \%Si + 0,5 * \%Nb$ (1.4);

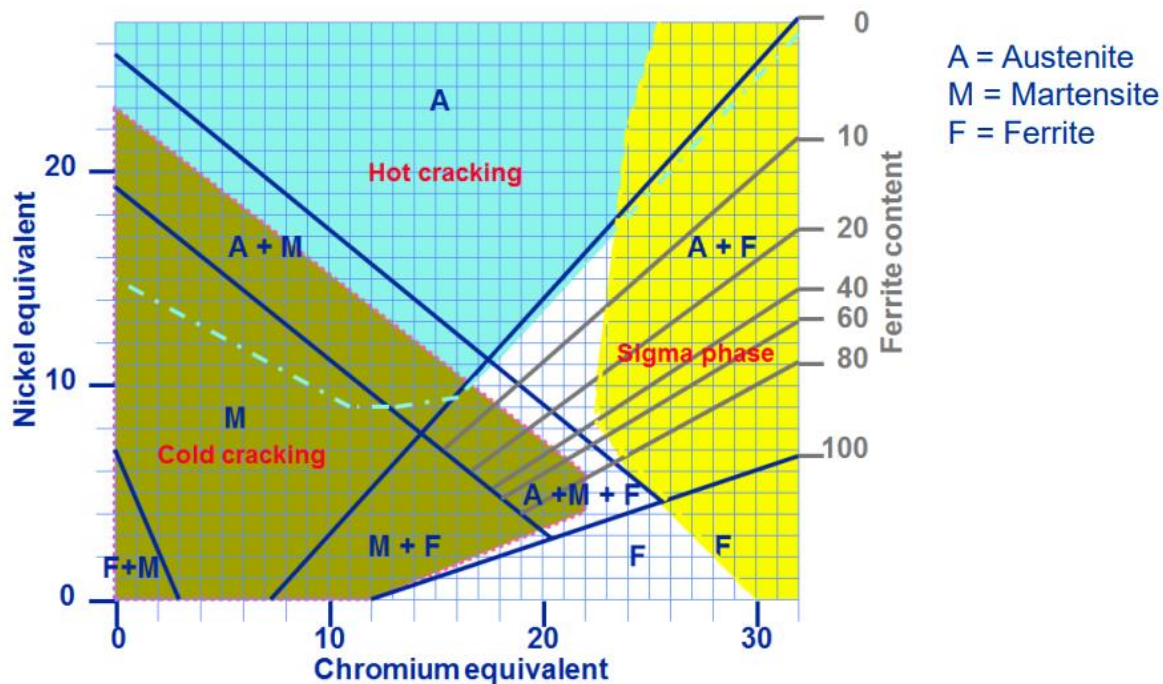
Sel viisil on võimalik arvestada legeerivate elementide koosmõjuga. Schaeffleri DeLongi diagramm töötati algselt välja keevismetalli jaoks, s.o. see kirjeldab struktuuri pärast sulamist ja kiiret jahutamist, kuid on leitud, et see annab ka kasuliku ülevaate sulatatud elementide mõjust sepistatud ja lõõmutatud

materjalidele. Lõplikult lõõmutatud teras, mille eeldatav ferriidi sisaldus vastavalt skeemile on vahemikus 0–5%, sisaldab praktikas väiksemas koguses ferriiti.

Samuti tuleb mainida, et Schaeffler DeLongi diagramm pole ainus ferriidi sisalduse ja roostevabast terasest struktuuri hindamise diagramm. Avaldatud on mitu erinevat diagrammi, kõigil veidi erinevad ekvivalentid, faasipiirid või üldine paigutus. Rahvusvahelise keevitusühinguga koostöös välja töötatud WRC-92 diagrammi, mis on laiali kasutatav.



Joonis 1.20 Muudetud (Outokumpu poolt) Schaeffler DeLongi diagramm, mis näitab keevisõmbliste erinevad mikrostruktuurid. WRC-92 skeemil on keevismetallide kõige moodsam põhiseaduslik skeem, kuid see diagramm on piiratud standardsete roostevabast terasest kompositsioonidega [3].



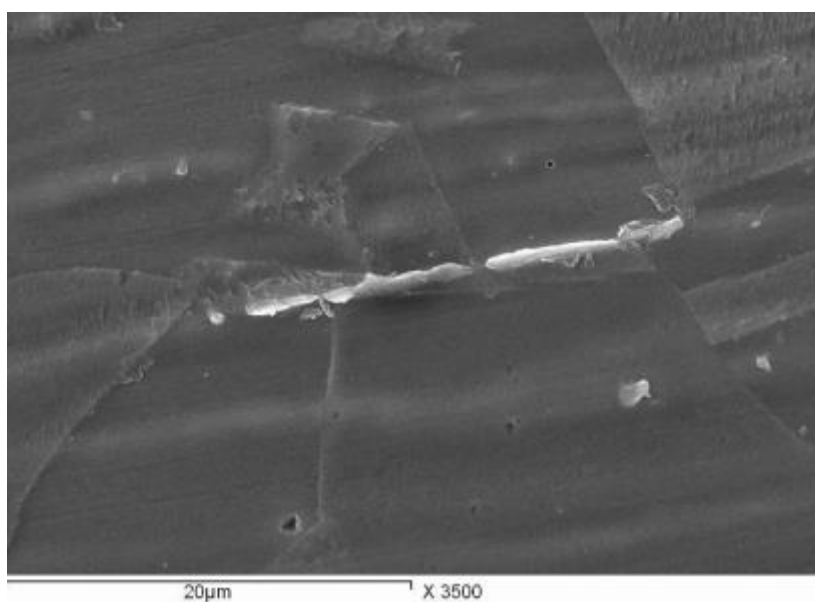
Joonis 1.21 Schaeffler diagrammi tsoonid, mis näitavad võimalikud defektid sõltudes põhimaterjali struktuurist vastavalt Ni- ja Cr-ekvivalendile, 3 põhitsooni – külm- ja kuumpragumine ja sigma faas [27].

1.3.3 Sigma faasi mõiste ja tekkemehhanism

Sigma faas on metallidevaheline faas ja see moodustub temperatuuril 500 kuni 900°C ferriitses roostevabast terases, mis sisaldab rohkem kui 14%Cr [27].

Sigmafaasi moodustumine põhjustab, vt joonis 1.22 [27]:

- suurenenud kõvadus (mõnikord kasulik)
- vähenenud elastsus
- vähenenud korrosioonikindlus.



Joonis 1.22, Sigma faasi kuju, suurendus x3500 [27].

Sigma faasi vesinikhaprumine on probleem kus pikk seisutus seotud kõrgendatud temperatuuriga (paksuseinalised keevitusliited, termotöödeldud temperatuuril vahemikus 500 ° C ja 900 ° C) [27].

2. PRAKTIINE OSA

2.1 2 toodangu, mis on kõrgleegeritud roostevaba terasest keevitustehnoloogia väljatöötamisega seotud

Näide 1

Allpool on toodud toodangu näide, mis on valmitatud põhimaterjali 1.4410 (Super duplex)-st, vt joonis 2.1 ja 2.2 ning tabel 2.1 [1].



Joonis 2.1 ja 2.2 JÄTEVEESISÄILIÖ SY9110. Outer shell diameter: 3,9 m Height: 8,0 m Weight: 11 t Number of details: ca 1000. Main shell materials: EN no 1.4404 ja 1.4410 (Super duplex) [1].

Tabel 2.1 ESTANC ASi tüüpilised kliendi poolt andmed ja nõuded surveseadme valmistamiseks[1]:

Design code	EN ISO 13445; PED 2014/68/EU		In heating coil
Volume	L	67000	50
Allowable pressure P _s max/min	bar (g)	6/-1	6/0
Operating pressure P _o max/min	bar (g)	6/-1	6/0
Allowable temperature T _s max/min	°C	120/-40	100 / 0
Operating temperature T _o max/min	°C	120/-40	100 / 0
Corrosion allowance c	mm	2	2
Minimum weld joint efficiency	-	0,85	0,85
Testing group	-	3a	3b
Test pressure Pt	bar (g)	10	10
Contents	-	Vaarallinen neste	50% Glycol water
Contents Group	-	Gr.1	1
Materials	Dished End	1.4410 EN10028-7	-
	Shell	1.4410 EN10028-7	-
	Piping	-	1.4404
Insulation thickness		100mm Mineral wool + Pural cover sheet	
Surface treatment	Inside	Acid pickling	-
	Outside	Acid pickling	Acid pickling

Näide 2

Allpool on toodud toodangu näidet, mis on valmistatud 4 põhimaterjalist: 1.4529 (alloy 926), EN no 1.4529 (alloy 926); 1.4547 (254SMO), 2.4605 (alloy 59) ja 1.4410 (Super Duplex), vt joonis 2.3.



Joonis 2.3 Marine Scrubber. Outer shell diameter: 5,6 m Height: 20 m Dry weight: 38,5 t Number of details: ca 5000. Main shell materials: EN no 1.4529 (alloy 926); 1.4547 (254SMO), 2.4605 (alloy 59) ja 1.4410 (Super Duplex) [1]

2.2 Keevisliidete valik uuringuks

Keevisliidete uuringuks on valitud lähtudes avastatud praagist toodangu pealt, kus oli leitud sisemised defektid - poorid ja praod mittepurustava kontrolli abil. Katsekehade materjalide ja keevituse parameetrite valimisel aluseks olid võetud samad materjalid, koostatud uued WPS-id lähtudes maailma kirjanduse soovitustest sealhulgas teadusartiklid ning sama keevitusprotsesside kombinatsioonid – põhikesta pikki- ja ringõmblused.

Materjalideks on valitud 2 kõrglegeeritud roostevaba terast - 254SMO ja Super Duplex. Antud põhimaterjalidest ettevõtte valmistab erinevad seadmed ja selliste materjalide juhul on avastatud samad sisemised defektid.

Kasutavad keevituse protsessid sõltudes materjali paksusest selles uuringus on järgmised:

254SMO (EN nr 1.4547), vt tabel 2.2:

- 131 – kaarkeevitus täistraadiga inertgaasis (MIG) [11];
- 121 – räbustikaarkeevitus täistraadiga (SAW) [11];

Super Duplex (EN nr 1.4410), vt tabel 2.3:

- 135 – kaarkeevitus täistraadiga aktiivgaasis (MAG) [11];
- 131 – kaarkeevitus täistraadiga inertgaasis (MIG) [11];
- 121 – räubustikaarkeevitus täistraadiga (SAW) [11];

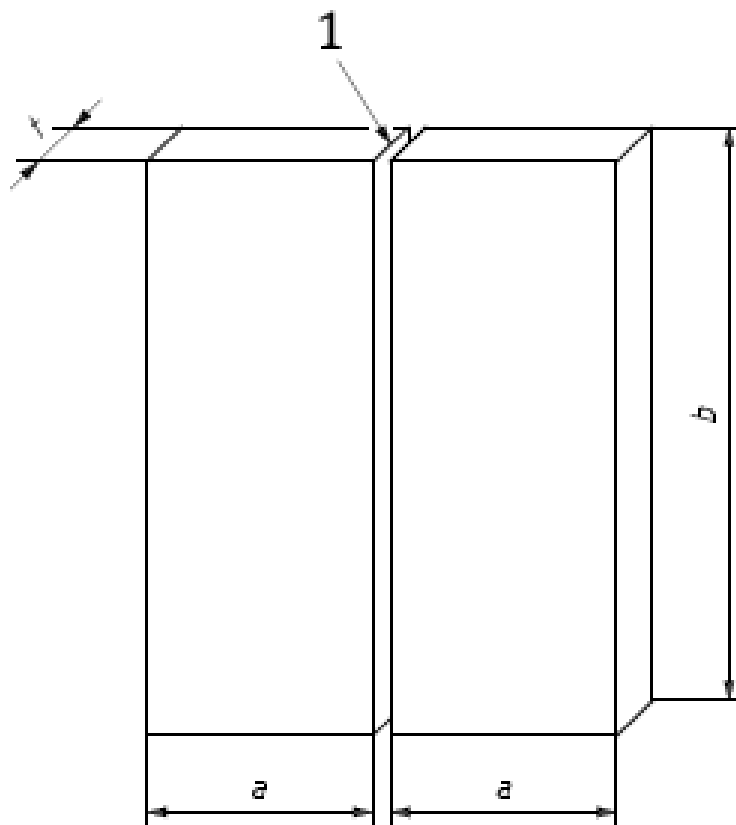
Vaata Lisad, Lisa 1, Tabel 2.2 Põhikatsekehade materjalid, paksused ja keevituse parameetrid [1].

Vaata Lisad, Lisa 1, Tabel 2.3 Põhikatsekehade materjalid, paksused ja keevituse parameetrid [1].

2.2.1 Katsekehade valmistamine ja keevitamine

Katsekehade ettevalmistus ja keevitamine peab toimuma vastavuses pWPS-iga, mida nad peavad esindama. Keevisõmbluse asendid ja piirangud katsekeha kalde- ja pöördenergale peavad olema kooskõlas standardiga EN ISO 6947. [28] Kui traagelõmblused sulatatakse lõppliitmesse, tuleb need lisada ka katsekehale.

Katsekehade keevitamist ja katsetamist peab tõendama eksamineerija (NoBo inspektor) või eksamineeriv asutus (NoBo) [29].



Joonis 2.4 Täieliku läbikeevitusega plaadi pötkliite katsekeha [29].

Selgitused:

1 Liite ettevalmistus ja sobitus, nagu on detailiseeritud keevitusprotseduuri eelspetsifikaadis (pWPS), a - minimaalne mõõde 150 mm, b - minimaalne mõõde 350 mm, t - materjali paksus, mm.


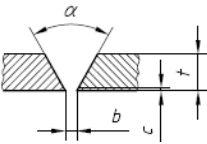
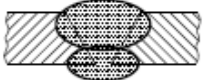

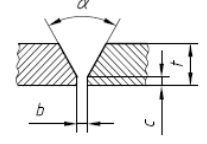

Liite servade ettevalmistamine ja faasimine

Standardi EN ISO 9692 selles osas toodud servade ettevalmistuse soovitusel on sobivad alljärgnevale keevitusprotsessidele, mis on toodud tabelis 2.4 (on võimalikud eri protsesside kombinatsioonid) [29]:

- (131) MIG-keevitus täistraadiga; kaitsegaaskaarkeevitus inertgaasis täistraadiga;
- (135) MAG-keevitus täistraadiga; kaitsegaaskaarkeevitus aktiivgaasis täistraadiga;
- (141) TIG-keevitus täis-lisamaterjaliga (traat/varras); kaarkeevitus volframelektroodiga inertgaasis täislisamaterjaliga (traat/varras);

MÄRKUS Numbrid ümarsulgudes osutavad standardis EN ISO 4063 toodud keevitusprotsesside tunnusnumbritele [10].

Tabel 2.4 — Mõlemalt poolt keevitatud pökkõmbluste servade ettevalmistus [30].

Viite nr	Materjali paksus t , mm	Servade ettevalmistus	Õmbluse tähis (vastavalt standardile EN ISO 2553[1])	Ristlõige	Mõõtmed				Soovitavad keevitusprotsessid (viitenumber vastavalt standardile ISO 4063[2])	Keevisõmbluse eskiis	Märkused
					α, β	b , mm	c , mm	h , mm			
2.2	$3 \leq t \leq 40$	Lihtsa Vkujuga			$40^\circ \leq \alpha$ juure läbimiga. $\leq 60^\circ$	≤ 3	≤ 2	—	111, 141, 13		Näidatud koos juureläbimiga
2.3	> 10	Lihtsa Vkujuga ja laia juurepinnaga			$40^\circ \leq \alpha$ $\leq 60^\circ$	$1 \leq b \leq 3$	$2 \leq c \leq 4$	—	111, 141, 13		Erijuhtudel on võimalik ka väiksematel paksustel ja keevitusprotsessiga 3. Näidatud koos juureläbimiga.

2.2.2 NDT- ja DT-uurimine ja katsetamine

Katsetamise viis ja ulatus peab olema vastavuses tabeli 2.5 nõuetega ja Tasemele 2:

Rakendusstandard võib spetsifitseerida lisakatseid, näiteks:

- keevisõmbeluse piktõmbekatse;
- kogu keevismetalli paindekatse;
- korrosioonikatse;
- keemiline analüüs;
- mikrostruktuuri uuring;
- deltaferriidi määramine;
- kõvaduskatse;
- ristikatse;
- löökpainde katse;
- mittepurustav katsetamine (NDT);

MÄRKUS Spetsiifilised kasutuse, materjalide või valmistamise tingimused võivad nõuda palju laialdasemaid katsetusi kui on spetsifitseeritud selles dokumendis, eesmärgiga saada rohkem infot ja vältimaks keevitusprotseduuri katse kordamist hilisemal ajal lisakatseandmete saamiseks.

Tabel 2.5 Tasemele 2: Katsekehade uurimine ja katsetamine [29].

Katsekeha	Katsetamise viis	Katsetamise ulatus	Joonealune märkus
Täieliku läbikõõmitusega pöikõõmbeluse — joonised 1 ja 2	Visuaalne uuring	100 %	—
	Radiograafia või ultraheliuuring	100 %	a
	Pinnapragude avastamine	100 %	b
	Pöiktõmbekatse	2 katsekeha	—
	Pöikpaindekatse	4 katsekeha	c
	Löögisitkuse katse	2 komplekti	d
	Kõvaduskatse	on nõutud	e
Makrostruktuuri uuring	1 katsekeha	—	

^a Ultraheliuuringut ei tohi kasutada paksustel $t < 8$ mm ja materjali gruppidele 8, 10, 41 kuni 48;

^b Ligipääsetavad keevisõmbeluse pinnad: penetrantkatse või magnetpulberkatse. Mittemagnetilistele materjalidele penetrantkatse;

^c Paindekatse korral vaata 7.4.2.

^d 1 komplekt keevismetallist ja üks komplekt termomõju tsoonist (HAZ) materjali paksusel $t > 12$ mm ja millele on löögisitkuse nõuded spetsifitseeritud tehnilistes tarnetingimustes ja/või kui see on kohane kasutustingimustele;

Rakendusstandardid võivad nõuda löögisitkuse katseid materjali paksustel alla 12 mm. Katsetamise temperatuuri peab valima tootja seoses kasutusega või rakendusstandardiga. Lisakatseid vaata 7.4.4;

^e Pole nõutav põhismetallidele: alarühm 1.1, rühmadele 8 ja 41 kuni 48 ja eri materjalidest liidetele nende rühmade vahel, välja arvatud eri materjalidest liited alarühma 1.1 ja rühma 8 vahel;

^f Kui rakendusstandardiga on nõutud mehaanilised omadused, tuleb need vastavalt katsetada. Kui on vajalik lisakatsekeha, peavad selle mõõtmed olema piisavad mehaaniliste omaduste katsetamise võimaldamiseks. On nõutud, et selle lisakatsekeha korral oleksid keevitusparameetrite vahemik, põhimaterjali rühm, lisametall ja termostöötlus samad;

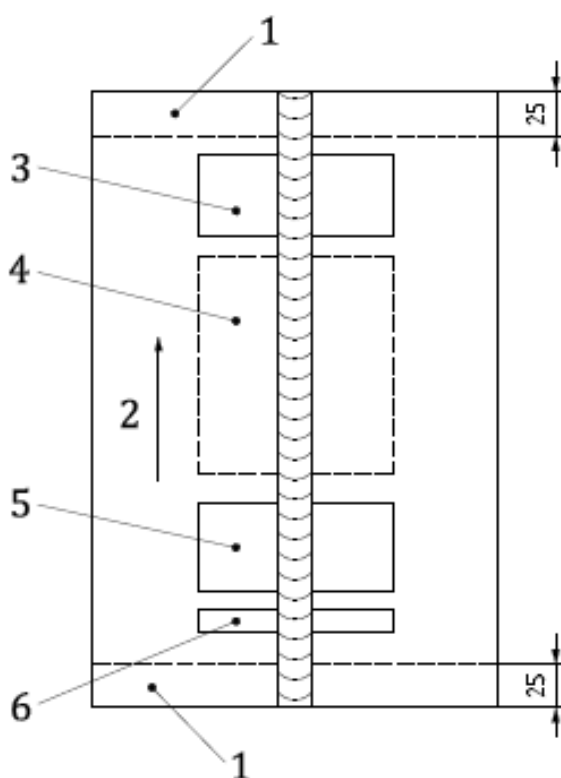
^g Välisläbimõõdul ≤ 50 mm ei ole nõutav ultraheliuuring, kuid on nõutud radiograafia uuring eeldusel, et liite konfiguratsioon võimaldab arvestatavaid tulemusi. Välisläbimõõdul > 50 mm ja kui ei ole tehniliselt võimalik teha ultraheliuuringut, tuleb teha radiograafia uuring eeldusel, et liite konfiguratsioon võimaldab arvestatavaid tulemusi;

Katsekehade asukoht ja võtmine [29]:

Katsekehad tuleb võtta vastavuses joonisega 2.5.

Kõvaduse ja löögisitkuse katsekehade asukoha valikul tuleb arvesse võtta jaotist 8.4.2. On lubatud katsekehade võtmise asukohtadena vältida alasid, milles esinesid kasutatud NDT meetodi(te)le lubatud aktsepteerimise piiridesse jäävad keevitusdefektid.

Mõõtmed on millimeetrites



Joonis 2.5 Plaadi põkkliite katsekehade asukohad [29]

Selgitused:

1 Eemaldada 25 mm;

2 Keevitamise suund;

3 Ala: — 1 tõmbekatsekeha; — paindekatskehade;

4 Ala: — löögisitkuse ja lisakatsekehad, kui on nõutud;

5 Ala: — 1 tõmbekatsekeha; — paindekatskehade;

6 Ala: — 1 makrostruktuuri katsekeha; — 1 kõvaduse katsekeha.

MÄRKUS Ei ole mõõtkavas.

Mittepurustava katsetamisele nõuded (ingl k NDT) [29]:

Kõik mittepurustavad katsetused tuleb teostada enne katsekehade lõikamist vastavuses tabeliga. Eemaldatud otsatükki, vt joonis 2.6, ei arvestata NDT teostamisel. Mis tahes spetsifitseeritud keevitusjärgne termotöötlus (ingl PWHT) tuleb teostada enne mittepurustavat katsetamist.

Materjalidele, mis on tundlikud vesinikpragude tekkele ja millele pole ette nähtud järelkuumutust või keevitusjärgset termotöötlust (PWHT), tuleb mittepurustav katsetamine edasi lükata. Olenevalt liite geomeetriast, materjalidest ja tootmisnõuetest, tuleb NDT teha tabeli 2 kohaselt vastavuses standardiga EN ISO 17637 (visuaalne uurimine), EN ISO 17636-1 või EN ISO 17636-2 (radiograafia uuring), EN ISO 17640 (ultraheliuuring), EN ISO 3452-1 (penetrantkatse) ja EN ISO 17638 (magnetpulberkatse).

Aktsepteerimise tase peab olema vastavuses jaotisega 7.5.

Purustava katsetamisele nõuded (ingl k DT) [29]:**Põiktõmbekatse:**

Põkkliidete katsekehad ja katsetamine põiktõmbekatsele peavad olema vastavuses standardiga EN ISO 4136. Eri põhimetallidest liite tõmbetugevus ei tohi olla väiksem kui väikseima tõmbetugevusega põhimaterjali minimaalne spetsifitseeritud tõmbetugevuse väärtus.

Paindekatsed:

Põkkliidete katsekehad ja paindekatsed peavad vastama standardile EN ISO 5173:2010. Materjali paksustel < 12 mm tuleb katsetada kaks juure ja kaks pealispinna katsekeha. Materjali paksustel ≥ 12 mm võib kasutada nelja külgpainde katsekeha juure ja pealispinna katsekehade asemel.

Eri metallidest plaatide või heterogeensete põkkliidete puhul võib kasutada ühte juurepoolset ja ühte õmblusepoolset pikipaindekatskeha nelja põikpaindekatskeha asemel.

Makrostruktuuri uurimine:

Katsekeha tuleb ühelt poolt ette valmistada ja söövitada kooskõlas standardiga EN ISO 17639 kuni selge sulamise piirjoone, termomõju tsooni ja läbimite ilmneniseni. Aktsepteerimistasemed peavad olema kooskõlas jaotisega 7.5.

Löögisitkuse katsetamine:

Löögisitkuse katsekehad ja katsetamine peavad vastama sellele dokumendile katsekehade asukoha ja katsetustemperatuuri asjus ning standardile EN ISO 9016 mõõtmete ja katsetamise asjus.

Eri metallidest liidete löögisitkuse katsed tuleb teha iga põhimetalli termomõju tsoonist ja neeldunud purustustöö peab olema vastavuses vastava põhimaterjali standardiga.

Kolme katsekeha katsetamise keskmine väärtus peab vastama spetsifitseeritud nõuetele. Igal soone asukohal võib üksik katsetulemus olla väiksem keskmisest spetsifitseeritud väärtusest, kuid mitte vähem kui 70 % sellest väärtusest.

Kõvaduse katsetamine:

Vickersi kõvaduskatse koormusega HV10 tuleb teostada vastavuses standardiga EN ISO 9015-1. Kõvaduse mõõtmised tuleb teha keevisõmbluses, termomõju tsoonis ja põhimetallis, et hinnata kõvaduste vahemikku üle keevisliite ristlõike.

Kui on kasutatud enam kui ühte keevitusprotsessi, tuleb igat keevitusprotsessi katsetada vähemalt ühe indenteerimisjälgede reaga. Igas indenteerimisjälgede reas peab olema vähemalt 3 jälge igas järgmises alas:

- keevisõmbluses;
- mõlemas termomõju tsoonis;
- mõlemas põhimetallis.

Aktsepteerimistasemed:

Keevitusdefektide aktsepteerimistasemed, mis vastavad tasemetele 1 ja 2, on toodud tabelis 2.6.

MÄRKUS Vastavus standardi EN ISO 5817 kvaliteeditasemete ja mittepurustava kontrolli eri aktsepteerimistasemete vahel on toodud standardis EN ISO 17635.

Tabel 2.6 — Keevitusdefektide aktsepteerimistasemed [29].

ISO 5817 Viite nr	ISO 6520-1 Viite nr	Tähistus	Tase 2 Kvaliteedi tase ISO 5817 järgi
1.1	100	Pragu	B (ei lubata)
1.5	401	Kokkusulamatus (liiteviga)	B (ei lubata)
1.6	4021	Juure läbikeevitamatus	B (ei lubata)
1.7	5011	Pidev sisselõige	C
	5012	Katkendlik sisselõige	C
1.9	502	Õmbluse liigtugevdus (põkkõmblus)	C
1.10	503	Liigkumerus (nurkõmblus)	C
1.11	504	Juurevajum	C
1.12	505	Ebaõige õmbluse üleminek põhismetallile	C
1.16	512	Nurkõmbluse liigne assümeetria (kaatetite liigerinev pikkus)	B
1.21	5214	Nurkõmbluse liigkõrgus (paksus)	C
—	—	Kõik teised defektid ^a	B

^a Kui on nõutud rakendusstandardis või kui on spetsifitseeritud, võivad mikropragudele tundlikud materjalid nõuda erilist uurimist.

Soojussisestusele nõuded (kaare energia):

Soojussisestuse (ingl k Heat input) võib asendada kaare energiaga (ingl k arc energy) (J/mm). Kaare energia tuleb arvutada vastavuses tehnilise aruandega ISO/TR 18491. Kui kasutatakse arvutusi soojussisestuse arvutamiseks, tuleb arvesse võtta k-tegurit (protsessi kasutegurit) vastavuses tehnilise aruandega ISO/TR 17671-1. Arvutamise viis, kas soojussisestus või kaare energia, tuleb dokumenteerida.

Tasemele 2: Kui rakendatakse löögisitkuse nõudeid, on kvalifitseeringu ülemine piir soojussisestusele 25 % kõrgem sellest, mida kasutati katsekeha keevitamisel.

Kaare energia ja soojussisestus on kaare genereeritud mõõdetud soojus. Kuna aga varem olid need sama mõõtmise eri terminid, arvutatakse neid nüüd erinevalt.

Ükskõik kumba, kas soojussisestust või kaare energiat, võib kasutada keevitamise juhtimiseks, kui nad on arvutatud vastavuses tehnilise aruandega ISO/TR 18491.

Mikrostruktuurile ja FN-ferridi sisalduse mõõtmisele nõuded vastavalt standardile EN ISO 13445-4 [31]:

Lisaks EN ISO 15614-1:2004 nõuetele kohaldatakse materjaligruppidele 8.2 ja 10 korral tuleb teostada mikrostruktuuri uuring vastavalt EN 13445-2:2014 tabelile A-1.

- nõuded keevistele materjaligrupp 8.2 korral - mikrostruktuuri uuring peab näitama vastavat mikrostruktuuri;

MÄRKUS 2 Üsikumid eraldi paiknevad mikropraod pikkusega 1,5 mm võivad olla lubatud, kuid peavad olema protokollitud.

- nõuded keevistele materjaligrupp 10 korral - mikrostruktuuri uuring peab näitama vastavat mikrostruktuuri;
- ferridi sisaldus termomõjutsoonis (HAZ) peab olema vahemikus min 30 % kuni maksimaalselt 70%. Kõrge temperatuuriga HAZ tsoonis peab ferridi sisaldus sulamisjoonest umbes kahekordse terase suuruse kaugusel olema võrdne või vähem kui 85 %. Kui kasutatud keevituse lisamaterjalid on austeniit-ferrit tüüpi, peab keevismetalli ferridi sisaldus olema vahemikus 30 % kuni 70 %. Ferridi sisaldust tuleb mõõta metallograafilisel meetodil. Kui keevituse lisamaterjalid on mitte-kokkusobivat tüüpi (nt austeniitsed), siis ferridisalduse nõuet keevitatud metallis ei rakendata;

MÄRKUS 3 Metallograafiliste mõõtmiste piirhälve on sageli suurusjärgus 5 %.

2.3 SEM ja EDS analüüs ja tulemuste analüüs.

SEM ja EDS analüüs ja tulemuste analüüs sisaldavad keevismetalli ja HAZ-tsooni keemilist koostist, ulatust, sealhulgas ristlõiked ja fotod mikrostruktuurist.

SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM)

Skaneeriv elektronmikroskoopia (SEM) on võimas analüüsimeetod paljude erinevate materjalide suure suurendusega analüüside tegemiseks ja kõrge eraldusvõimega piltide saamiseks. SEM tugineb proovi pinnalt eralduvate kõrge energiaga elektronide tuvastamisele pärast kokkupuudet elektronpüstoli tugevalt fokuseeritud elektronide kiirga. See elektronide kiir fokuseeritakse SEM-objektiivi abil proovi pinna väikesele punktile. Parima kvaliteediga piltide saamiseks saab optimeerida selliseid muutujaid nagu kasutatud kiirenduspinge, kasutatava ava suurus ning proovi ja elektronpüstoli vaheline kaugus (töökaugus), vt joonis 2.6.

Elektrone tuvastamiseks on kaks moodust, mis võimaldavad erinevat tüüpi kuvamist ja analüüsi, millest igaüks annab elutähtsa ülevaate. Tagasilükatud elektronid on tuvastatavad, et saada pildi erinevatel keemilistel kompositsioonidel kontrastsus. Proovi pinna lähedal kiirgavad sekundaarsed elektronid annavad teavet pinna topograafia kohta.



Joonis 2.6 Environmental Scanning Electron Microscope (Zeiss EVO LS15 SEM).

2.3.1 Katsekeha nr pWPS257-I, põhimaterjal on 1.4547 ehk 254 SMO.

Materjali paksus $t=10$ mm, katsetüki sulatuse nr W70286.

Tulemuste analüüs [48]:

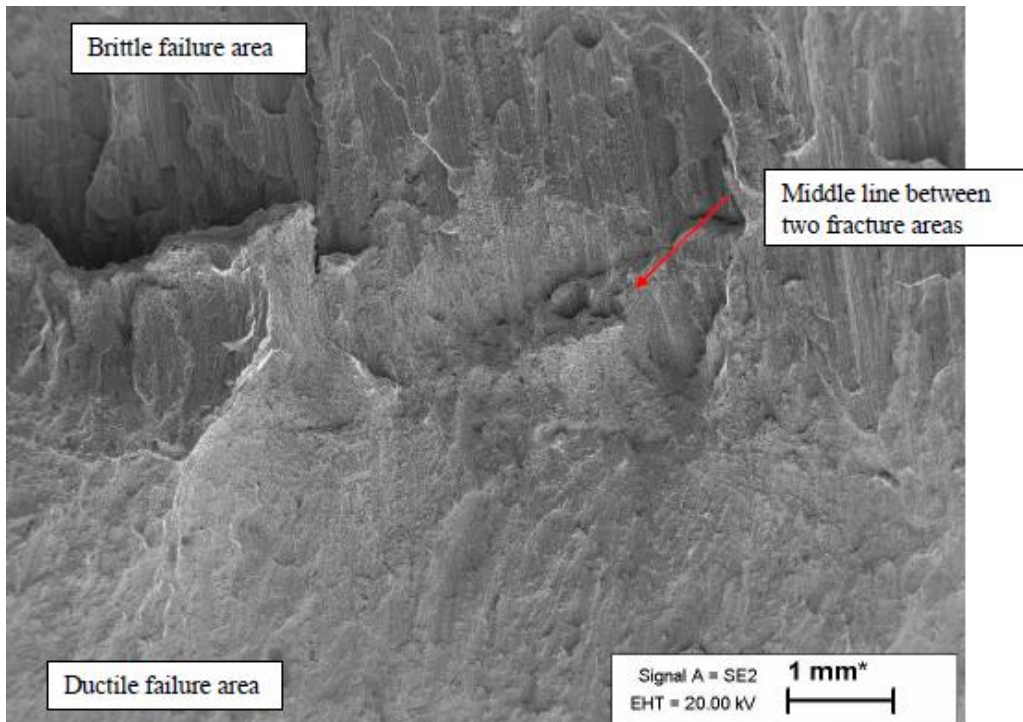
1. Paindekatses toimus purunemine keevisõmbelse keskelt ning juure poolne õmbelse ala ei põhjustanud purunemist (vt paindekatses tulemusi joonis 2.7);



Joonis 2.7 Paindetesti katsetükid ja märgitud punasega uurimisala, mida uuritati SEM analüüsiga.

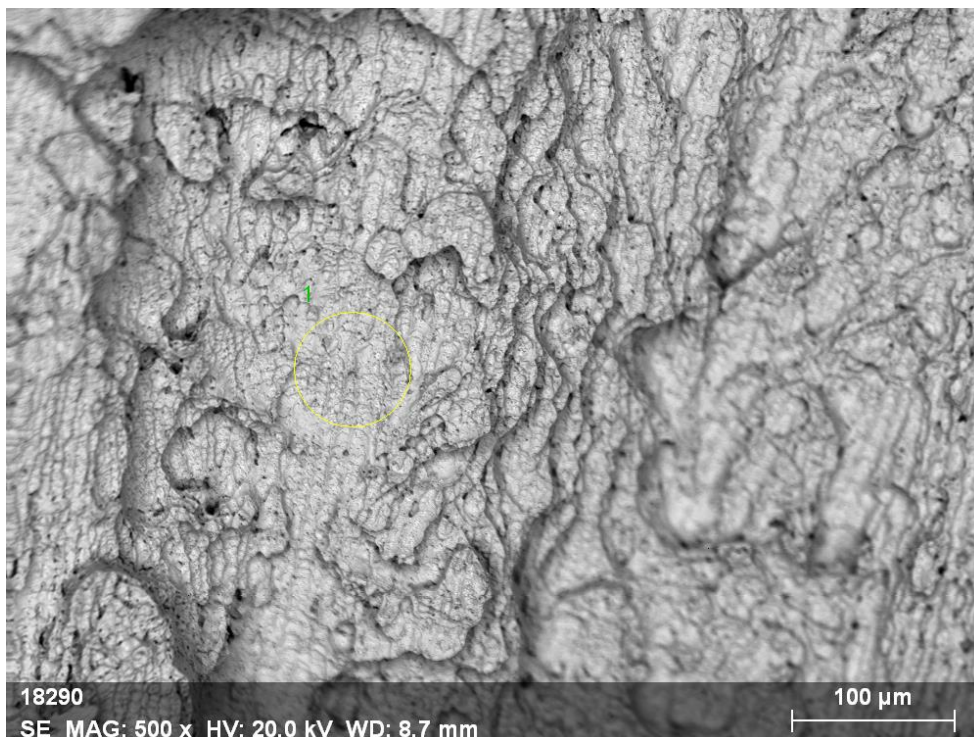


Joonis 2.8 Paindekatses purunenud katsekehde murdepinna skeem, mida kasutatid SEM ja EDS analüüsi tulemuste esitamiseks.



Joonis 2.9 SEM sekundaarsete elektronide foto keskmisest alast, mis asub hapra ja sitke murdepinna vahel. Suurendus 33 X. SEM sekundaarsete elektronide foto näitab peamiselt pinna reljeefi.

2. Keevisõmbuluse plastselt murdunud ala juurel on keemilises koostises tekkinud suhteliselt vähe Nb ja Mo eraldumist (vt joonis 2.10, 3,41 % Nb ja 8,52 % Mo), sarnaselt hapralt murdunud alale (vt joonis 2.13, 2,35 % Nb ja 7,9 % Mo ja vt tabelis 2.7-2.10);

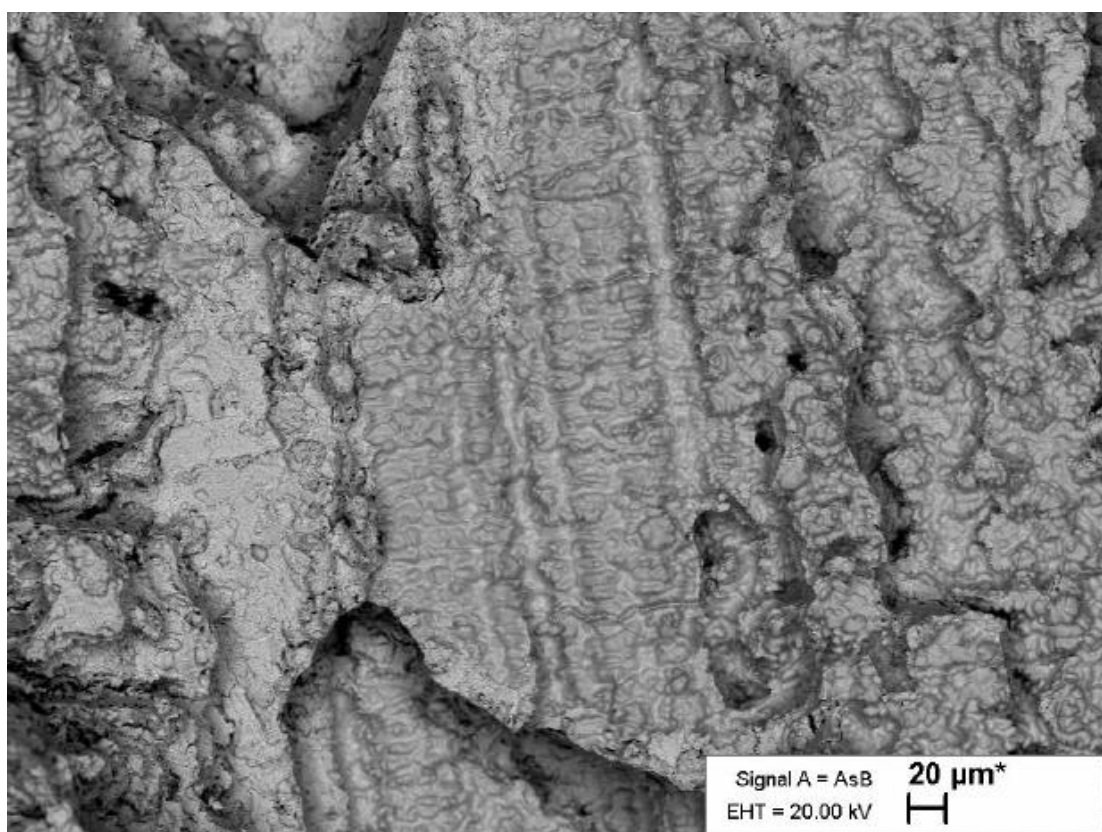


Joonis 2.10 EDS analüüsiala on näidatud kollase värviga. SEM (BSE) foto.

Selgitus: Valitud alalt on näha, et erinevusi murdepinnas ei ole.

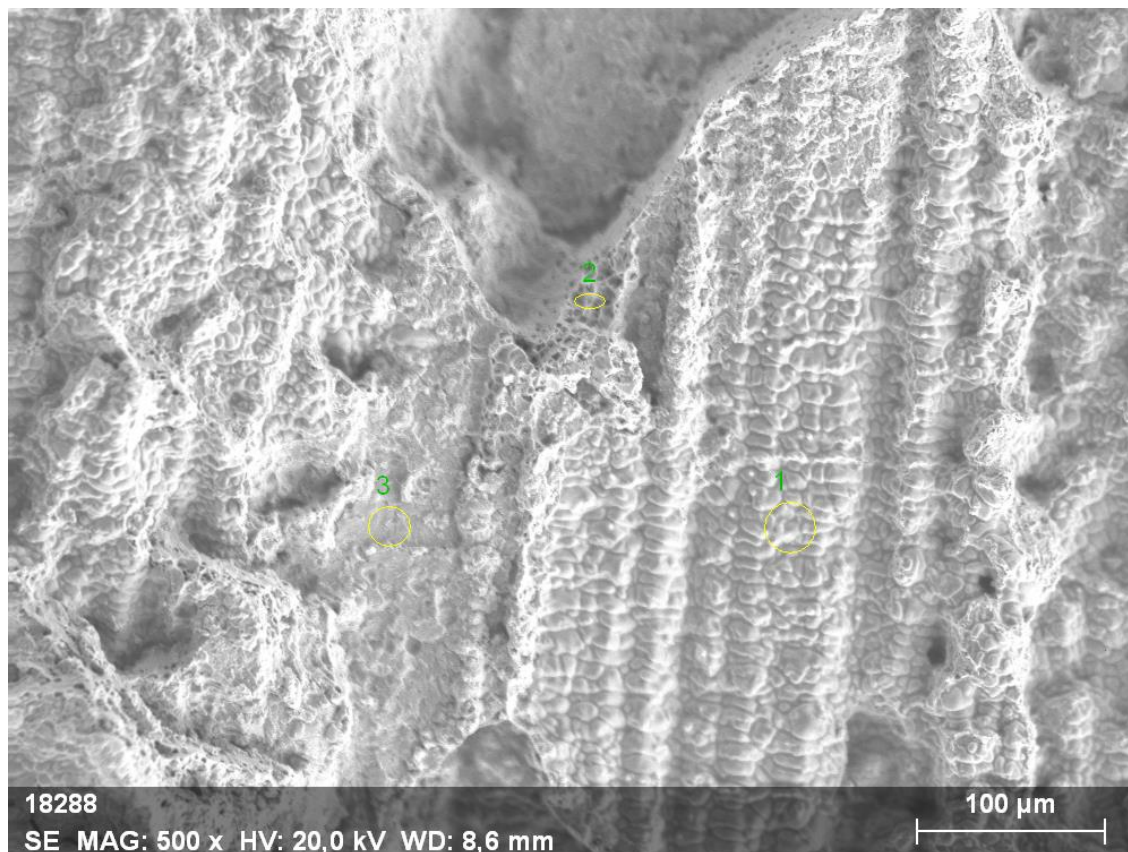
Tabel 2.7 Spektrum 1 uurimisalast

Element	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom C [at. %]	Error [%]
Nickel	K-series	43,42	43,55	43,60	1,2
Iron	K-series	21,54	21,6	22,73	0,6
Manganese	K-series	1,00	1,00	1,07	0,1
Chromium	K-series	21,06	21,12	23,87	0,6
Molybdenum	K-series	8,50	8,52	5,22	0,4
Niobium	K-series	3,41	3,42	2,16	0,2
Silicon	K-series	0,25	0,25	0,52	0,0
Titanium	K-series	0,36	0,36	0,44	0,0
Aluminium	K-series	0,17	0,17	0,38	0,0
-	Total:	99,7	100,00	100,00	-



Joonis 2.11 SEM (SE) foto hapra struktuuri uurimisalast, suurendus 500 X

Selgitus: SEM BSE fotol ei ole näha mittemetalseid materjale, mis näitaks läbikeevitamatust



Joonis 2.12 EDS analüüsiala on näidatud kollase värviga. SEM (BSE) foto.

Tabel 2.8 Spektrum 1 ilma kontaktita pinnaga enne purustamist uurimisala

Element	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom C [at. %]	Error [%]
Nickel	K-series	50,94	52,53	54,55	1,4
Iron	K-series	7,98	8,23	8,98	0,2
Manganese	K-series	0,68	0,70	0,78	0,1
Chromium	K-series	19,41	20,01	23,46	0,6
Molybdenum	K-series	10,90	11,24	7,14	0,7
Niobium	K-series	6,86	7,08	4,64	0,4
Silicon	K-series	0,20	0,21	0,45	0,0
-	Total:	96,97	100,00	100,00	-

Tabel 2.9 Spektrum 2 sitke murru uurimisala

Element	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom C [at. %]	Error [%]
Nickel	K-series	58,07	58,66	59,00	1,6
Iron	K-series	8,78	8,86	9,37	0,3
Manganese	K-series	0,78	0,79	0,85	0,1
Chromium	K-series	20,56	20,77	23,58	0,6
Titanium	K-series	0,59	0,59	0,73	0,0
Molybdenum	K-series	7,86	7,94	4,89	0,5
Niobium	K-series	2,32	2,35	1,49	0,2
Silicon	K-series	0,05	0,05	0,1	0,0
-	Total:	99,00	100,00	100,00	-

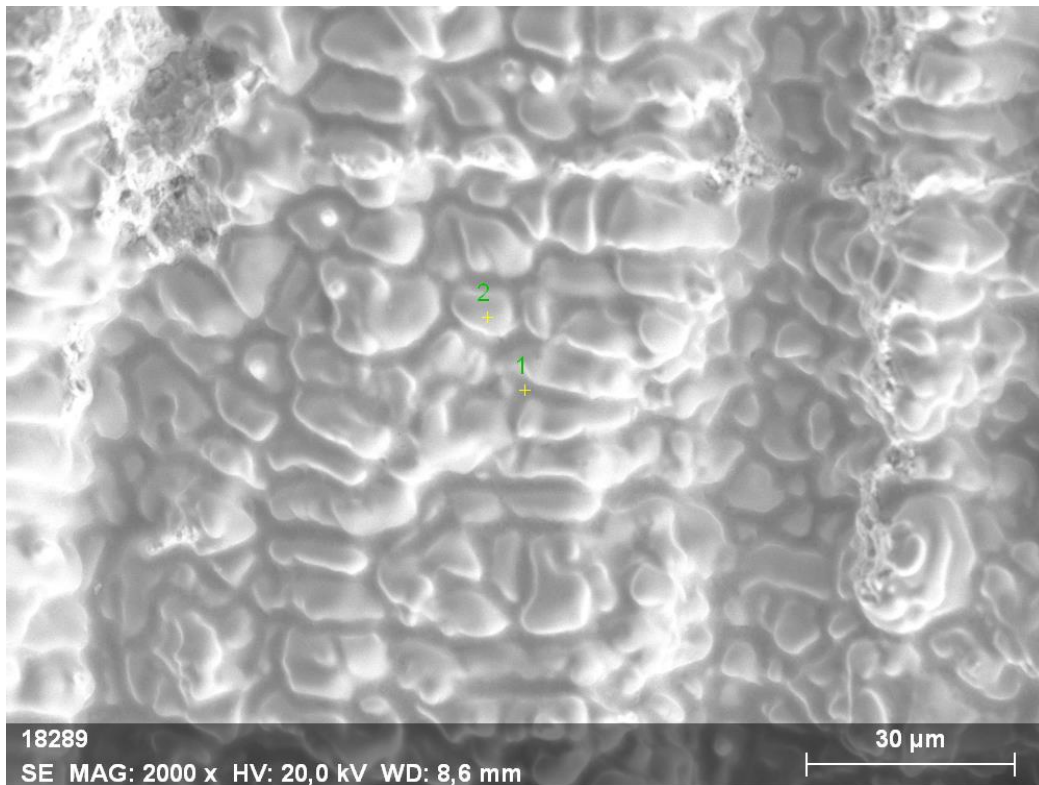
Tabel 2.10 Spektrum 3 hapra struktuuri uurimisala

Element	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom C [at. %]	Error [%]
Nickel	K-series	44,75	46,77	50,33	1,2
Iron	K-series	6,49	6,78	7,67	0,2
Manganese	K-series	0,72	0,75	0,86	0,1
Chromium	K-series	17,31	18,09	21,97	0,5
Molybdenum	K-series	13,72	14,34	9,44	0,8
Niobium	K-series	12,25	12,81	8,71	0,7
Silicon	K-series	0,43	0,45	1,02	0,0
-	Total:	95,68	100,00	100,00	-

Selgitus: Nb sisaldus on hapra struktuuri alal kõrgem kui sitke murru alal.

3. Nb ja Mo sisaldus on suurem hapralt murdunud alas (vt joonis 2.12 EDS 3) ja keevise tardumise käigus tekkinud kuumpragudes (vt joonis 2.12 EDS 1);

4. Kuumpragudes on alad, kus on tekkinud suur Nb-i segregatsioon ja suure tõenäosusega on see kogu keevise ulatuses arvestades metalli tahkumise iseloomu (vaata joonis 2.11, Nb 11% ja Mo 4 % ja tabel 2.11);



Joonis 2.13 EDS analüüsiala on näidatud kollase värviga. SEM (SE) foto.

Tabel 2.11 Spektrum 1 uurimisalast.

Element	Series	unn. C [wt. %]	norm. C [wt. %]	Atom C [at. %]	Error [%]
Nickel	K-series	47,53	48,88	51,94	1,3
Iron	K-series	7,09	7,29	8,15	0,2
Manganese	K-series	0,56	0,57	0,65	0,1
Chromium	K-series	18,27	18,79	22,54	0,5
Molybdenum	K-series	12,78	13,14	8,55	0,8
Niobium	K-series	10,66	10,96	7,36	0,6

Silicon	K-series	0,36	0,37	0,81	0,0
-	Total:	97,25	100,00	100,00	-

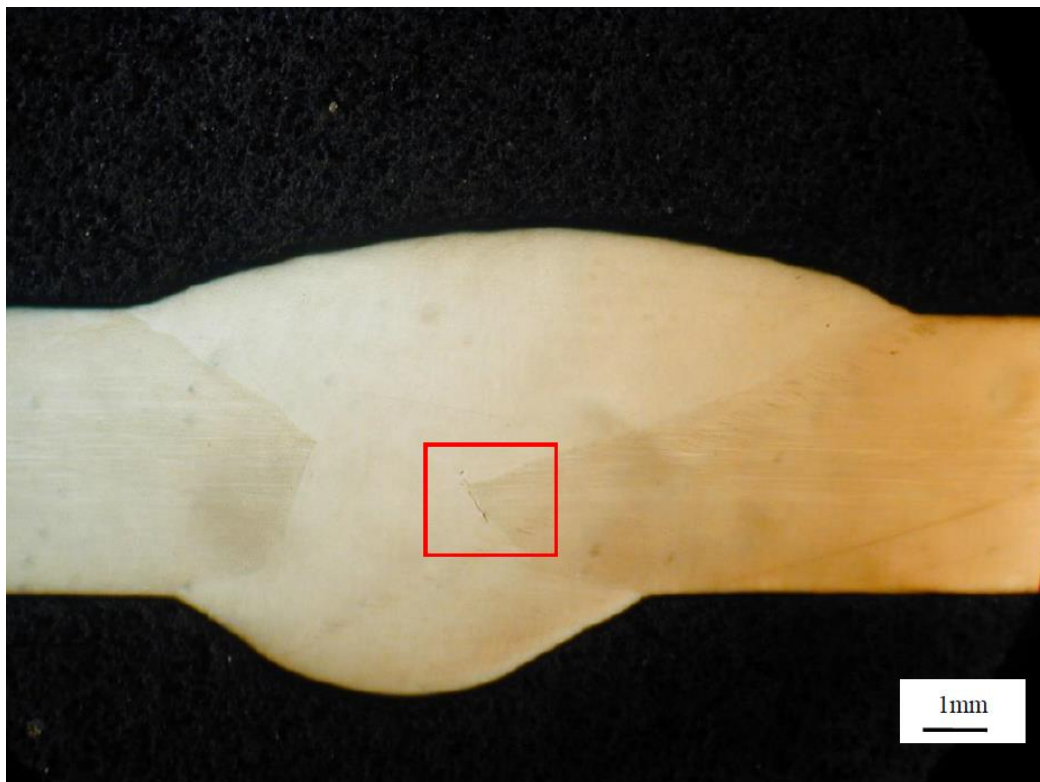
5. Elementide segregatsioon on põhjustatud tahkumise protsessist Vedel faas - γ (austeniit)+ δ (ferriit). Pärast tardumist δ (ferriit) -> γ (austeniit). Toatemperatuuril on austeniitne struktuur, mida näitab ka XRD analüüs;
6. Aeglane jahtumine põhjustab keemiliste elementide segregatsiooni. Seda võib ära hoida kiirem jahtumine;

2.3.2 Katsekeha nr pWPS258-M, põhimaterjal on 1.4410 ehk Super Duplex.

Materjali paksus $t=5$ mm, katsetüki sulatuse nr 552569.

Tulemuste analüüs [49]:

1. Makrostruktuuri pilt näitab kokkusulamatust juureõmbluses (vt joonis 2.14-2.15 ja tabel 2.12);



Joonis 2.14 Makrostruktuuri foto.

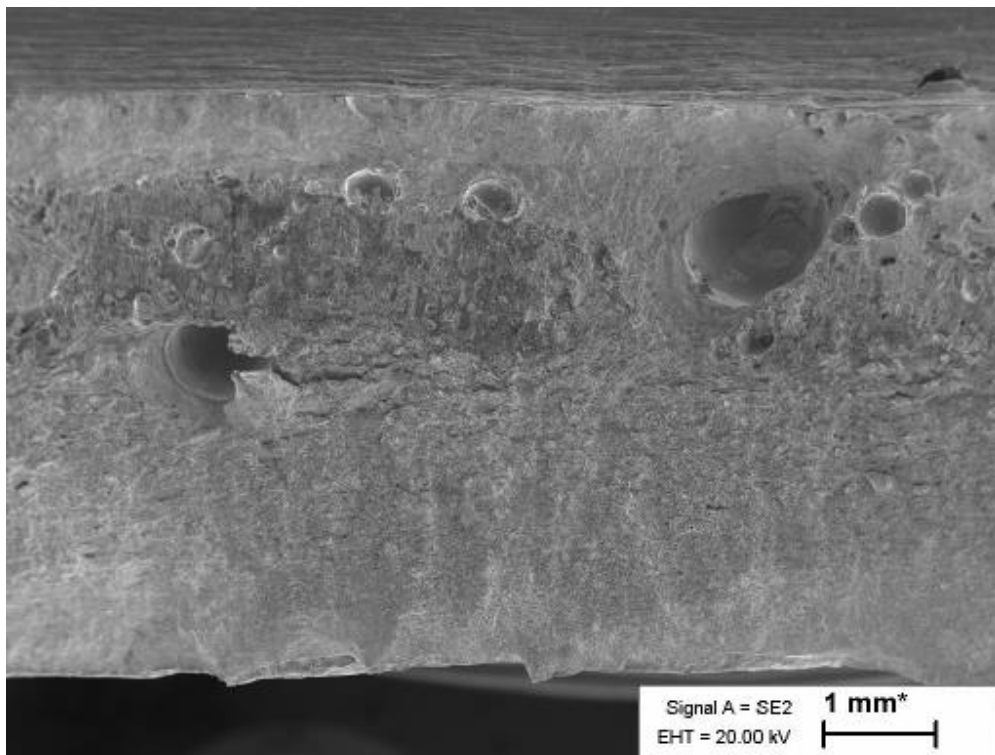
Tabel 2.12 Defektide analüüsi tulemused:

No.	Imperfection reference no. (according to EN ISO 6520-1:2008)	Imperfection designation	Dimensions	Remarks
1	401	Lack of fusion	0,8 mm	-



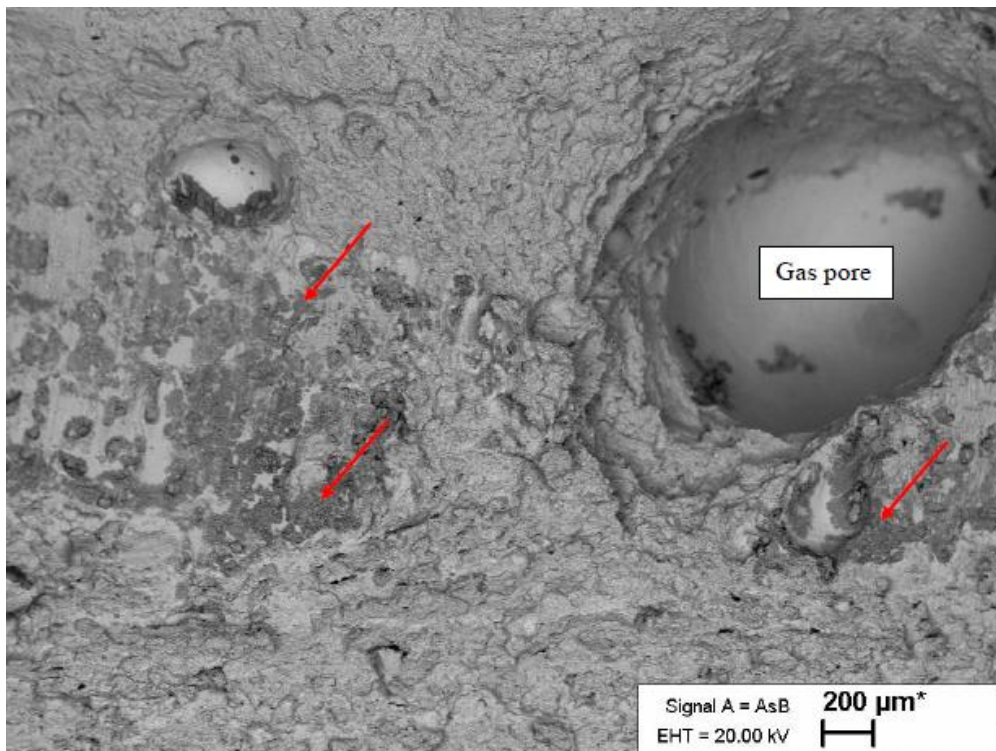
Joonis 2.15 Kokkusulamatuse suurendamine.

2. SEM ja EDS alalüüs kokkusulamatusest viitab poorsusele ja kõrgele hapniku sisaldusele (vt joonis 2.16 ja 2.17);



Joonis 2.16 SEM BE foto avastatud kukkusulamatus paindetestis, suurendus 33X

Selgitus: SEM BE foto paindekatses avatud defektist, suurendus 33 X.



Joonis 2.17 SEM BE foto avastatud kokkusulamatusega paindetesti murdumisel, suurendus. 75X.

Selgitus: Punased nooled näitavad hapniku rikkaid alasid, mis SEM BE fotol on nähtavad tumedalt. Hapniku rikkad alad ei ole kokku keevitatud tulenevalt madalast temperatuurist keevitamise ajal.

2.4 XRD faasiline analüüs

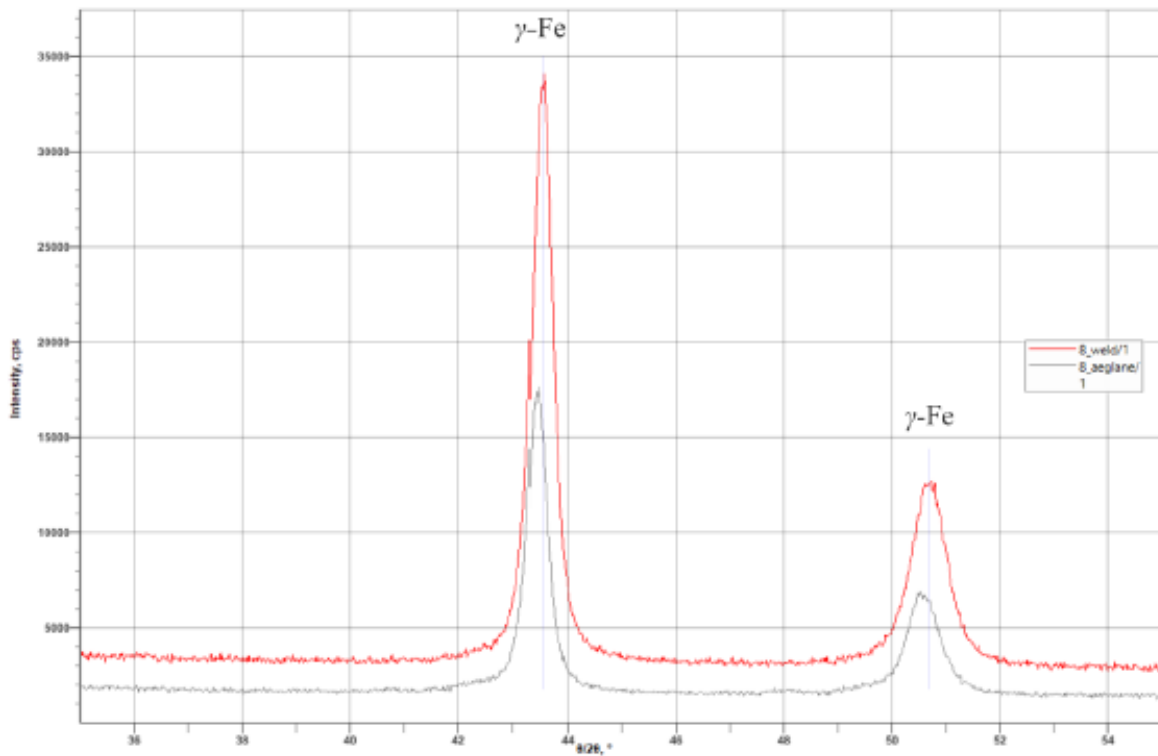
XRD faasiline analüüs sisaldab keevismetalli ja HAZ-tsooni, ulatust, sealhulgas ristlõiked ja fotod mikrostruktuurist.

2.4.1 Katsekeha nr pWPS257-I, põhimaterjal on 1.4547 ehk 254 SMO.

Materjali paksus $t=10$ mm, katsetüki sulatuse nr W70286.

Tulemuste analüüs [48]:

XRD alalüüs näitab austeniitset struktuuri nii põhimetallis kui ka õmbluses (vt XRD analüüsi tulemusi joonisel 2.18).



Joonis 2.18 Katsekeha nr 8 XRD analüüs, punane – keevis ja hall – põhimetall, γ -Fe tippnihe (ingl k Peak shift)

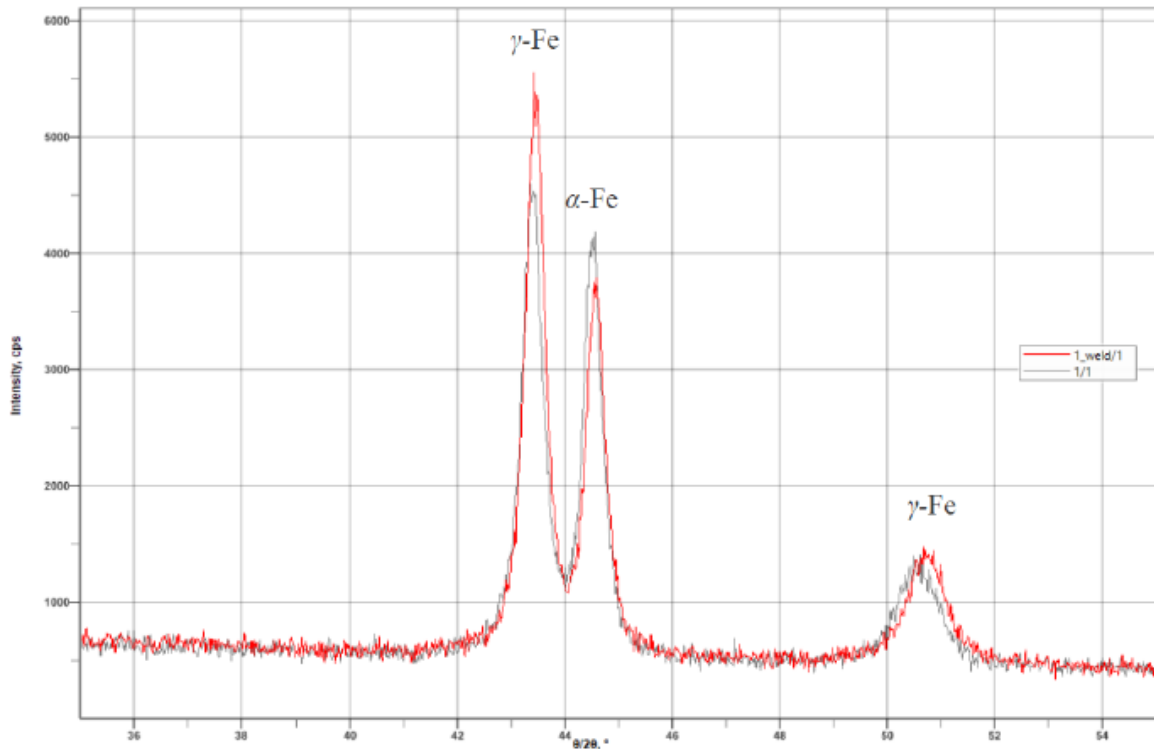
Selgitus: Gamma raua kristall struktuur on K12 (ferriidil K8). See on tardlahus, kus peamiselt Ni langetab ferriidi transformatsiooni temperatuuri toatemperatuurini. Vastavalt XRD analüüsile leiti ainult austeniitne K12 faas ja teisi faase ei leitud. Detekteerimise piiriks saab lugeda 0,5 mahu protsenti.

2.4.2 Katsekeha nr pWPS258-M, põhimaterjal on 1.4410 ehk Super Duplex.

Materjali paksus $t=5$ mm, katsetüki sulatuse nr 552569

Tulemuste analüüs: [49]

XRD analüüs näitab, et põhimaterjal ja keevisõmbluses on võrdne kodus ferriiti ja austeniiti ning nende kogused vastavad ka tingimustele. Mingeid teisi faase ei leitud. (vt XRD analüüsi tulemusi joonisel 2.19).



Joonis 2.19 Katsekeha nr 1, XRD analüüs, punane – keevis ja hall – põhimetall, γ -Fe ja α -Fe tippnihe (ingl k Peak shift)

Selgitus: XRD analüüs näitab 2 faasi: austeniitne ja ferriitne. Keevitusõmbluses on vähem austeniiti kui põhimaterjalis.

2.5 KOKKUVÕTE, JÄRELDUSED JA TULEVASED UURINGUD

Antud uurimistöö põhiosas käsitletakse kahte kõrgleegeritud roostevaba terast ja nende võimalikud ehk olemasolevad keevitustehnoloogia lahendused ettevõttes ESTANC ASis. Samuti oli oluliselt ka vaadelda maailma metallurgia- ja keevituse lisaainete juhtivatelt tootjatelt soovitusi vajaliku katsekeevitamiste teostamiseks. Keevituse lisamaterjalide analüüs sealhulgas praktilised katsetused ettevõttes õigete keevitusparameetrite otsingu kohta näitasid, et soovitatud keevituse parameetrid keevituse lisaainete tootjatelt on sarnased ja ulatuses umbes +/- 15% ning neid võib rakendada mis iganes traadi kaubamargiga kasutades 131 (MIG), 135 (MAG) ja 121 (SAW) keevituse protsessi ja kaitsegaasi Ar99.9% ja Ar+2%CO₂ sõltuvalt keevitatud põhimaterjali margist 254 SMO (EN nr 1.4547) või Super Duplex (EN nr 1.4410). Keevituse lisamaterjalide keemiliste koostiste analüüs näitas väikest erinevust erinevate traatide vahel ulatuses umbes 10%.

Praktiliseks osaks ja uuringute teostamiseks on keevitatud 30 plaati kolmes paksuse diapasaonis – 5, 8 ja 10 mm-i, mis on kõige laiemalt kasutatavad ettevõttes.

254 SMO põhimaterjali keevitamiseks on kasutatud kombineeritud keevitusprotsess – juurel 131 ja täites 121 kasutades kaitsegaasi Ar99.9%, aga Super Duplex-iks plaat 5 mm-i on keevitatud teise keevitusprotsessiga – 135 ja kaitsegaasis Ar+2%CO₂. Kõik valitud kasutatavad keevitusparameetrid on samasugused.

Mittepurustava kontrolli käigus on kasutatud kaks kontrolli meetodit – röntgen ja penetrant. Põhikatsekehadel röntgen avastas 2 põhidefekt - poorsus ja pragu keset õmbluses, mis on iseloomulik kui 254 SMO (EN nr 1.4547)-le nii Super Duplex (EN nr 1.4410)-le vastavalt tehtud põhidefektide ülevaatusel. Penetrant katse ka leidis pragunemist õmbluse keskel. Kokkuvõttes 70% põhikatsekehadest 254 SMO-st ja 50% Super Duplexi-st sisaldavad defekte, mis ei ole lubatud vastavalt EN ISO 5817 (klass B) standardile. Jäänud osa katsekehadest on saadetud purustava kontrolli laborile, kus viiakse vajalikud purustamise katsed läbi vastavalt keevitustehnoloogia atesteerimise EN ISO 15614-1 standardi nõuetele.

Purustava kontrolli paindekatse tulemused näitasid, et valmistatud plaadid põhimaterjalist 254 SMO-st plaat paksusel 5 mm on edukalt katset läinud, kuid 8 ja 10 mm-i on katsetamise käigus murdud, mis ei ole lubatud. Esialgne võimalik põhjus võib olla põhimaterjali habras struktuur.

Super Duplex-ist katsekehade paindekatse on teostatud ainult paksusele 8 ja 10 mm-i, mis on edukalt õnnestunud. Paksusele 5 mm-i ei saanud läbi viia paindekatset, kuna esialguses antud katsekeha oli pragunemisega õmbluse sees, mida eelnevalt näitas mittepurustav röntgenkatse. Täpsemaks uuringuks oli tehtud makrolihvimine, mis näitas defekti nr 401 - kokkusulamatus (EN ISO 5817, klass B) ja selle suurust 0.8 mm-i asukohaga juureõmbluses, mis ei ole lubatud.

Katsekehade osad sealhulgas 5 mm-i (Super Duplex) ja 8 ja 10 mm-i (254SMO), mis ei ole paindekatse läbi läinud olid saadetud SEM ja XRD analüüsile, et välja selgitada, mis põhjusel tekkis võimalik habras struktuur, millest hoiatab Shaeffler DeLong diagrammi ette.

254SMO-I SEM- ja XRD analüüs avastas, et antud katsekehadel on üks austeniitne faas kui keevismetallis nii põhimaterjalis. Vastavalt XRD analüüsile on leitud ainult austeniitne K12 faas ja teisi faase ei ole leitud. Keevisõmbluse plastselt murdunud ala juurel on keemilises koostises tekkinud suhteliselt vähe Nb ja Mo eraldumist (3,41 % Nb ja 8,52 % Mo), sarnaselt hapralt murdunud alale - Nb ja 7,9 % Mo. Nb ja Mo sisaldus on suurem hapralt murdunud alas ja keevise tardumise käigus tekkinud kuumpragudes. Hapra struktuuri uurimisel kuumpragudes on alad, kus on tekkinud suur Nb-i segregatsioon ja suure tõenäosusega on see kogu keevise ulatuses arvestades metalli tahkumise iseloomu (vaata Nb 11% ja Mo 4 %). Elementide

segregatsioon on põhjustatud tahkumise protsessist vedel faas -

γ (austeniit)+ δ (ferriit). Pärast tardumist δ (ferriit) \rightarrow γ (austeniit). Toatemperatuuril on austeniitne struktuur, mida näitas ka XRD analüüs. Aeglane jahtumine põhjustab keemiliste elementide segregatsiooni. Seda võib ära hoida kiirem jahtumine.

Järelduses on soovitatud kasutada madalamat soojussisestust, mis tagab kiirema jahtumise ja mis omakorda hoiab ära elementide segregatsiooni.

Super Duplex-il SEM- ja XRD analüüs avastas, et makrostruktuuris on kokkusulamatus juureõmblusel, mis viitab poorsusele ja kõrgele hapniku sisaldusele. XRD analüüs näitas, et põhimaterjal ja keemisõmbluses on võrdne kodus ferriiti ja austeniiti ning nende kogused vastavad ka tingimustele. Mingeid teisi faase ei ole leitud. Järelduses on soovitatud kasutada suuremat soojussisestust juureõmbluse keevitamisel, et tagada piisav kokkusulamine.

Lisaks uuringuks poorsuse põhjuse väljaselgitamiseks oli keevitatud lisakatsekehad, kus varasem kombineeritud keevitusprotsess 131 ja 121 ehk 135 ja 131 oli jagatud eraldi protsessiks ning kasutatud keevitamiseks. Mittepurustav kontroll röntgenkatse näitas, et poorsus tuleb keevitusprotsessist 131 ja 135, aga purustav kontroll tuleb teha tulevastes uuringutes, et välja selgitada, miks keevitusprotsessides 131 ja 135 tekib poorsust.

Antud uurimistöö tulemused ei soovi kasutada kombineeritud keevitusprotsessid kombinatsioonis 131+121 ehk 135+121 ettevõttes ESTANC AS enne tekitava praagi täieliku põhjuse väljaselgitamist.

Antud uurimistöö lõpliku lahendamiseks tulevikus võib aidata eritarkvara ThermoCalc, mis on ettenähtud faaside diagrammide arvutamiseks sealhulgas faasi kineetika simulatsiooni ehk simuleerida erinevaid muutmisi.

2.6 SUMMARY, CONCLUSION AND FUTURE DEVELOPMENT

The main focus of this research is to consider two high alloyed stainless steels and their possible or existing welding technology solutions at ESTANC AS. It was also important to look at recommendations by world's manufacturers-leaders in metallurgical and welding consumable production industries and to conduct the necessary test welding. Analysis of welding consumables, including production tests to find the right welding parameters in the company, showed that the recommended welding parameters from welding consumable manufacturers are approximately +/- 15% and can be used to any wire brand using welding process 131 (MIG), 135 (MAG) and 121 (SAW) and shielding gas Ar99.9% and Ar + 2% CO₂ depending on the

welded base material brand 254 SMO (EN No 1.4547) or Super Duplex (EN No 1.4410).

Analysis of the chemical composition of the welding consumables showed a small difference of about 10% between the different wire.

In practical part and for research purposes were welded 30 plates in three thickness ranges - 5, 8 and 10 mm, which are the most widely used in the company. The 254 SMO base material is welded using a combined welding process – for the root 131 and for filling 121 using Ar99.9% shielding gas, but Super Duplex 5 mm is welded with another welding process - 135 and shielding gas Ar + 2% CO₂. All selected welding parameters are the same.

For non-destructive testing (NDT) is used two testing methods - X-ray (RT) and Penetrant (PT). X-rays on the main specimens found 2 main defects - porosity and hot cracking in the center of the weld seam, which is typical defect characteristic of 254 SMO (EN no. 1.4547) and Super Duplex (EN no. 1.4410) at inspection of main defects. Penetrant test also found a crack in the middle of the weld seam. In total, 70% of the main test specimens from 254 SMOs and 50% of the Super Duplex contain defects that are not permitted according to EN ISO 5817 (Class B). The remainder of the test specimens have been sent to destructive laboratory, where occur the required destructive tests in according to requirements of standard EN ISO 15614-1, which uses for the certification of welding technology.

The results of the bending test are showed that the plates made from 254 SMO base material with a thickness of 5 mm had successfully passed the test, but 8 and 10 mm were broken during the testing, which was not allowed. The initial possible cause may be the fragile structure of the base material.

Super Duplex test specimens have been bend tested only for thicknesses of 8 and 10 mm, which have been successful. The bending test is not proved unsuccessful for thickness of 5 mm because the initially given test specimen was cracked by inside the seam, as previously demonstrated by a non-destructive X-ray test. For more detailed examination was done macroexamination, which is showed a defect No 401 – lack of fusion (acc. to EN ISO 5817, class B) and its size at a 0.8 mm root seam, which is not allowed.

Parts of test specimens including 5 mm (Super Duplex) and 8 and 10 mm (254SMO) have not passed the bend test, then were sent for SEM and XRD analysis to determine the cause of the possible fragile structure that Shaeffler DeLong warns in front of the chart.

At 254SMO, SEM and XRD analysis found that weld has failure at bend test from the main weld, root of the weld has no issues. XRD analysis show one austenitic phase at parent material and main weld. Ductile failure area (dimple) at root has uniform

chemical composition with less Nb-Mo segregation (Nb 3,41% and Mo 8,52%) and ductile failure area at main weld is similar (Nb 2,35% and Mo 7,9%). Brittle failure area (Nb 12,81% and Mo 14,34%) with liquid solidification cracking area (Nb 7,08 and Mo 11,24%) has higher Nb and Mo content compared with ductile areas. Liquid solidification cracking area has additionally Nb micro segregation areas that is most likely over the weld because of solidification nature (Nb 11% and 4 %). Micro segregation nature is caused by solidification process Liquid \rightarrow γ (austenite)+ δ (ferrite). After solidification δ (ferrite) \rightarrow γ (austenite). Final structure at room temperature is austenite like X-ray analysis show. Slow cooling from solid state causes segregation and micro-segregation. Faster cooling can avoid the issue. In conclusion is recommended to use lower heat impute to increase cooling speed to avoid segregation in weld at solid state.

At Super Duplex, SEM and XRD analysis found that Macrostructure show lack of fusion at root weld. SEM and EDS analysis from lack of fusion area show porosity and high oxygen content.

XRD analysis shows that weld and parent material have similar amount of ferrite and austenite content. Other phases were not found. Phase content of weld is according to requirement. In conclusion is recommended to use higher root weld heat impute to assure melting of parent material at root.

In addition to the study to determine the cause of porosity were welded additional specimens, where the former combined welding process 131 and 121, i.e. 135 and 131, was divided into a separate process and used for welding.

The non-destructive control by X-ray test (RT) showed that the porosity comes from the welding process 131 and 135, but the destructive control must be done in future for study to find out, why porosity occurs in the welding processes 131 and 135.

The results of this study do not recommend the use of combined welding processes in combination 131 + 121 or 135 + 121 at ESTANC AS until the full cause of the generating defect has been identified.

Special software ThermoCalc, which is designed to calculate phase diagrams, including simulation of phase kinetics, that is to simulate different changes, may help in the final settlement of this research in the future.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Surveseadme tootja ESTANC AS, (28.12.2019) [Online].
<https://www.estanc.ee>
- [2] Erimaterjalide tootja Heanjia Super Metals Co., Ltd
<https://super-metals.com/applications/suitable-materials-for-pressure-vessels/>
- [3] Outokumpu OY, Handbook of Stainless Steel, (28.12.2019) [Online].
<https://www.outokumpu.com>
- [4] Roostevaba teraste tootja Sandvik AB, (28.12.2019) [Online].
<https://www.materials.sandvik/en/>
- [5] Sandvik AB, Online Welding Handbook, (28.12.2019) [Online].
<https://www.materials.sandvik/en/>
- [6] Keevituslisamaterjalide tootja ESAB, (28.12.2019) [Online].
<https://esab-online.esab.eu>
- [7] ELi surveseadme direktiiv (PED), (28.12.2019) [Online].
<https://ec.europa.eu/docsroom/documents/33402/attachments/1/translations/en/renditions/native>
- [8] EV surveseadme ohutuse seadus, (28.12.2019) [Online].
<https://www.riigiteataja.ee/akt/748803>
- [9] Surveseadmete vastavushindamise, keevitusprotseduuri- ja keevitaja atesteerise vastavushindmisausutus Inspecta Estonia OÜ
<https://www.kiwa.com/ee/et/teenuse-liigid/surveseadmete-vastavushindamine/>
- [10] EVS EN ISO 4063:2010 Keevitus ja külgnevad protsessid. Protsesside nomenklatuur ja viitenumbriid
- [11] M. R. Nezamdost, Mohammadreza Nekouie Esfahani, S. H. Hashemi, Seyed Abdollah Mirbozorgi, Investigation of temperature and residual stresses field of submerged arc welding by finite element method and experiments, 2016
- [12] Keevitusseadme ja tootmise automatiseerimise tootja Pemamek OY.
<https://pemamek.com>
- [13] Keevituse robotite tootja RobotWorx a Scott company
<https://www.robots.com/articles/advantages-and-limitations-of-submerged-arc-welding>
- [14] Online welding information resource Tool FAQs
<https://toolfaqs.com/flux-core-welding-vs-mig/>
- [15] Interesting engineering online science magazine
<https://interestingengineering.com/types-of-welding-their-applications-advantages-and-disadvantages>
- [16] Keevitusseadme ja lisamaterjalide tootja SAF-PRO, (28.12.2019) [Online].
<https://www.saf-fro.com>
- [17] Sheet metalworking service
<https://www.rime.de/en/welding/mag-welding/>
- [18] Keevitusseadme ja lisamaterjalide tootja EWM AG, Welding Dictionary, (28.12.2019) [Online].
<https://www.ewm-group.com/en/>
- [19] Lincoln Electric, Gas Metal Arc Welding, 2014.

- [20]Online welding information resource FMA Communications, Inc.
<https://www.thefabricator.com>
- [21]Keevituslisamaterjalide tootja Dratec GMBH, (28.12.2019) [Online].
<http://dratec.de>
- [22]Keevitusseadme ja lisamaterjalide tootja Lincoln Electric, (28.12.2019) [Online].
<https://www.lincolnelectric.com>
- [23]Lisamaterjalide tootja Elga. [Online]
<https://www.elga.se>
- [24]International molybdenum association IMOA science information online resource
<https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainlesssteel.php>
- [25]Sõltumatu teadusuuringute ja tehnoloogia organisatsioon TWI Ltd., (28.12.2019) [Online].
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-imperfections-in-welds-porosity-042>
- [26]Sõltumatu teadusuuringute ja tehnoloogia organisatsioon TWI Ltd., (28.12.2019) [Online].
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-hot-cracking-solidification-cracking>
- [27]Dissimilar Materials Weldability Concepts, Dr. Albek Sadek, EWI Company, 12.15.2015.
https://ewi.org/wp-content/uploads/2016/01/Dissimilar-Metal-Weldability-Concepts_Alber-Sadek.pdf
- [28]EVS EN ISO 6947:2019 Keevitus ja külgnevad protsessid. Keevitusasendid
- [29]EVS-EN ISO 15614-1:2017 Metallide keevitusprotseduuride spetsifitseerimine ja kvalifitseerimine. Keevitusprotseduuri katse. Osa 1: Teraste kaar- ja gaaskeevitus ning nikli ja niklisulamite kaarkeevitus
- [30]EVS-EN ISO 9692-1:2014 Keevitus ja külgnevad protsessid. Liidete ettevalmistamise viisid. Osa 1: Terase käsikaarkeevitus, kaarkeevitus kaitsegaasis, gaaskeevitus, TIG-keevitus ja terase kiirguskeevitus
- [31]EVS-EN 13445-4:2014+A1:2016 Leekkuumutusega surveanumad. Osa 4: Valmistamine
- [32]EVS-EN ISO 17637:2016 Keevisõmbluste mittepurustav kontroll. Sulakeevitusliidete visuaalne kontroll
- [33]EVS-EN ISO 17636-1:2013 Keevisõmbluste mittepurustav kontroll. Radiograafilise katsetamine. Osa 1: Röntgen- ja gammakiirgustehnikad filmi kasutamise
- [34]EVS-EN ISO 17636-2:2013 Non-destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors (ISO 17636-2:2013)
- [35]EVS-EN ISO 17640:2017 Keevisõmbluste mittepurustav katsetamine. Ultraheliga katsetamine. Meetodid, katsetasemed ja hindamine
- [36]EVS-EN ISO 3452-1:2013 Mittepurustavad katsed. Kapillaarkatse. Osa 1: Üldpõhimõtted
- [37]EVS-EN ISO 17638:2016 Keevisõmbluste mittepurustav katsetamine.
 Magnetpulberkatsetamine
- [38]EVS-EN ISO 4136:2011 Metalsete materjalide keevisõmbluste purustav katsetamine. Ristsuunalised (põiksuunalised) tõmbekatsed (ISO 4136:2001)
- [39]EVS-EN ISO 5173:2010 Metalsete materjalide keevisõmbluste purustav katsetamine.
 Paindekatsed
- [40]EVS-EN ISO 17639:2013 Metalsete materjalide keevisõmbluste purustav katsetamine.
 Keevisõmbluste makroskoopiline ja mikroskoopiline uuring

- [41]EVS-EN ISO 9016:2012 Metalsete materjalide keevisliidete purustav katsetamine. Löökpaindekatsed. Katsekehade asukoht, soone asend ja uurimine
- [42]EVS-EN ISO 9015-1:2011 Metalsete materjalide keevisõmbluste purustav katsetamine. Kõvaduse määramine. Osa 1: Kaarkeevitatud keevisliite kõvaduskatse
- [43]EVS-EN ISO 5817:2014 Keevitus. Terase, nikli, titaani ja nende sulamite sulakeevitusliited (välja arvatud kiiruskeevituse meetodid). Kvaliteeditasemed keevitusdefektide järgi
- [44]EVS-EN ISO 17635:2016 Keevisõmbluste mittepurustav katsetamine. Üldjuhised metalsete materjalide kohta
- [45]ISO/TR 18491:2015 Welding and allied processes -- Guidelines for measurement of welding energies
- [46]ISO/TR 17671-1:2002 Welding -- Recommendations for welding of metallic materials -- Part 1: General guidance for arc welding
- [47]ISO/TR 18491:2015 Welding and allied processes -- Guidelines for measurement of welding energies
- [48]Test report 880-19, Tallinna Tehnikaülikool, 23.12.2019.
- [49]Test report 881-19, Tallinna Tehnikaülikool, 23.12.2019.
- [50]Eesti standardikeskus. [Online]
<https://www.evs.ee>
- [51]Õppekorralduse eeskiri. [Online]
https://www.ttu.ee/public/t/tudengile/oppeinfo/TT_OKE_010817.pdf (12.06.2019)
- [52]Õpingute lõpetamise eeskiri. [Online]
https://www.ttu.ee/public/t/tudengile/oppeinfo/juhendid/TT_opingute_lopetamise_eeskiri.pdf (12.06.2019)
- [53]Lõputööde avalikustamise ja säilitamise kord. [Online]
<https://www.ttu.ee/public/i/Inseneriteaduskond/Tudengile/Kaskkiri60.pdf> (12.06.2019)
https://www.ttu.ee/public/i/Inseneriteaduskond/dekanaat/TT_loputoo_avalik_EN.pdf (12.06.2019, in English).
- [54]Viitamine / Reference list. Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu kodulehekül. [Online]
https://www.ttu.ee/public/r/raamatukogu/Viitamise_juhend_2019.pdf (12.06.2019)
- [55]Kirjalike tööde vormistamine. Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu kodulehekül. [Online] <https://www.ttu.ee/asutused/raamatukogu/tudengile-4/kirjalike-toode-vormistamine/> (12.06.2019)
- [56]Keevituse ja keevitamise terminoloogia eesti-inglise-vene keeles, Mehaanikateaduskond, Materjalitehnika instituut, Tallinna Tehnikaülikooli kodulehekül. [Online]
https://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/Materjalitehnika_instituut/Teadus-ja_arendustoo/terminoloogia/keevitus_02.11.2011.pdf
- [57]Materjalitehnika seletav sõnaraamat eesti-inglise-vene keeles, Mehaanikateaduskond, Materjalitehnika instituut, Tallinna Tehnikaülikooli kodulehekül. [Online]
https://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/Materjalitehnika_instituut/Materjalitehnika_seletav_sonaraamat.pdf
- [58]Mehaanikainseneri käsiraamat / üldtoimetaja P. Kulu. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2012.

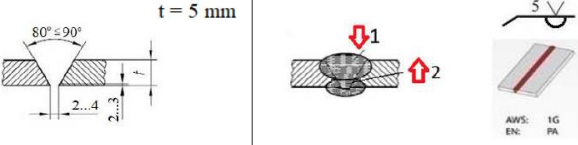
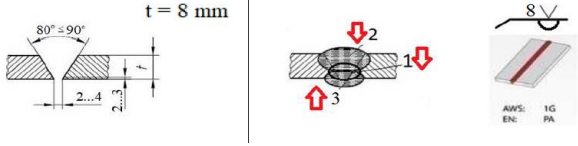
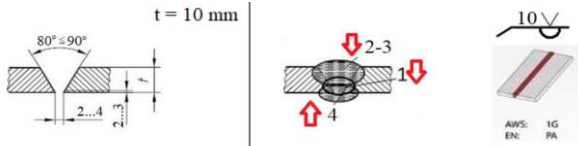
LISAD

Lisa 1. Tabel 2.1 Põhikatsekehade materjalid, paksused ja keevituse parameetrid.

Lisa 2. Tabel 2.2 Põhikatsekehade materjalid, paksused ja keevituse parameetrid.

Lisa 1. Tabel 2.2 Põhikattekehade materjalid, paksused ja keevituse parameetrid [1].

Põhikatsed:						
Katse Nr	Materjali mark	Paksus t, mm	Kooste- ja keevitusliite eskiis ja õmbluse tähistus	Keevituse lisamaterjal	Keevituse protsess	Soojusisestus, kJ/mm
pWPS257_A,_D,_G	254 SMO	5		EN ISO 18274: S Ni 6625	131/121/121	131: 0,26 / 121: 0,48-0,90
pWPS257_B,_E,_H		8				131: 0,54 / 121: 0,95-1,45
pWPS257_C,_F,_I		10				131: 0,65 / 121: 1,2-1,49

pWPS258_J,_M	Super Duplex	5		EN ISO 14343-A: S 25 9 4 N L	135/121	135: 0,42 / 121: 0,89
pWPS258_K,_N		8			131/121/121	131: 0,83 / 121: 1,42- 1,45
pWPS258_L,_O		10			131/121/121	131: 0,72 / 121: 1,34- 1,49

Lisa 2. Tabel 2.3 Lisakatsekehade materjalid, paksused ja keevituse parameetrid [1].

Lisakatsed:						
Katse Nr	Materjali mark	Paksus t, mm	Kooste- ja keevitusliite eskiis ja õmbluse tähistus	Keevituse lisamaterjal	Keevituse protsess	Soojusisestus, kJ/mm
pWPS258_1A	Super Duplex	5		EN ISO 14343-A: S 25 9 4 N L	135	0,41
pWPS258_1B		5			135	0,34
pWPS258_2A		8			121	1,40-1,49
pWPS258_2B		8			121	1,49
pWPS258_2C		8			121	1,21