

Tallinna Tehnikaülikool
Mehaanika ja tööstustehnika instituut
Eesti Keesitusühing

Keesitustehnoloogia -2

Laiendatud loengukonspekt MTT0090

Andres Laansoo

Tallinn

2021

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Keevitustootmise tehnilis-majanduslik analüüs	5
2. Keevitustehnoloogia põhimõisteid	8
3. Keevisliidete tüübid ja tähistamine joonistel	13
4. Kaarkeevituse põhiprotsessid	31
4.1 Käsikaarkeevitus	31
4.2 TIG-keevitus.....	34
4.3 MIG/MAG-keevitus	37
5. Erinevate metallide keevitatatavus	53
5.1 Keevitamise termotsüklid ja soojuslevi	53
5.2 Materjalide keevitatavus ja kriteeriumid.....	56
5.3 Roostevaba terase keevitamine.....	61
5.4 Alumiinumi keevitamine	76
6. Keevisliidete katsetamine ja keevitustööde korraldamine	88
7. Keevistoodete valmistamine ja kvaliteedi tagamine	96
7.1 Keevitus kui eriprotsess ja kvaliteedisüsteemi põhielemendid.....	96
7.2 Keevituskordinaatori ülesanded.....	97
7.3 Keevitaja kvalifitseerimine (sertifitseerimine).....	98
7.4 WPS-i koostamine ja kvalifitseerimine, WPQR-i roll.....	100
8. Ehituslike keeviskonstruktsioonide valmistamine ja katsetamine.....	105
9. Leekkuumutuseta surveanumate valmistamine ja katsetamine.....	110
Kirjandus.....	114

Sissejuhatus

Käesolev trükis ja E-materjal on mõeldud aine MTT0090 „Keevitustehnoloogia“ laiendatud konspektina nii päevase kui ka sessioonõppe üliõpilastele.

Keevitustehnoloogia-2 kursus käsitleb põhiliselt keevitusinseneri tegevusvaldkonda, et olla kursis tootmise käigus tekkivate võimalike probleemidega, nende tekkimise teoreetiliste alustega ja vältimise meetmetega. Tänapäeva tootmises on tähtsal kohal majanduslik efektiivsus ja kvaliteedi tagamine, millele on pööratud suuremat tähelepanu. Keevitustootmises on paljud aspektid reglementeeritud ja nõuded on toodud vastavates standardites, aga ka tootestandardites. Keevitustandardeid uuendatakse pidevalt, nt minnakse üle ISO standarditele, mistõttu varasemas kirjanduses toodud materjal võib olla juba vananenud. Autor on üritanud tuua kõige uuemate standardite väljaannete seisukohti. Palju soovituslikku materjali on toodud teraste, keevitusmaterjalide ja seadmete tootjate poolt internetis. Kättesaadav ingliskeelne kirjandus on põhiliselt USA-s välja antud, mistõttu seal levinud erinevad Euroopast terminid ja lähenemised võivad raskendada probleemide mõistmist ja nõudmisi tootmisprotsessile. Keevistoodete valmistamisel on tähtsal kohal toodete vastavushindamine, mille tarvis on vajalik tootmisprotsessi elementide dokumenteerimine ja kvaliteedisüsteemide evitamine.

Antud trükis on jätkuks 2010. a TTÜ kirjastuse poolt üllitatud õppematerjalile „Keevitustehnoloogia“, kuid on täiendatud eriteraste, roostevaba terase ja alumiiniumi keevitamise tehnoloogia erisustega, samuti keevisliidete katsetamise põhialustega. Keevitustootmises nõuakse eriliste kvaliteedistandardite järgimist ja valmistusprotsessi identifitseeritavust ja jälgitavust, mida on kirjeldatud 2 tooterühma-ehituslike metallkonstruktsioonide ja leekkuumutuseta surveanumate valmistamise näidetega.

Toodud materjal võib huvi pakkuda tootearendajatele ja konstruktoritele, aga ka ettevõtete keevitusinseneridele. Autor on tänulik IWE Toomas Rehale ja IWT Harri Veskimestrile nõuannetega käsikirja koostamisel ja Dr Mart Kolnesele graafilise materjali vormistamise eest.

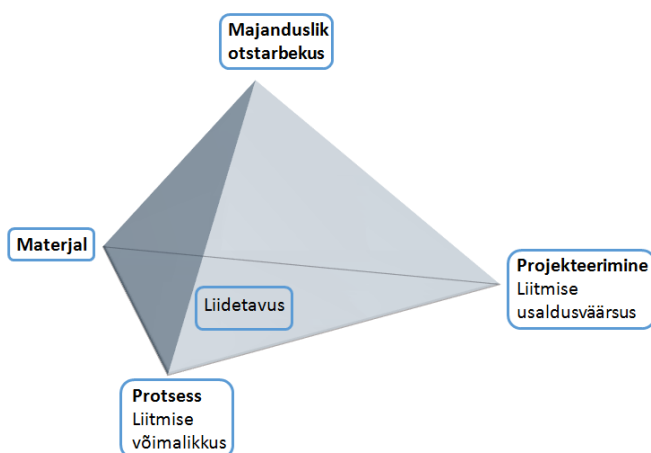
1. Keevitustoodete valmistamise tehnilis-majanduslik analüüs

Liitmisprotsessi valikul on vaja lahendada konfliktsituatsioon (tegelikult koordineerida) joonisel 1.1 toodud tegurite vahel. Kõige tähtsam on tagada tootmise majanduslik otstarbekus-efektiivsus, mis seisneb:

- hind (valmistuskulud) on konkurentsivõimeline;
 - kvaliteet tagatud;
 - etteantud ajalimiit ehk ajaressurs on jõukohane.
- Tegurite vastastikust koosmõju seisneb järgmises:

1. Keevitatud komponendi geomeetrisel kujul määrab jämedalt lähenedes tema otstarve. Koos kasutamisel rakenduvate jõududega määratakse jõud ja pinged, mis tuleb üle kanda liite poolt erinevates kasutamise tingimustes, määrates nii nõuded materjalile. Tuleb arvestada keevisliidete pingelolukorraga, pingete tasemega, kasutustemperatuuriga jm.
2. Liitmisprotsess seab piirangud projekteerimisele. Hea ligipääsetavus liitele jätab palju vabadusastmeid nii tava- kui ka automaattöötlemisele, robotkeevitusele ja lõppkokkuvõttes protsessi usaldusväärsusele ja kvaliteedile.
3. Liitmisprotsesse ei saa rakendada automaatselt kõigile materjalidele (vt keevitatus). Liitmisprotsessi tagajärjel võivad negatiivselt muutuda materjali omadused-nt mehaanilised omadused, korrosioonikindlus. See asjaolu võib piirata materjalide valikut.
4. Komponenti geomeetria ja keevitusprotsessile tuleb seada rajatingimused kuumutamise kontrollile (nt vältida materjali ülekuumutust), mis on eeltingimusteks materjali valikul ja tema eriliste omaduste säilimiseks.
5. Piisav keevitatus e liidetavus võib sageli olla saavutatud kui korduv protsess, mis on kirjeldatud ühisosa otsimise võimaluste leidmisega liitmise sobivuse, usaldusväärsuse ja võimalikkuse osas ja mis viib sageli enama kui ühe tehnilise lahenduse leidmiseni kindla liitmisülesande lahendamiseks.

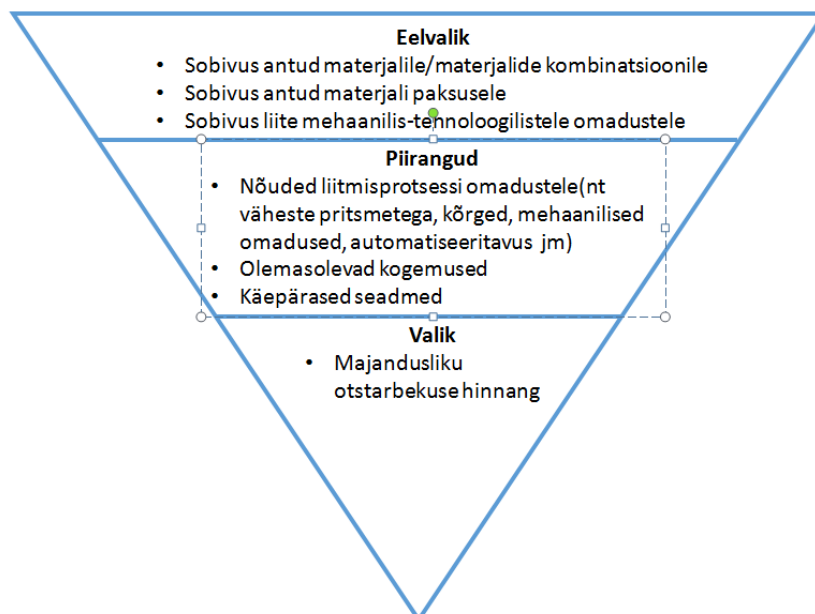
Optimaalse lahenduse leidmisel tuleb lisaks tehnoloogilised kaalutlused allutada **majanduslikule otstarbekusele** e toote hinnale.



Joon.1.1 Liitmisprotsessi valikut mõjutavad tegurid

Omatoodete projekteerimisel peab konstruktor arvestama järgmiste teguritega:

1. Ette nägema ja dokumenteerima tehniliselt ja majanduslikult põhjendatud nõuded keevisliidete kvaliteedile defektide järgi - kas tase B, C , D ISO 5817 järgi. Taseme B saavutamine on kallim kui taseme C saavutamine.
 2. Joonistel esitada nõuded keevistoote joonmõõtmete, kujuhälvete, tasapinnalisuse, sirgsuse jm tolerantside osas. Arvestada tuleb asjaoluga, et alati kaasnevad sulakeevitusega toote kujuhälbed e keevitusdeformatsioonid ja detailide mõõtmete vähenemine. Rangemad nõuded vajavad sageli keevistoodete mõõtu töötlemist, eraldi operatsioone toote termiliseks õgvendamiseks.
 3. Vältida nurkõmbeluste üledimensioneerimist, kasutades täpsemaid arvutusmetoodikaid. Suurema paksusega nurkõmbeluse keevitamiseks kulub rohkem keevituse lisamaterjali e elektroodi, mis tõstab kulusid.
 4. Majanduslikult ja võimalusel eelistada nurkõmbelusi pökkõmbelustele, kuna paksema materjali korral tuleb pökkõmbelustel detailide servad faasida, mis nõuab lisakulutusi.
 5. Õmbeluste mittepurustava katsetamise meetodi valik sõltub suurel määral õmbeluse tüübist. Tuleb ette anda keevisliidete mittepurustava katsetamise (NDT) meetodid ja ulatus % õmbeluste koguarvust. Mida suurem katsetamise ulatus e maht, seda suuremad kulud ja kõrgem toote hind.
 6. Arvestada ligipääsetavusega keevitamiseks ja katsetamiseks, eriti robotiseerimise võimalust silmas pidades.
 7. Arvesse võtta, et alumiiniumi keevitamisel võivad metalli mehaanilised omadused alaneda kuni 30%.
 8. Arvestada konstrueerimisel toote eksploateerimistingimustega-korrosiooni risk, koormuse liik, kas korrodeeruv vedelik võib sattuda detailide vahelisse õhupilusse. Roostevaba terase korral näha ette meetmed ja kulutused keevisliidete järeltötluseks, nt passiveerimiseks.
- Liitmisprotsessi valikut kirjeldab joon 1.2.



Joon. 1.2 Keevitusprotsessi valiku protseduur

Reeglina konstruktor ei anna ette keevitusprotsessi, kuid võib piirata mõne protsessi kasutamist.

Metallkonstruktsioonide valmistamisel kasutatakse kaarkeevituse protsesse, põhiliselt **MIG/MAG-keevitust** ehk keevitamist poolautomaadiga.

Iga projekti käigus tuleb hinnata valmistuskulusid ja otsida võimalusi nende kontrolli all hoidmiseks või isegi vähendamiseks.

Keevistoote valmistuskulud moodustuvad **püsikuludest** ja **jooksvatest kuludest** toote kohta.

Püsikulud on seotud olemasolevate seadmete amortisatsioonikuludega, hoolduskuludega ja uutesse seadmetesse investeerimise kuludega.

Tähtsal kohal on tootmisprogramm e toodete arv, mis määrab püsikulud ühe tooteühiku kohta. Kulud tooteühiku kohta sõltuvad sellest, kas on tegemist üksiktootmise või seeriatootmisega.

Suured toodete kogused õigustavad suuri investeeringuid seadmetesse, nende paigaldusse, rakistesse, eriti kui nad on amortiseerunud, vähendades nii jooksvaid kulutusi (koosnevad materjali ja töötlemise kuludest ühe tooteühiku kohta) sellisel määral, mis mõjutab alati majanduslikku eelistatust.

Vastandina sellele, väikesed kogused või isegi üksiktootmine unikaalsetel seadmetel tingib suuri amortisatsioonikulusid. Sageli toodetakse keeviskonstruktsioone väiksemate kuludega universaalsete seadmetega ja kõrgemate tööjõu kuludega.

Paigaldatud seadmete püsikulud ja uue seadmestiku kulud

Liitmisprotsessi valik määrab, milliseid olemasolevaid seadmeid, uusi seadmeid ja rakiseid on vaja antud projekti teostamiseks. Tuleb arvesse võtta mitte ainult tehnoloogilisi aspekte, vaid ka ettevõtte võimekust, et kas on võimalik kasutada olemasolevaid seadmeid ja seadmestikku (seade+paigaldus), mille kasutamise kogemusi on. Analüüsitakse, kas ettevõttel on vabu võimsusi ja kas on vaja uusi investeeringuid või on vaja tellida töid väljastpoolt. Tootmisprotsessi planeerimisel tuleb arvestada etteantud ajalimiidiga.

Jooksvad kulud sisaldavad kulusid detailide ettevalmistuseks (lõikamine, faasimine jm), keevitamiseks, katsetamiseks, värvimiseks jm. Näiteks robotkeevitusel nõutakse täpsemaid toorikuid, mis valmistatud kas vesijugalõikusega või laserlõikusega, seejuures detailid tuleb täpsemalt koostada ja positsioneerida, seda kallimad on rakised ja sensorid -see kõik tõstab kulusid.

Kulud tootmise ettevalmistuseks sisaldavad kulusid keevitusprotseduuride (WPS) koostamiseks ja nende katseliseks heakskiiduks.

Tööjõukulud keevitamisel sõltuvad materjali paksusest, liite tüübist, keevitusasendist, keevitustootlikkusest, keevitaja kvalifikatsioonist jm. Tuleb hinnata keevitajate vajadust ja nende kogemusi antud materjali keevitamiseks. Piiranguks on ajalimiit ehk kas ettevõttel on piisav arv kvalifitseeritud keevitajaid - kaaluda tuleb osa tööde andmist väljapoole alltöövõtuna. Võib tekkida vajadus keevitajaid täiendavalt koolitada ja kvalifitseerida vajalike sertifikaatide saamiseks.

Katsetamise kulud sõltuvad projektist ja sageli on vajalik kolmanda osapoole kaasamine labori näol. Keevitusvigade esinemisel tuleb need parandada ja keevisliited uuesti katsetada, mis seotud täiendavate kuludega. Katsetamise ulatus või maht ei sõltu mitte ainult seadusandja või tellija poolt ette määratuga, vaid suurel määral defektide tõenäosusest ja keevitusprotsessi usaldusväärsusest.

Võimalikke lahendusi tuleb hinnata majandusliku otstarbekuse seisukohalt igal tootmise etapil. Tuleb valida optimaalne lahendus või kompromisslahendus, et toota etteantud omadustega toode vastuvõetava hinnaga. Praktikaks on kujunenud kindlatele tooterühmadele hinnad, nt ehituskonstruktsioonidele võidakse aluseks võtta 1 tonni või kilogrammi hind.

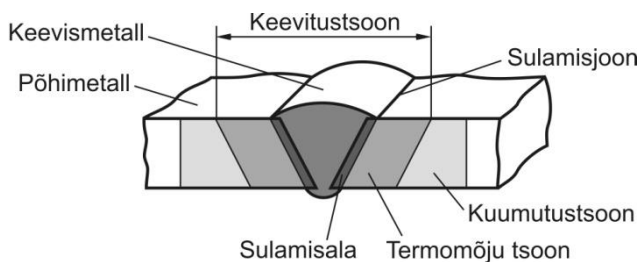
Kokkuvõte

1. Keevistoote konstrueerimisel ja valmistamisel tuleb prioriteetideks lugeda toote kvaliteeti ja tarnetähtaegu, mille üle prevaleerib valmistamise majanduslik otstarbekus e toote hind (valmistuskulud).
2. Projekteerimisel tuleb kulude minimeerimise seisukohalt arvestada ratsionaalsete nõuetega keevisliidete kvaliteedile defektide järgi (kas B,C või D tase), toote mõõtmete ja kuju lubatud hälvetega, mittepurustava katsetamise meetodite (NDT) valiku ja ulatusega. Liiga ranged nõuded tõstavad kulusid. Defektide parandamine ja toodete mehaaniline töötlemine etteantud mõõtu, keevitusdeformatsioonide termiline vähendamine on seotud täiendavate kuludega.
3. Tootmise plaanimisel tuleb arvestada ettevõtte võimekusega valmistada antud keevistoodet: antud materjali rühm, materjali paksus, keevitusprotsessid) ja ressurssidega: piisav arv seadmeid, piisav arv kvalifitseeritud keevitajaid, ettekuumutuse seadmete kättesaadavus, aga ka eelneva tootmiskogemusega antud materjalirühma keevitamisel. Täiendavate investeeringute tegemisel seadmetesse tuleb arvestada tootmisprogrammiga.
4. Projekteerimisel võimalusel eelistada nurkõmbelusi põkkõmbelustele. Tuleb arvestada asjaoluga, et keevituskuumuse tagajärjel võivad alaneda materjali mehaanilised omadused, eriti Al korral.
5. Hinnata, kas on ettevõttel piisav arv keevitajaid antud projekti tootmiseks või tuleb osa töid anda teise ettevõttesse allhankesse. Hinnata allhanketöö riske ja arvestada, et allhankija töötab peatöövõtja vastutusel.
6. Roostevaba terase ja Al keevitamisel arvestada nende materjalide iseärasustega ladustamisel, seadmete valikul, suuremate keevitusdeformatsioonide ja kahanemisega keevitamisel, valmistamine peab toimuma eraldi süsinikteraste keevitamise ruumidest jm.
7. Kõrgtugevate teraste ja roostevaba terase keevitamisel tuleb rangelt järgida keevitusprotseduure ja kasutada kogunud keevitajaid, mis suurendab jooksvaid kulusid.
8. Seadmete valikul tuleb arvestada keevitatava materjali paksusega. Paksema materjali keevitamiseks on vaja kasutada võimsamaid ja kallimaid vooluallikaid, mis võimaldavad saada suuremat keevitusvoolu tugevust.

2. Keevitustehnoloogia põhimõisteid

Keevitamine (*welding*) on kahele või enamale toote osale jätkuva kuju andmine kasutades kuumutamist või survet. Saadakse kinnisliide ehk püsiliide. On ka teisi määratlusi.

Keevisliide=keevitustsoon = keevisõmbelus (keevismetall) + termomõjutsoon (TMT, HAZ).



Joon. 2.1 Keevisliite osad

Põhilist huvi tunneme TMT-HAZ vastu-seal esinevad struktuuri muutused ja võimalikud praod. Tähtis ala sulamisjoonel-üleminek õmbluselt põhimetallile (toe), mis peab olema sujuv. Sulamisalal võib esineda nt poolautomaatkeevusel servade kokkusulamatuse e liitevea defekt, mis on lubamatu. Eristame põhimaterjali või põhimetalli, lisamaterjali-elektroodi või keevitustraati-viimane määratleb keevismetalli omadused.

Standardõmblused ja mittestandardised õmblused

- põkkõmblus BW-põkkliide , ka siia kuulub läbikeevitatud T-liide;
- nurkõmblus FW, palju liiteid.

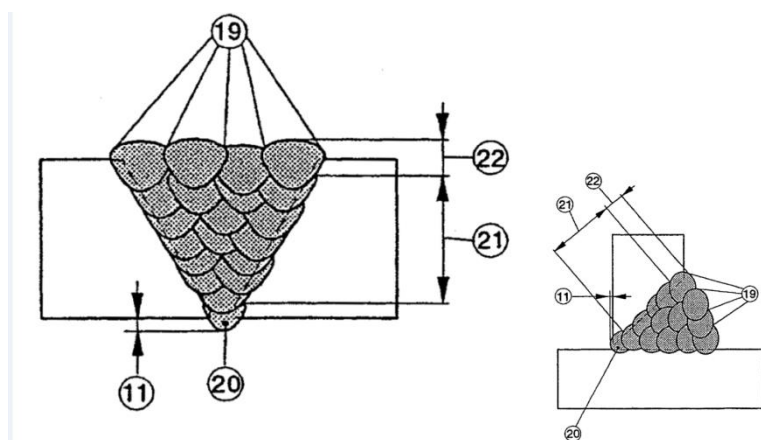
Õmbluse osad (joon. 2.2)

-juur (root)-õmbluse pealispinnast kõige kaugemal asetsev õmbluse osa, Tuleb tagada juure läbikeevitus. Juurelähim (20), faasitud servadega põkkõmbluse korral keevitatakse väiksema võimsusega kaarega, reeglina väiksema I-ga. Nurkõmblustel tuleb läbi keevitada ka juur.

-täitelähim, keeviskiht (21). Kasutatakse suuremat I, keevitatakse n-1 läbimit.

-pinnalähim (19, pinnakiht (22) keevitatakse selliste parameetritega (võivad erineda täitelähimite omast), et tagada ühtlane servade täitmine, madal tugevdus ja sujuv üleminek (toe).

-täielik läbikeevitus, osaline läbikeevitus, õmbluse juur, läbikeevitus, üleminek-üleminekujoon (toe).



Joon. 2.2 Keevisõmbluse osad

Keevitusparameetrid kaarkeevitusel:

- I, U, V,

kus:

I ja U-keevitusvool ja kaare pinge;

V-keevituskiirus, k-keevitusprotsessi kasutegur;

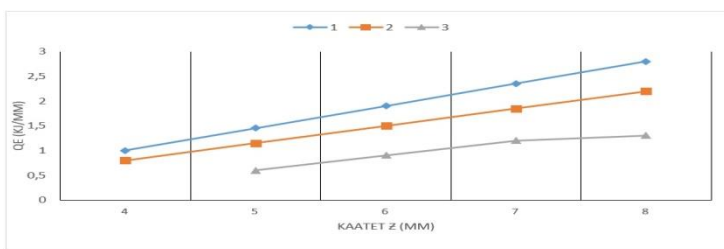
U ja I määravad kaare võimsuse.

Keevituse soojussisestus (sõltub keevituskiirusest ja keevitamise sooritustehnikast) , arvutatakse:

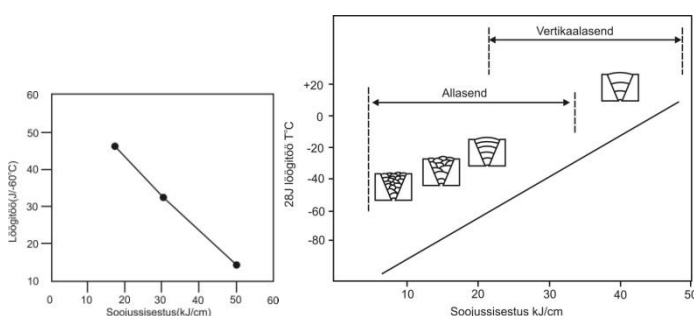
$$Q_e = \frac{k \cdot U \cdot I}{V} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{mm}},$$

Tähtis parameeter kõrgtugevate ja dupleks-roostevabade teraste, Al-sulamite keevitamisel. Seotud keevisläbimi paksusega-mitu läbimit või kihti keevitatakse-paksem läbim, väiksem V ja suurem soojussisestus. Mida rohkem läbimeid keevitada, seda parem liite mikrostruktuur saadakse. Kaarkeevitusel protsessi kasutegur k-protsessid MMA, MAG: k=0,85; TIG-k=0,6. Keevituse soojussisestust saab siduda keevitusasendiga-suurimaks loetakse vertikaalasendit PF ja allasendit PA, väiksemaks horisonaalasendit PC.

Soojussisestust saab leida, mõõtes keevitusparameetrid ja keevitusaja. Käsikaarkeevitusel võimalik määrata nurkõmbuse kaateti (mitte kõrguse) järgi ja plaadi peale keevitatud keevisläbimi pikkuse ROL (run off length) abil (vt EN 1011-2). Mõjutab ka elektroodi läbimõõd.



Joon.2.3 Soojussisestus sõltuvalt nurkõmbuse kaatetist erineva kattega elektroodide kasutamisel: 1-R ja RR kate, väljatulek <110%; 2-B-kate; 3-R ja RR kate, suur väljatulek >130%.



Joon. 2.4 Soojussisestuse mõju löögisitkusele: plaat t=16 mm, käsikaarkeevitus

Keevismetalli keemiline koostise arvutamine

Teoreetiliselt on võimalik arvutada keevismetalli keskmist keemilist koostist, kasutades segunemistegurit. **Segunemistegur või segunemisaste** (dilution): keemiliste elementide sisalduse arvutamine: $m(\gamma) = \frac{\text{sulanud põhismetalli elemendi \%}}{\text{sulanud keevismetalli\%} + \text{sulanud põhismetalli \%}}$. Antakse kas % või suhtena. Põhimõtteliselt näitab põhismetalli elementide ülemineku ulatust keevisõmblusesse.

$$\begin{aligned} \text{segunemisaste}(\gamma) &= \frac{\text{sulanud põhismetalli mass}}{\text{sulanud põhismetalli mass} + \text{sulanud lisametalli mass}} = \\ &= \frac{\text{põhismetalli elemendi sisaldus \%}}{\text{põhismetalli elemendi sisaldus \%} + \text{lisametalli elemendi sisaldus \%}}. \end{aligned}$$

Segunemisaste sõltub liite tüübist ja servade faasimisest ja keevitusprotsessist:

- käsikaarkeevitus: 15-25%;
- MIG-keevitus: 25-40%;
- Impulss-MIG keevitus: 10-20%;
- TIG-keevitus lisamaterjaliga: 20-50%;
- TIG ilma lisamaterjalita: 100%.

Sageli kasutatakse **keevismetalli keemilise koostise arvutamisel üleminekutegurit**, mis arvestab, kui palju lisametalli ehk elektroodi metalli keemilisi elemente läheb üle keevismetalli. Tavaliselt võetakse, et 70% elemente tuleb keevisõmblusesse elektroodist ja 30% põhimaterjalist. Põhiliselt kasutatakse eri tüüpi materjalide (roostevaba+süsinikteras) kokkukeevitamisel.

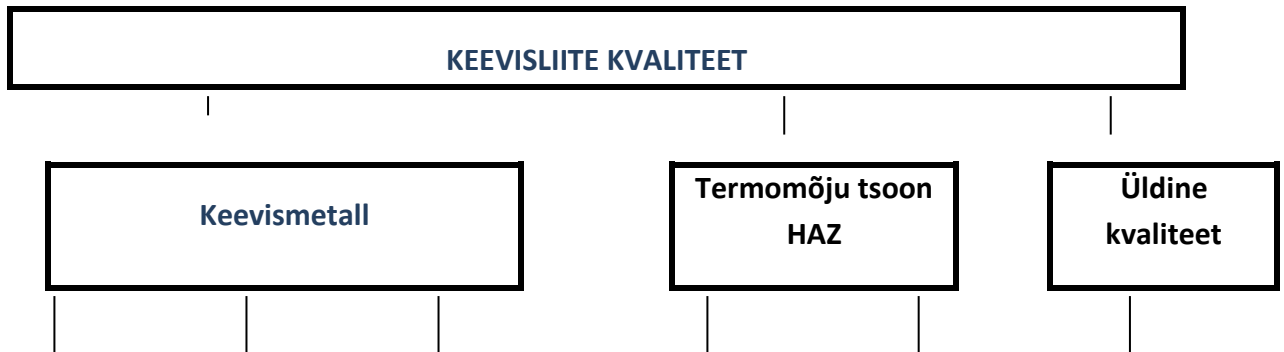
Saab kasutada keevisõmbluse keemiliste elementide sisalduse (K) määramiseks valemiga:

$$K = P_o \cdot \gamma + (1 - \gamma) L_e,$$

kus γ -segunemisaste (põhismetalli osakaal õmblusmetallis) tavaliselt võetakse 0,3 või 30%.

Keevisliite kvaliteedi elemendid

Keevisliite kvaliteeti, mida saab hinnata võimalike defektidega, saab siduda konkreetse keevitusprotsessiga. Näiteks käsikaarkeevitusele on iseloomulikud rübupesad ja gaasipoorid, MAG-keevitusele servade kokkusulamatus (liitevead) ja gaasipoorid.



Keemiline koostis	Mikrostruktuur	Keevise defektid	Mikrostruktuur	Keevitusdefektid	Keevitusdefektid
Lisametall Segunemine põhismetalliga Elementide Väljapõlemine Gaaside absorptsioon Keemilised reaktsioonid: vann/räbu vann/gaas vahel	Keemiline koostis Jahtumiskiirus	Gaasipoorid Kuumpraod Külmpraad- uued terased Lisandid (rübupesad) Kokkusulamatus(põhismetalliga, läbimitega)	Põhismetalli keem. koostis Põhismetalli tarne- tingimused Termotsükkel: tera kasv, sekundaarfaasid	Lamellaarpraod Külmpraad Korduvkuumutuse praod	Projektee rimine Kokkusulamatus Läbi- keevitamatus Geomeetriselised kuju hälbed

Kokkuvõte

1. Keevisliidet tuleb vaadelda kui keti ühte lüli, mille omadused mõjutavad negatiivselt tervet ahelat. Keevisliite olulisemad osad on keevismetall, mille vajalikud mehaanilised omadused tagatakse õige lisamaterjali (elektroodi) valikuga. Keevismetallis võivad esineda räbusuletised, gaasipoorid ja harvem praod (kuumpraod). Keevisliite termomõju tsoon ja selle struktuur ning defektid mängivad olulist rolli liite tugevusomadustele. Vajalik on vältida karastusstruktuuride teket seostatuna külmpingudega, ferriidi tera kasvu ja põhimaterjali ülemäärast kuumutamist (tugevad ja kõrgtugevad terased).

2. Keevitamise üheks tähtsamaks parameetrik tuleb lugeda soojussisestust, mis iseloomustab keevisõmbluse pikkusühiku kohta sisestatud energiahulka. Praktikas iseloomustab soojussisestuse suurust nurkõmbluse paksus või keevituskihi paksus. Soojussisestuse ülemäärasel suurendamisel võib halveneda keevisliite löögisitkus madalatel temperatuuridel.

3. Teoreetiliselt on võimalik arvutada keevismetalli keemilist koostist, võttes arvesse nn segunemistegurit (dilution). Segunemistegurit kasutatakse segaliidete (roostevaba teras, alumiinium) koostise arvutamisel ja keevismetalli struktuuri prognoosimisel.

3. Keevisliidete tüübid ja tähistamine joonistel

3.1 Keevisõmbluste ja -liidete liigitus

Keevisliidete ülesandeks keeviskonstruktsioonides on:

- jõudude ülekanne konstruktsioonis (jõuliited);
- detailide fikseerimine etteantud toote konfiguratsiooni tagamiseks (kinnitusliited);
- koostu jäikuse suurendamine ja läbipainde vältimiseks (sideliited).

Tootearendaja -konstruktor töötab välja keevistoote joonise. Detailid liidetakse omavahel erinevate keevisliidetega mille ülesandeks on jõudude ülekanne konstruktsioonis ehk nn jõuliited, aga ka kinnitatavate detailide fikseerimine etteantud toote konfiguratsiooni tagamiseks (kinnitusliited) aga ka koostu jäikuse suurendamine ja läbipainde vältimiseks (sideliited). Selline liite tüübi hinnang võimaldaks konstruktoril kinnitusliidete korral vähendada kvaliteedinõudeid defektide järgi ja keevituskulusid.

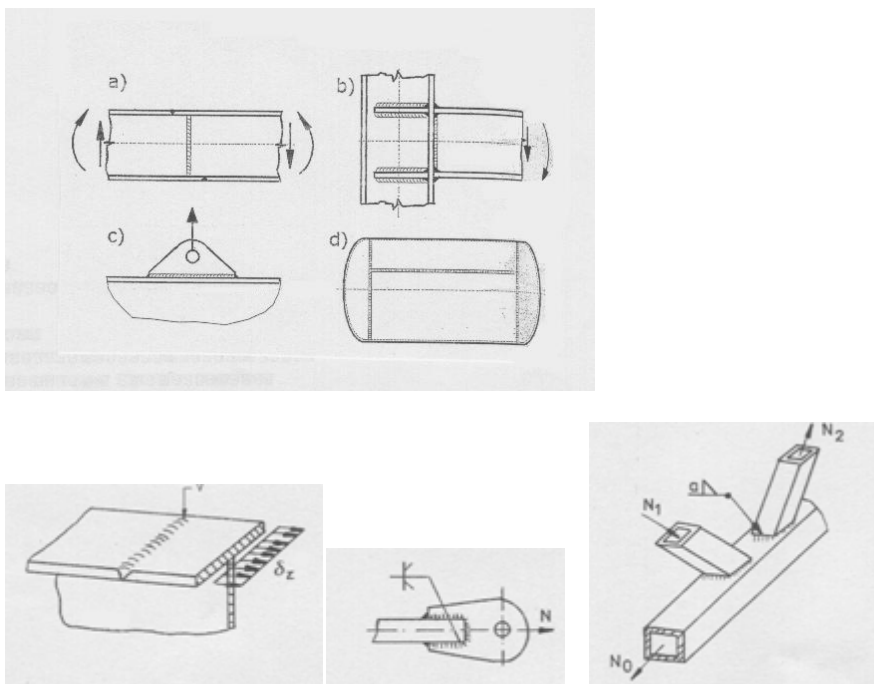
Keevistoodetes kasutatakse põhiliselt põkkõmblusi ja -liiteid (butt weld, tähistus BW) ja nurkõmblusi (fillet weld, tähistus FW)) või nende kombinatsioone. Harvem kasutatakse lokaalseid punktõmblusi (spot welds) jt. Keevisliite projekteerimisel tuleb arvestada rakendatava koormusega-kas staatilised, dünaamilised, väsimuskoormused, keskkonnaga-korrosiooni risk, toote kasutustemperatuuriga,

jõudude rakendussuunaga-risti õmblust, piki õmblust jm. Seejuures tuleb arvestada ka keeviliidete valmistuskuludega-majanduslike teguritega, nt kulutustega liite servade ettevalmistuseks, nt faasimiseks, ligipääsetavusega keevitamiseks ja katsetamiseks.

Keevisliidete liigitus koormuste järgi (levinud Skandinaavia maades).

Jõuliited

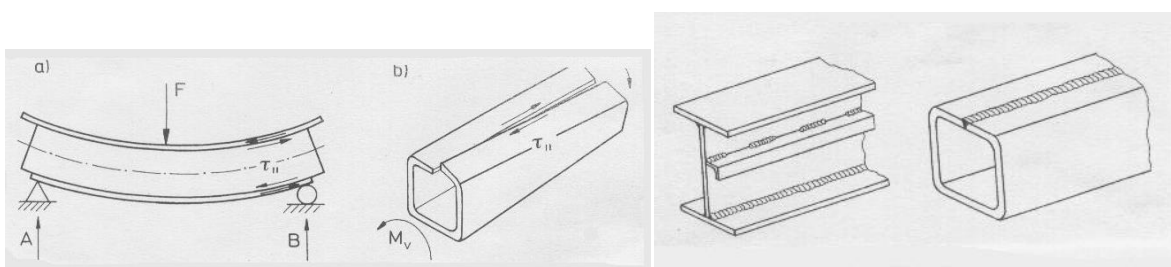
Jõuliited võtavad vastu nii teljesuunalisi kui ka paindemomendist tingitud koormusi. Keevisliite tugevusomadused loetakse võrdtugevaks põhimetalli tugevusega. Sageli valmistatakse läbikeevitatud õmblused faasitud detailide servadega nagu V, X-õmblused.



Joon.3.1 Jõuliidete näiteid

Kinnitusliited

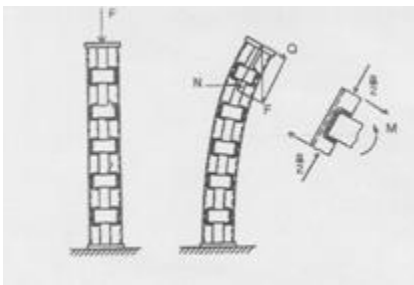
Ühendavad põhiliselt detailid nurkõmblustega (T ja I-talad) staatilistel koormustel. Saab kasutada osaliselt läbikeevitatud õmblusi. Esitatakse madalamaid kvaliteedinõudeid defektide järgi (ISO5817 tase C või D). Harva kasutatakse läbikeevitatud V ja HV õmblusi.



Joon.3.2 Kinnitusliidete näiteid.

Sideliited

Annavad konstruktsioonile jäikuse ja väldivad osade omavahelist liikumist (side ja jäikuslapid), U-profiilid kokku



Joon.3.3 Sideliited

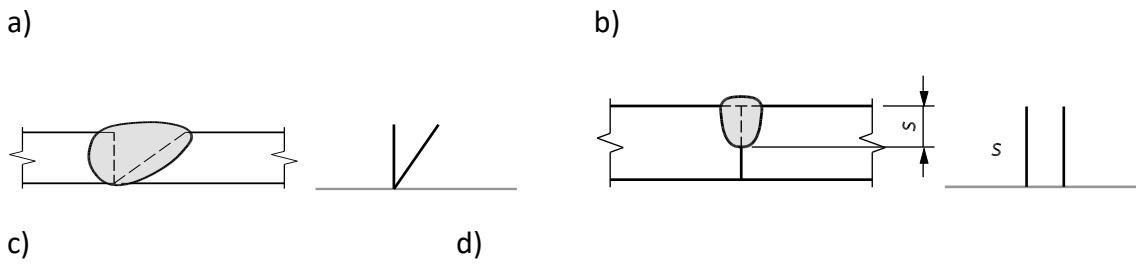
Abiliited

Kasutatakse abilementide nagu kaablid, voolikud, torud jm kinnitamiseks. Mahuliste toodete valmistamisel võidakse toote sisse keevitada ajutised tugivardad toote jäikuse suurendamiseks ja deformatsioonide vähendamiseks, mis hiljem eemaldatakse. Kõrgtugevate teraste kasutamisel võivad sellised liited kahjustada põhikonstruktsiooni, nt külm- (vesinik) pragude tekke tõttu.

Pökkõmblused ja pöckliited. USA-s tuntud ka kui servavahemikõmblused (groove welds), detailid asetsevad ühes tasandis või kuni 45 kraadise nurga all ja tavaliselt sulatatakse kokku servapidi. Eristatakse täielikult läbisulatatud õmblusi-(full penetration weld, joint penetration weld) ja osaliselt läbisulatatud (partial penetration, partially penetrated weld) õmblusi. Täieliku läbikeevitusega õmblused tagavad põhimetalliga võrdväärse õmbluse tugevuse ja töötavad ka väsimuskoormustel.

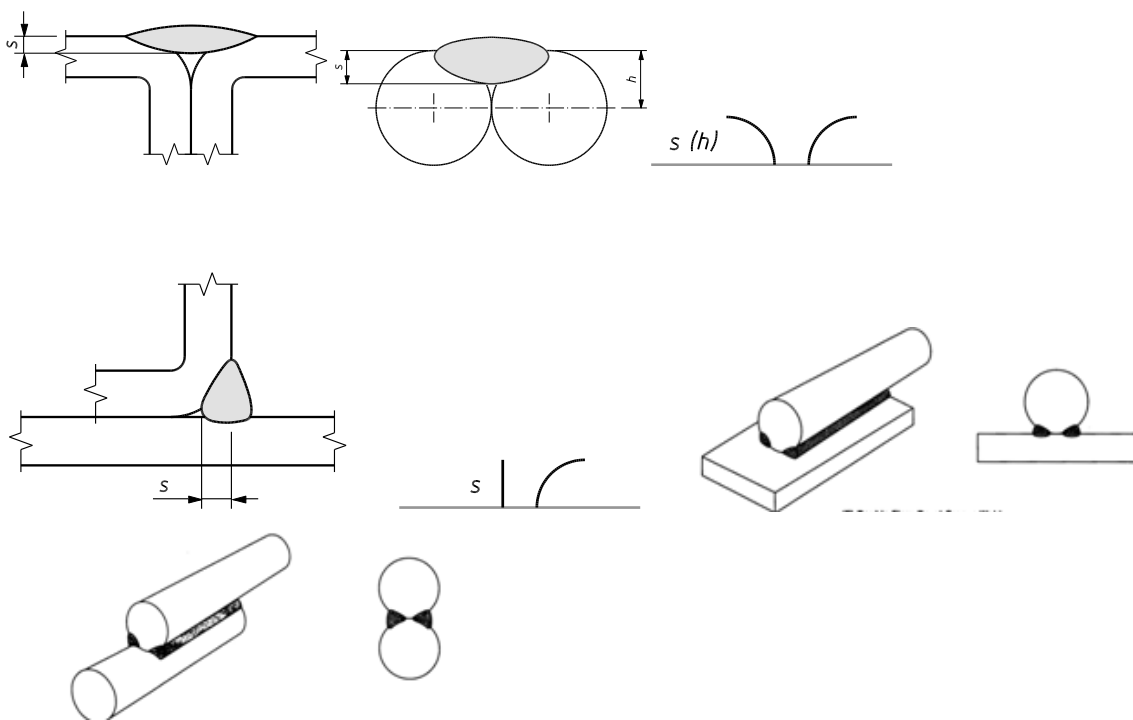
Keevisõmbluste tähistamisel joonistel näidatakse materjali paksus t –ga, läbikeevituse suurus s -tähega, täieliku läbikeevituse korral joonistel $s=t$ ja tingmärgi ette läbikeevituse suuruse tähist s ei näidata. Sõltuvalt materjali paksusest, võimalusest keevitada detaile mõlemalt poolt, keevitusprotsessist kasutatakse erinevate servakujudega –ehk servade ettevalmistusega keevisõmblusi, mille kohta on toodud soovitus standardites, nt ISO 9692. Kuna keevitades ühelt poolt suudab käsikaar-, MAG- ja TIG-keevitusel keevituskaar sulatada kuni 4 mm paksust terast (I-õmblus faasimata servadega), siis suurematel paksustel tuleb detailide servi faasida. Teraslehe paksusel 3–10 mm võib kasutada V-tähe kujulist servakuju (V-õmblus), paksema materjali korral võib servakuju olla keerulisem. V-õmbluse korral tuleb lõigata detailide servadele kas termiliste või mehaaniliste meetoditega kaldservad ehk faasid, mis on seotud kulutustega. V-õmbluse korral tuleb detailide servade vahe täita keevituse lisamaterjalist (elektroodist) sulatatud metalliga, mis suurendab võrreldes I-õmblusega lisamaterjali kulu. USA-s loetakse majanduslikult otstarbekaks V-õmblust materjali paksusel kuni 20 mm. HV-õmblust ehk K-õmblust on majanduslikult otstarbekas kasutada materjali paksustel kuni 38-40mm. Tuleb märkida, et HV –õmbluse keevitamise sooritustehnika erineb oluliselt V-õmbluste omast ja on suur risk ühe õmbluse serva puuduliku kokkusulutamise defekti tekkele kogeenematu keevitaja korral.





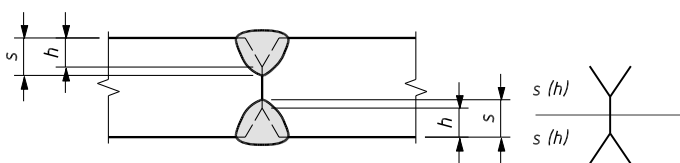
Joon.3.4 Sirgservadega põkkõmblused: a-I-õmblus; b-V-õmblus; c- HV-õmblus ; d-osalise läbikeevitusega I-õmblus, s tähistab läbikeevituse suurust, joonistel asendatakse nõutava väärtusega

Põkkõmbluste alla liigituvad paindservadega ja kumerservadega detailide õmblused, mida käsitletakse keevitusprotseduuride heaksiidul kui mittestandardseid ja WPS-de heaksiit teostatakse teise standardi (ISO 15613) järgi.



Joon.3.5 Paindservadega ja kumerservadega põkkõmblused

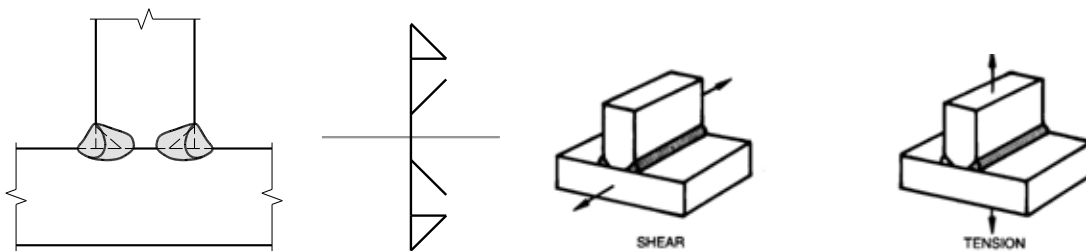
Osalise läbikeevitusega õmblused on mittevastutusrikkad õmblused, kus ei keevitata õmblust läbi terve paksuse ulatuses, vaid osaliselt. Õmbluse juurepoolne e alumine osa ei ole läbi keevitatud, mis saab pingekontsentraatoriks ja selline lahendusei ole lubatud risti liitega mõjuvatel väsimuskoormustel.



Joon. 3.6 Osalise läbikeevitusega X- põkkõmblus: s-läbikeevituse suurus, h-faasi sügavus, näidatakse joonisel arvudega ilma tähtedeta

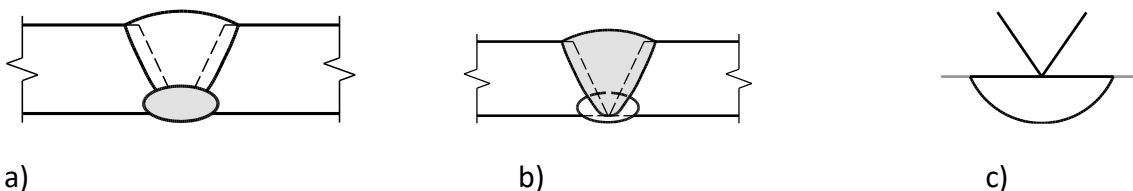
Lubatavad pinged on madalamad kui läbikeevitatud õmblustel: USA standardites lubatud tõmbepinged ei tohi ületada 0,6 terase voolavuspiiri. Nihkepinged ei tohi põhimetallis ületada 30% lisametalli tõmbetugevusest või 40% põhimetalli tõmbetugevusest. Kui liide on koormatud piki õmblust, siis võib osaliselt läbikeevitatud õmblust kasutada nii staatilistel kui ka väsimuskoormustel, kuid mitte korrodeeruvates tingimustes.

Osalise läbikeevitusega õmblusi kasutatakse sageli T-liidete korral ja kombineeritud-BW ja FW keevisõmblustena.



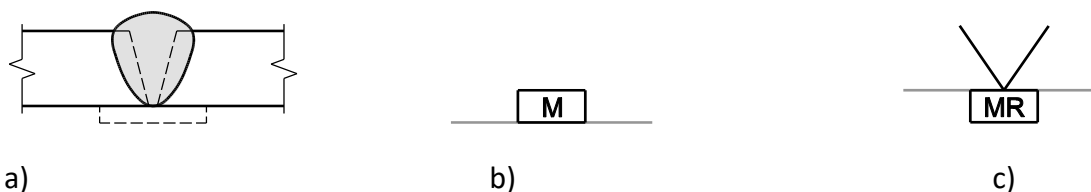
Joon.3.7 Kombineeritud T-liide (osaliselt läbikeevitatud HV-õmblus+ nurkõmblus)

Juure avamisega õmblused. Kui V-õmblustele esitatakse rangemaid nõudeid mehaaniliste omaduste ja hermeetilisuse osas, nt surveanumad, siis võidakse nõuda keevitada esimene läbim, seejärel toode ümber pöörata, eelnevat läbimit õhupilus töödelda käiaga ja ülejäänud servavahe täis keevitada. Sellist tegevust nimetatakse juure avamiseks ja joonisel on soovitatav õmbluse tähistuses lisada "**Juur avada**". Võidakse keevitada V-õmblus(backing weld), siis toode ümber pöörata allasendisse ja siis juur avada (skeem a) ja keevitada kitsas juureõmblus. Teine variant on keevitada kõigepealt õmbluse juure poolt kitsas läbim, toode ümber pöörata ja see puhastada ja seejärel keevitada V-õmblus-(b).



Joon. 3.8 Juure avamisega V-õmblused, c) tingmärk

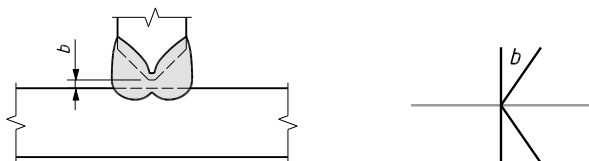
Kinnitava juuretoega keevisõmblused (permanent backing). Keevitatavate detailide alla võidakse enne keevitamist asetada samast metallist riba või ringõmbluste korral rõngas, mida nimetatakse kinnituvaks juuretoeks ja mis keevitatakse detailide külge. Silindriliste anumate korral vähendab selline juuretugi kujuhälbeid ja on võimalik kasutada suure läbikeevitusvõimega kõrgtootlikke keevitusprotsesse. Erinevalt tavalisest pökkõmblusest, sellist õmblust ei katsetata radiograafia meetodil (RT).



Joon. 3.9 Juuretoega V-õmblus: a-skeem; b-kinnituv juuretugi; c-eemaldatav juuretugi

Eemaldatava juuretoega keevisõmbused (joonis 3.9 c.) (temporary/removable backing). Õmbuse juure läbivajumise vältimiseks, eriti suure tootlikkusega keevitusprotsesside korral (täidistraatkeevitusel, rübustikaarkeevitusel, kõrgtootlikud MAG-protsessid) või suure õhupilu korral detailide vahel tekida detailide vastaspoolel kõrge ja kitsas vallik, e tugevdus, mida loetakse keevitusdefektiks. Selle vältimiseks kinnitatakse detailide alla teibiga kas keraamiline või vasest tugi, milles on soon vastasvalliku jaoks. Alumiiniumi keevitamisel ühtlasi teenib vasest juuretugi jahuti ülesandeid. Pärast keevitamist juuretugi eemaldatakse. Reeglina ei ole konstruktori ülesanne seda ette näha.

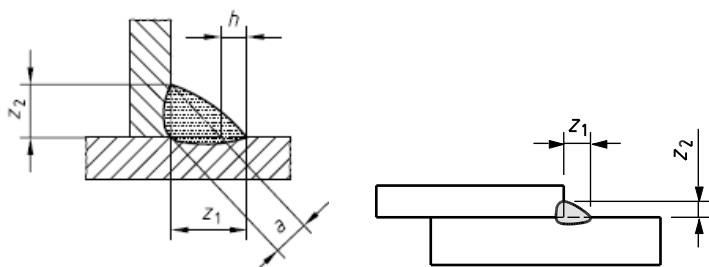
Läbikeevitatud T-liide (T-joint with butt weld). Raskelt koormatud T-liidete korral võidakse faasida püstise plaadi üks serv või mõlemad servad ja detailid kokku keevitada ühelt või mõlemalt poolt, tagades täieliku läbikeevituse. Sellist õmblust käsitletakse kui põkkõmblust ja katsetatakse kui põkkõmblust.



Joon.3.10 T-liide kahepoolse HV- põkkõmbusega (T-joint with double bevel butt weld)ja tähistus

Nurkõmbus (fillet weld) on ligikaudu võrdhaarse kolmnurga kujulise ristlõikega ja seda kasutatakse plaatide nurk-, katte- ja T-liidetes. Nurkõmblust iseloomustab tema kõrgus või paksus, mis tähistatakse a tähega ja on levinud Euroopa Liidus. USA-s ja Venemaal antakse joonistel nurkõmbuse kaateti z väärtus, mille vahel on seosed: $a = 0,7 z$, $z = 1,4 a$. Eelistada tuleb võrdsete kaatetitega nurkõmbusi, kuid uus standard ISO2553 näeb ette ka võimaluse tähistada erineva kaatetite suurusega nurkõmbusi, nt näidates need joonistel nt z_1 z_2 3.

See on kõige levinum õmbuse tüüp kaar- ja gaaskeevitusel, kuna ta ei vaja detailide servade töötlemist ja liitepindadena kasutatakse detailide külgpindu. Majanduslikult eelistada põkkõmblustele, kuna ei ole vaja servi faasida, koostamine lihtsam, lühem keevitusaeg. Liitepinnad on vaja puhastada enne keevitamist roostest ja mustusest.



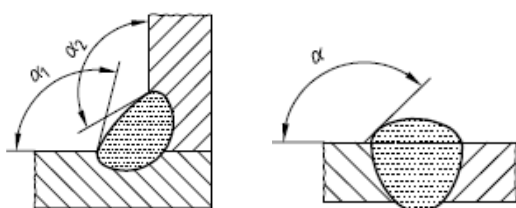
Joon.3.11 Ebavõrdsete (erinevate) kaatetitega nurkõmbus

Nurkõmbused võivad olla T-liitel kas ühepoolsed või kahepoolsed, pidevad või katkendlikud. Katkendõmbused võimaldavad vähendada T-liidete kujumuundeid ehk deformatsioone keevitamisel ja kokku hoida lisametalli, kuid ei ole lubatud korrodeeruvate vedelike sattumise korral tootele ja detailide

vahele. Joonistel näidatakse Euroopas keevitatavate lõikude vahekaugus, USA-s nende lõikude tsentrite vahekaugus. Ideaalne nurkõmblus on võrdsete külgedega (kaatetitega) ja üleminek detaililt õmblusele

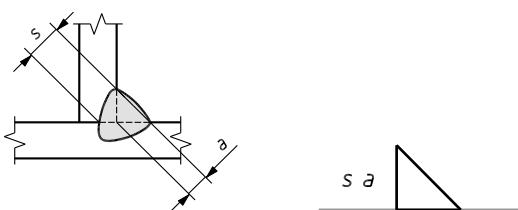
on soovitavalt sujuv. Viimast nõuet näidatakse joonistel ankrü kujulise tingmärgiga .

Nurkõmblused võivad olla sirge, nõgusa või kumera pealispinnaga, mida tähistatakse vastavate täiendavate tingmärkidega. Eelistada tuleks nõgusaid keemisõmblusi kumeratele. Kumera nurkõmbluse korral limiteeritakse kumeruse kõrgust standardi ISO 5817 järgi ja liigkumerust loetakse keevitusdefektiks. Sujuvat üleminekut keevismetallil iseloomustatakse detaili ja õmbluse puutepinna vahelise puutenurgaga, mis levinud kvaliteeditaseme C korral on üle 110°.



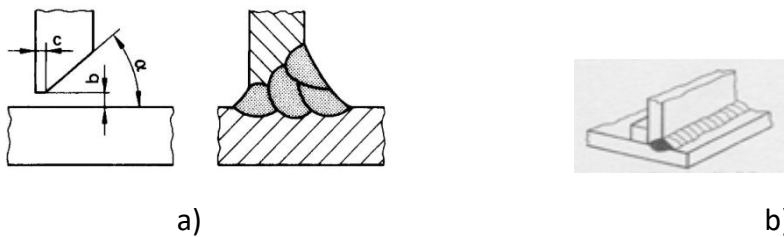
Joon.3.12 Üleminekunurk õmbluselt detailile

Sügava läbikeevitusega nurkõmblus (deep penetration weld). Kaasaegsete keevitusseadmete kasutamisel (omavad erifunktsiooni) on võimalik keevituskarega läbi keevitada detailid sügavamalt ja saada nn sügavläbikeevitusega nurkõmblus ja nii vähendada nurkõmbluse paksust ja lisametalli kulu. Ehituskonstruktsioonide valmistamisel masinkeevituse või automaatkeevituse kasutamisel on lubatud vähendada a-mõõtu kuni 25%. Läbikeevituse suurus saab mõõta purustuskatsega liite makrolihvete uurides. Läbikeevituse suurus s leitakse vertikaalse plaadi otspinna lõikepinna ja õmbluse pealispinna vahelise kaugusena.



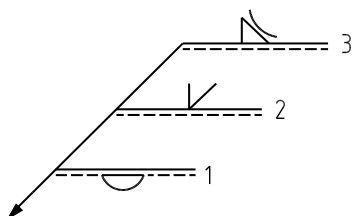
Joon3.13 Sügava läbikeevitusega nurkõmblus, s ja a ei näidata joonistel, vaid asendatakse etteantud väärtustega.

Kombineeritud liited (põkkõmblus + nurkõmblus). Kui tugevusarvutused nõuavad nurkõmblusi kõrgusega üle 16 mm, siis soovitatakse kaaluda võimalust valmistada kombineeritud õmblus - faasitud HV-õmblus+nurkõmblus.



Joon. 3.14 Ühepoolne T-liide HV- õmbluse ja nurkõmblusega ja kinnituva juuretoega T-liide

Kombineeritud õmbluse korral või mitme keevisläbimiga (operatsiooniga) keevitatud T-liidete korral võib näidata nende keevitamise järjestuse joonisel. Kuna suure paksusega nurkõmbluste keevitamisel, nt MAG-keevitusel $a > 5-6$ mm on raske tagada õmbluse soovitatavat ristlõiget ja vältida sisselõike defekti, siis võib konstruktor näidata õmbluse tähistusel erinevatel viitejoontel erinevate paksustega, nt a3 ja a6 läbimite keevitamist. Vähenevad kujumuunded ja paraneb liite struktuur ja mehaanilised omadused, kuid tõusevad keevituskulud.

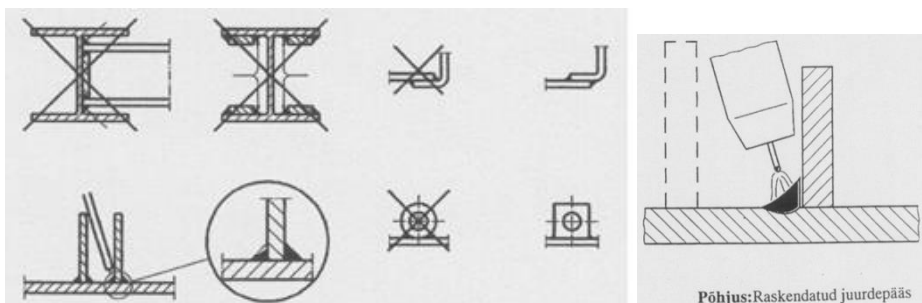


Joon. 3.15 Kombineeritud õmblustega T-liide

Näidatud numbritega keevitusläbimite järjestus horisontaalsetel pideval viitejoontel: 1.läbim-vastaspolelt juureläbimi keevitus; 2.läbim –HV õmbluse keevitamine; 3.läbim-nõgusa nurkõmbluse keevitamine.

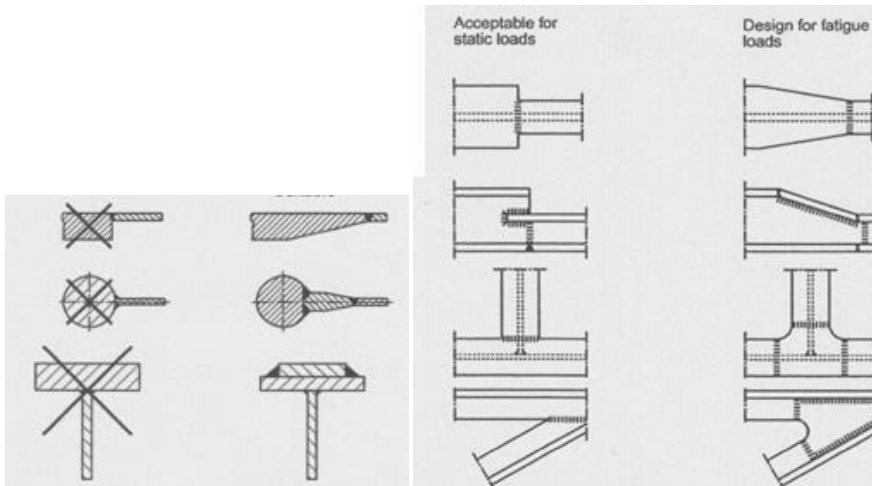
3.2 Soovitusi keevisliidete projekteerimisel

Arvestada tuleb ligipääsetavusega (accessibility) keevitamiseks ja kontrolliks, (Joon.3.16)



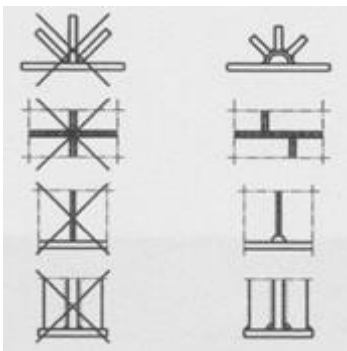
Joon. 3.16 Ligipääsetavus keevitamiseks

Vältida paksu plaadi liitmist õhukesega- ei ole lubatud väsimusele töötavatele liidetele, surveanumate korral on vajalik kooniline üleminekuosa (Joon. 3.17). Staatiliste koormuste korral on erineva paksusega detailide kokkukeevitamine lubatud, kuid on risk paksema plaadi kokkusulamatuse defekti tekkeks ja keevitaja peab muutma oma sooritustehnikat ning suunama kaare rohkem paksema detaili poole.



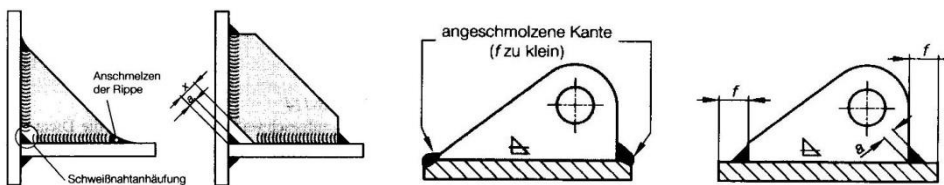
Joon. 3.17 Erineva ristlõike suurusega detailide keevisõmbused

Võimalusel vältitakse keevisõmbuste kontsentreerumist kitsasse alasse, vaid nad viiakse madalamate pingetega alasse (Joon. 3 18) ja võimaluse korral nihutatatakse õmbluseid.



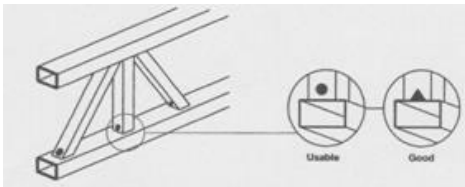
Joon. 3.18 Keevisõmbuste nihutamine

Vältitakse väikese ristlõikega teravnurksete detailide keevitamist, keevisõmbuste omavahelist lõikumist ja lähedust detailide servale.



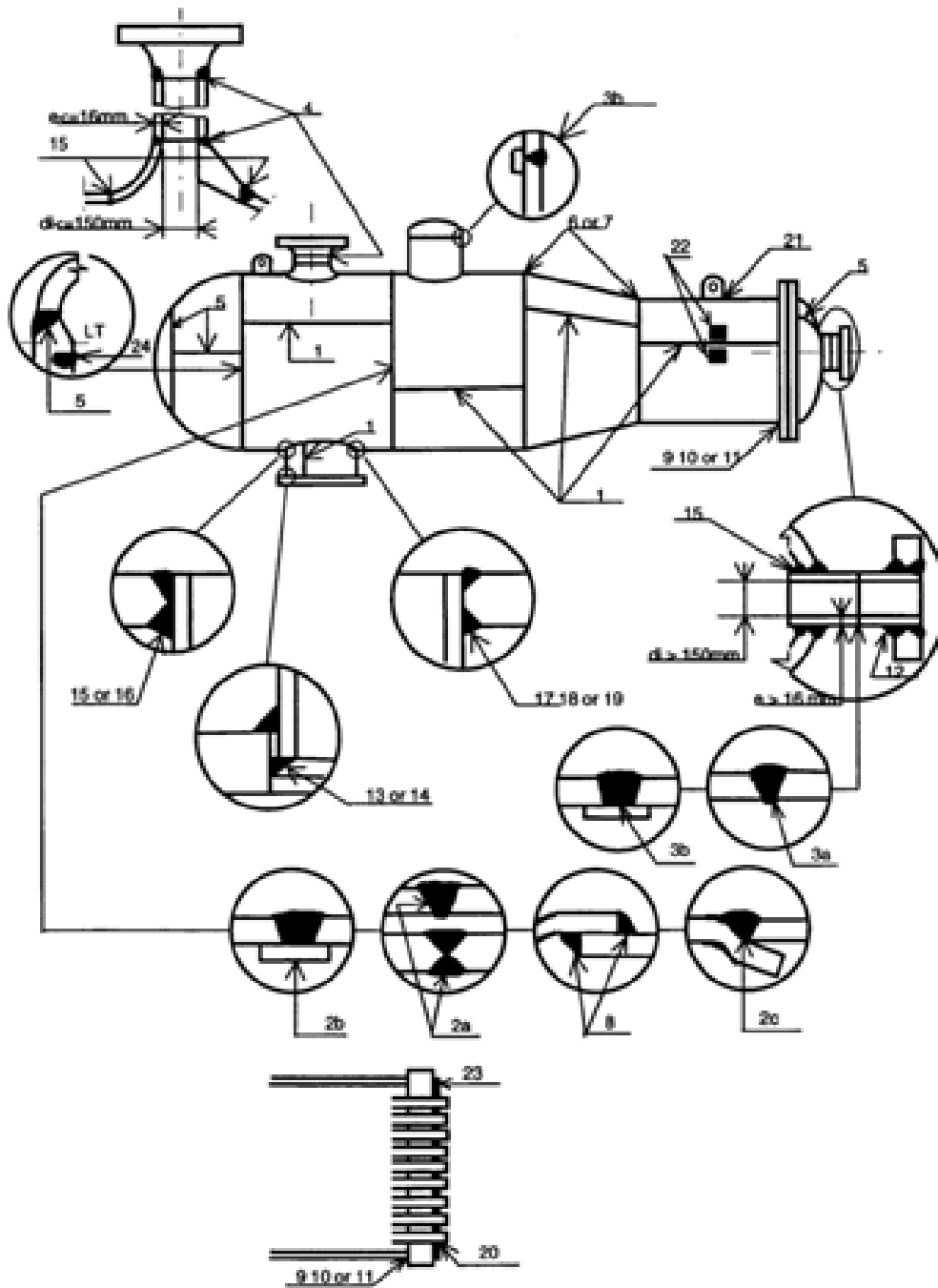
Joon.3.19 Jäikusribide ja tõstekõrvade keevisõmbuste lahendusi

Kui keeviskonstruktsioonid kuuluvad kuumtsinkimisele, samuti mahulised konstruktsioonid termotötlusele, tuleb joonistel ette näha avad õhu või liigse tsingi eemaldamiseks (Joon. 3.20).



Joon.3.20 Avad liigse tsiingi eemalejuhtimiseks tsinkimisel

Joonisel 3.21 on toodud näitena standardse surveanuma keevisliited.



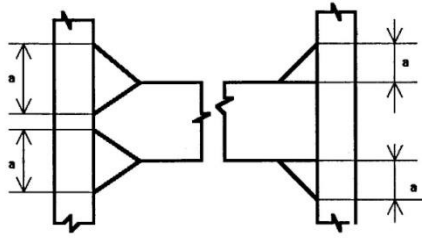


Figure 6.6.2-1 - Definition of "a" for types of weld 10 and 11

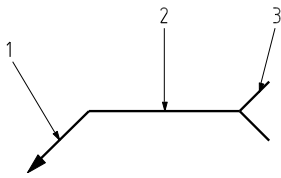
Joon.3.21 Surveanuma keevisliited ja nende nende mõõtmestamise erandlik tähistus standardis. Nurkõmbuse kaatet on tähistatud erandlikult a-ga ja kombineeritud õmbuse (HV-õmbus +nurkõmbus) tähistuses on kasutatud tähist a, mis ei vasta jooniste standardi soovitudele.

3.3 Keevistoote joonis ja keevisliidete tähistamine EVS EN ISO 2553 järgi

Tootearendaja (konstruktor) töötab välja keevistoote joonise, mis aluseks keevitaja tööle. Standard käsitleb ainult tüüpliiteid, keerulisematel liidetel näidata õmbuse eskiis lõikes koos mõõtmega. Ettevõttes keevitustehnoloog-keevitustööde koordinaator vaatab pakkumise kui ka **projekti ülevaatus** käigus projekti joonised üle (kas kogu info on olemas, kas on tagatud ligipääsetavus, on üldse võimekus teha). Sageli ettevõtetes koordinaator kinnitab joonise läbivaatuse allkirja ja templiga.

Keevistoote joonistel tuleb näidata kõik vajalik info keevitajale keevitamiseks. Keevistoote joonistel näitab konstruktor tingmärkidega õmbuse servade kuju, õmbuse mõõtmed, nõuded õmbuse väliskujule, kas keevitatakse detaile joonisel näidatud detailide poolelt või vastaspoolelt. Soovitav on näidata joonisel kvaliteedinõuded defektide järgi ISO 5817 järgi, joonmõõtmete ja kuju hälvete tolerantsid, katsetamise meetodid ja ulatus. Vastutusrikaste toodete korral valmistaja ettevõtte võib õmbused numereerida, siduda kindla keevitusprotseduuriga WPS-ga jm. Ehituslike metallkonstruktsioonide joonistel näidatakse ehitamisklass (execution class), pinna ettevalmistuse klass värvimisele. Osa eelpooltoodud infot võidakse tuua projekti spetsifikatsioonis (tootekirjelduses). Keevisõmbuse tähistuses kasutatakse õmblust iseloomustavaid tingmärke, mida on standardis ISO 2553:2014 täiendatud uute keevitusprotsesside kasutuselevõtul uute tingmärkidega (tihvti kaarkeevitus, laserkeevitus).

Keevisõmbuste tähistamise süsteemi aluseks on põhitähistus (Joon. 3.22), mida täiendatakse katkendliku identifitseerimisjoonega, soovitavalt viitejoone all, põhimärkide (sümbolitega) ja täiendavate märkidega ja vajadusel infoga hargsabaosas. Standard näeb ette 2 tähistamise varianti: A ja B-süsteemi. Süsteem A on mõeldud Euroopas kasutamiseks, süsteem B Vaikse ookeani maades, nt USA-s. Soovitavalt tuleks joonisel näidata, millist süsteemi kasutatakse. Süsteemi B iseloomustab katkendliku identifitseerimisjoone puudumine ja õmbuse poole vastupidine määratlemine: noole pool asetsev õmbuse tingmärgid kantakse süsteemis A viitejoone peale (teisel pool katkendviitejoont), süsteemis B puudub katkendjoon ja keevitusmärgid kantakse kas viitejoone alla või peale, kuid vastupidises järjestuses (tabel3.1). Üldiselt on tingmärgid samad.



Joon. 3.22 Keevitamise põhitähistus:1-noolejoon; 2-viitejoon; 3-hargsaba(osa)

Antud tähistus näitab ainult, et siia tuleb liide keevitada, võidakse kasutada traagelõmbuste jaoks. Tavaliselt traagelõmbusi ei näidata joonistel, kuid standardites võib olla toodud kohad, kus neid **ei tohi** teha ja need näidatakse joonisel.

Tähistamisel eristatakse mõisteid „noole pool“, kus keevisõmblus asetseb noole otsa juures ja „noole teine pool“, kus õmblus asetseb teisel pool püstist detaili, vt tabel 3.1

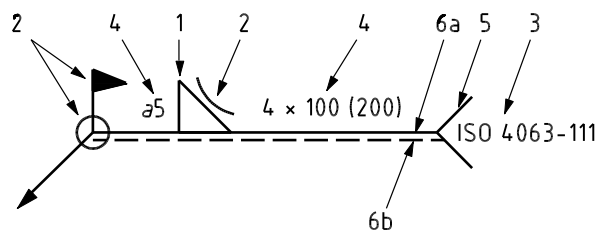
Tabel 3.1 — Noole poole ja teise poole kasutamine keevitamise tähistuses

Õmbalus asukoht	A süsteem	Õmbluse eskiis	B süsteem
Noole pool	<p>Tingmärk on pideva viitejoone ääres</p>		<p>Tingmärk on viitejoone all</p>
Teisel pool	<p>Tingmärk on katkend-viitejoone ääres</p>		<p>Tingmärk on viitejoone peal</p>

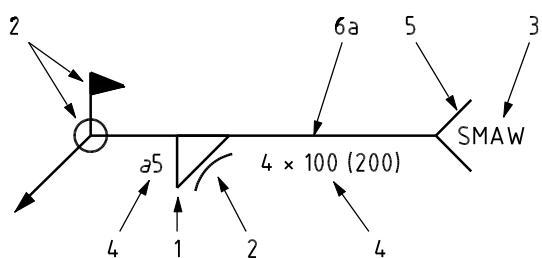


Joon. 3.23 V-õmbluse tähistus: a-noole pool; b)-teisel pool; c) X-õmblus, sümmeetriline kahepoolne V-õmblus, puudub katkend-viitejoon

Joonisel 3.24 on näidatud ümberringi keevitatud kontuurõmblus (weld all-around) nurkõmbalus paksusega 5 mm, mis tehtud koostekohal väliõmblusena (montaažõmblusena, field weld) 4 lõiguna pikkusega 100mm, vahekaugusega 200mm. .



a) keevisõmbuse tähistus A süsteemis


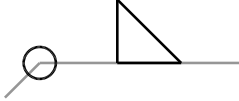
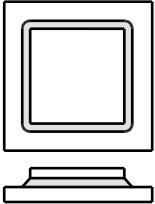
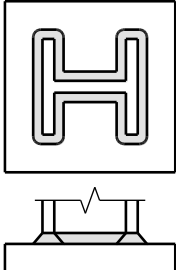
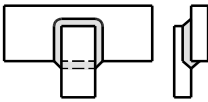


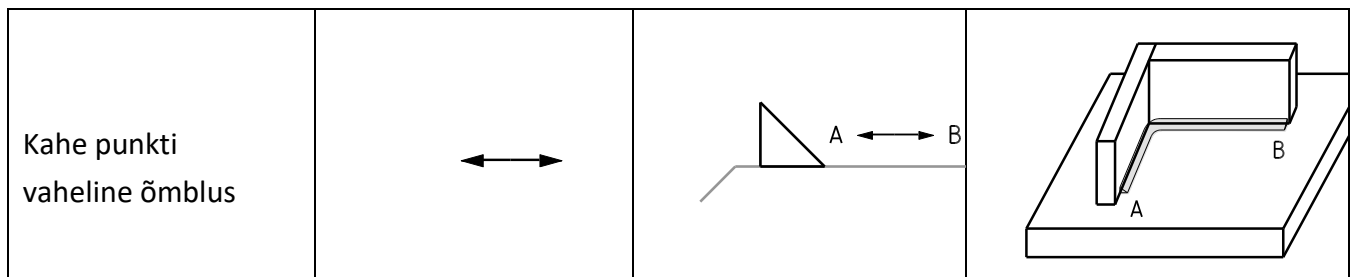
b) keevisõmbuse tähistus B süsteemis

Joon.3.24 Keevisõmbuse tähistus e näited

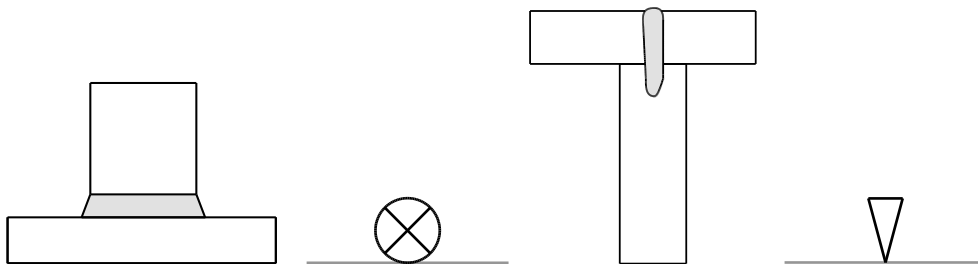
Uus tähistamise standard lubab näidata piiratud pikkusega punktist A punkti B õmbuse tähistust ja on laiendatud ümberringi õmbuse kasutamist.

Tabel 3.3 Ümberringi ja punktide vaheline keevisõmbuse tähistus

<p>Ümberringiõmbus, kontuurõmbus</p>			 <p>Näide A</p>  <p>Näide B</p>  <p>Näide C</p>
--	---	--	--



Vastakkaarkeevitusega saadud tihvtiõmbluste (stud weld) ja laserkeevitatud läbi plaadi sammasõmbluste (stake weld) tähistuse tingmärgid on toodud joonisel 3.25.

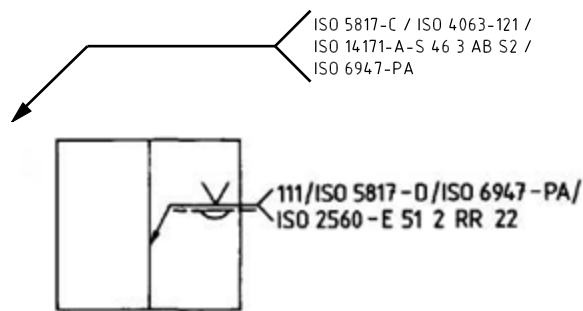


Joon. 3.25 Tihvtiõmbluste ja sammasõmbluste tähistuse tingmärgid

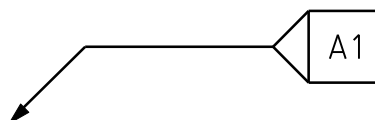
Kevisõmbluste mõõtmete näitamine. Vasakul pool tähistuse tingmärki näidatakse õmbluste põhimõõde, paremal pool vajadusel pikkusmõõde. Nurkõmblustel näidatakse reeglina õmbluste a-mõõde ehk paksus, harvemini kaatet z. Kui ei ole teisiti näidatud, siis on pökkõmblustel paksuse ulatuses täielikult läbi keevitatud. Osaliselt läbikeevitatud pökkõmbluste korral näidatakse keevitusmärgist vasakul numbriga läbikeevituse sügavus (on väiksem kui detaili paksus). Standard ei soovita läbikeevituse suuruse ees s tähte näidata. Õmbluste pikkusmõõdu puudumine paremal pool keevitusmärgi tähendab, et see on detailide pikkune. Pikkuse mõõde kantakse tavaliselt siis, kui õmblus ei ole detailide pikkune või kui on õmbluste pikkus on raskesti tõlgendatav, nt üleminekul ühelt detaili poolelt teisele poole, nt lapi katteliite korral. Vajadusel võidakse tähistuse hargسابаosas esitada lisainfot. **Laiendava info esitamine tähistuse hargسابаosas:**

- õmbluste kvaliteeditaseme tähis t (nt. ISO 5817, ISO 10042 järgi);
- keevitusprotsessi tunnusnumber (näiteks ISO 4063 järgi);
- lisamaterjalide (elektroodide) klassifikatsioon ;
- keevitusasendi tähis (nt. ISO 6947 järgi).

Üksikud andmed eristatakse üksteisest kaldjoonega. Lisaks võib laudi sabaosas spetsiifiliste juhiste (nt tehnoloogiajuhiste) näitamiseks hargmiku järel tuua tabelikese (kinnise hargsabana) viitega sellele infole. Standardi soovitude kohaselt tuleb suletud hargsabana ainult siis kasutada, kui viidatakse keevitusprotseduuride spetsifikaatidele, WPQR-dele.



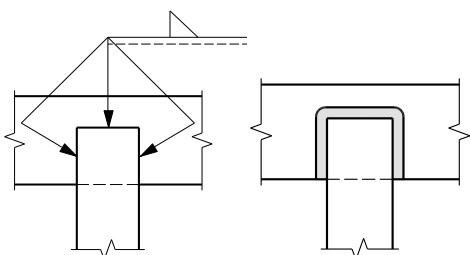
a) Avatud hargsaba



b) Suletud hargsaba

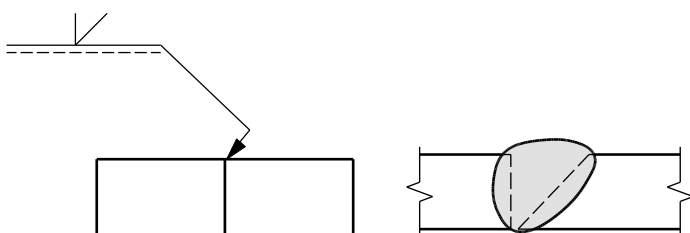
Joon. 3.26 Lisainfo tähistuse hargsabas

Mitme viitejoone asendamine ühe viitejoonega. Kui on vaja keevitada mitu identset keevisõmblust, siis võib neid mitte näidata eraldi tähistustega, vaid need ühendada ühe tähistuse pideva viitejoonega.



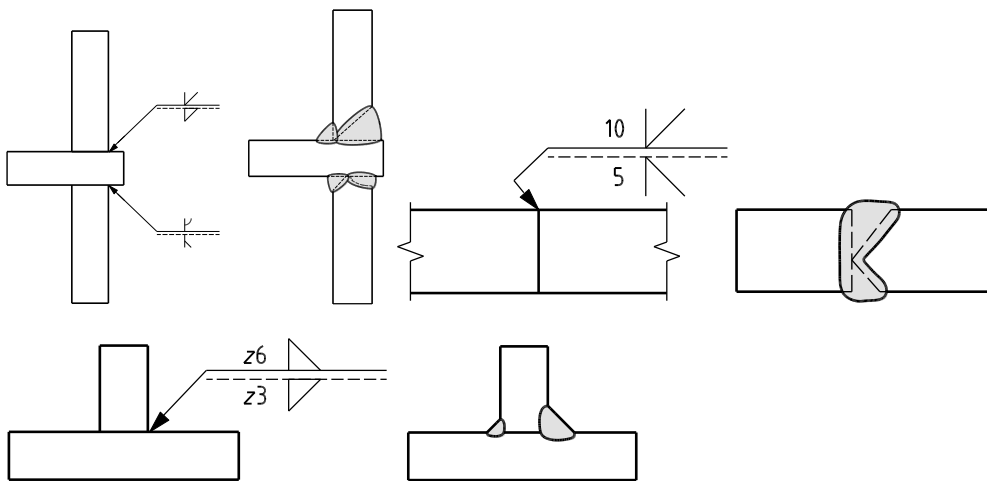
Joon. 3.27 Mitme viitejoone asendamine ühe viitejoonega identsete õmbluste korral

Murtud noolejoont kasutatakse ühelt poolt faasitud HV-õmbluse kujutamisel, kusjuures murtud noolejoon on suunatud **faasitud serva** peale (joon. 3.28).



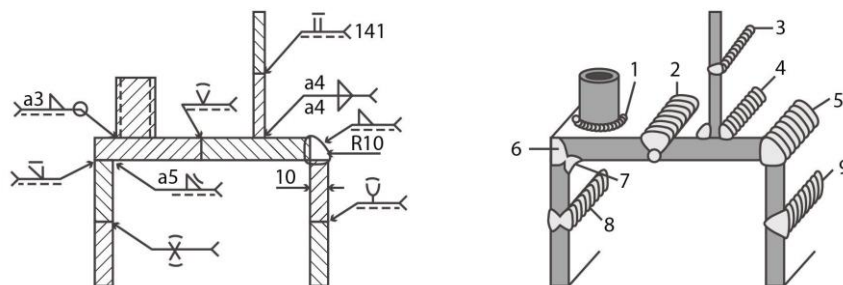
Joon. 3.28 Murtud noolejoone kasutamine ühe faasitud servaga õmbluse korral

Allpool on toodud näide **asümmeetriliste keevisõmbluste** tähistamiset, kui pökkõmbused on 2 poolt keevitatud ja läbikeevituse suurused ei ole võrdsed või nurkõmbused on erinevate mõõtmetega. Kasutatakse katkend-identifitseerimisjoont. Sümmeetriliste õmbluste korral katkend-identifitseerimisjoon puudub.



Joon.3.29 Asümmeetriliste keevisõmbuste tähistusi.

Näited erinevate keevisõmbuste tähistuse kohta on toodud joonisel 3.30



Joon. 3.30 Keevisliidete tähistusi

3.3 Keevistoodete (konstruktsioonide) mõõtmete tolerantsid ja kujuhälbed

Keeviskonstruktsioonide lineaarmõõtmete ja nurgamõõtmete tolerantsid iseloomustab ISO 13920:1996 järgi 4 täpsusklassi: A,B,C,D. Kõige väiksemad tolerantsid on klassil A, suuremad klassil D. Ehituslikud metallkonstruktsioonid täpsuse järgi on tavaliselt C-klass, kujuhälbed tavaliselt G-klass.

Keeviskonstruktsiooni või toote joonisel näidatakse kirjanurga kohal alati nõuded kvaliteedile, nt: Keevitusdefektid ISO 5817/D.

Veel on soovitatav näidata kontrolli maht ja meetodid. Kõiki keevisliiteid kontrollitakse visuaalselt, seda tähistatakse joonisel: VT 100% või 100%VT. Kui nõutakse röntgenkontrolli, siis nt. RT 20% või ultrahelikontrolli UT 10%. Võidakse näidata samas mõõtmete tolerantsid võisiis tabeli väljavõttena.

Soovitatav on näidata tabeli kujul kirjanurga kõrval joonmõõtmete tolerantsid (linear dimensions tolerance) tabeli kujul aga ka tolerantsid sirgjoonelisusele ja tasapindsusele (straightness and flatness).

3.4 Nõuded keevisliidete kvaliteedile keevitusdefektide järgi

Keevituse tavaprotsesside kasutamisel esinevad suuremad või väiksemad keevitusdefektid, mida saab liigitada järgmiselt:

Defekt, puudus, keevitusdefekt (imperfection, flaw, discontinuity) – kõrvalekalded keevisõmbeluse pidevuses, kujus ja mõõtmetes, mis on veel lubatud piirides (aktsepteeritavad). Keevitusdefektide liigitus ja tähistus numberkoodidega koos nende kirjeldusega on toodud standardis ISO 6520.

Viga (defect) – keevisõmbeluse defekt, mis ületab mõõtmete või hulga poolest etteantud piirväärtust.

Nõuab parandamist e remontkeevitust (repair welding).

Defektid jagunevad:

- ruumilised;
- tasapindsed;
- pindmised;
- sisemised.

Standarditega (terased EVS- EN ISO 5817) on määratud keevisõmbelustele keevitusdefektide järgi 3 kvaliteeditaset (Soomes ja Saksamaal kvaliteediklassid):

D – mõõdukas (rahuldav), tugevus 50% teoreetilisest;

C – keskmine (hea), tugevus 75%;

B – kõrge (nõudlik), tugevus 100%.

Tabel 3.1 Kvaliteeditasemed

Kvaliteeditase	B (kõrge)	C (keskmine)	D (mõõdukas)
Liite tugevus teoreetiliselt	100%	75%	50%
Koormuse liik	Dünaamilised ja väsimus	Staatilised	Staatilised, toatemperatuuril
Liite tähtsus	Kõrge projekteerimisele, ei toimu jõudude ümberjaotust purunemisel	Üldise toimimise kahjustumine	Ei ole otsest üldise toimimise kahjustumist
Purunemise tagajärjed	Tõsised isikute/keskkonna kahjustused	Piiratud mahus isikute/keskkonna kahjustused	Isikute kahjustused ei ole tõenäolised

Keevituse kvaliteeditaseme määramine.

Staatiliselt koormatud konstruktsioonid – enimlevinud kvaliteeditase **C**.

Kes määrab kvaliteeditaseme- konstruktor (disainer), standard. Metallkonstruktsioonide ja enamuse surveanumate valmistamisel võidakse kasutada taset C, kuid keevitajate ja keevitusprotseduuride kvalifitseerimise katsel taset B. Kvaliteeditaseme määramisel tuleb arvestada ohutusnõuetega, majanduslike teguritega, toote purunemisel võimalike inimohvrite võimalusega jm.

Kokkuvõte

Keevisõmbeluste tähistamise põhimõtte ja sümbolid

1. Keevitusjoonistel näidatakse keevistoote keevitamiseks vajalik info: servade ettevalmistus-faasimine, õmbluse mõõtmed ja ristõike kuju, asukoht, nõuded kvaliteedile defektide järgi, mõõtmete tolerantsid. Joonis on aluseks keevitustööde planeerimisel (projekti ülevaatusel etapil vaatab üle ettevõtte keevitusinsener) ja keevitaja tööle.
2. Euroopas kasutatav keevisõmbluste tähistus (süsteem A) sisaldab keevisõmbluse asukohta näitav nooleotsaga noolejoont, horisontaalne viitejoont (laudi) ja selle all asetsevat katkendlikku identifitseerimisjoont. Kui õmblus asetseb noole pool, siis näidatakse tingmärkidega õmbluse kuju tavaliselt viitejoone peal). Tingmärgist vasakul näidatakse nurkõmbluse paksus või osalise läbikeevituse korral läbikeevituse suurus, paremal vajadusel õmbluse pikkus. Kui mingil põhjusel ei saa näidata detailide vastaspoolel asetsevat õmblust, siis kantakse tingmärgid laudi all olevast katkendjoonest allapoole.
3. USA-s jt Vaikse Ookeani piirkonna maades ei kasutata tähistuses katkendjoont (süsteem B), kuid tingmärgid on erinevalt A-süsteemile paigutatud vertikaalselt vastupidiselt viitejoone e laudi suhtes.
4. Keevitusjoonistel näidatakse kas vahetult tähistuse hargsabaosas kvaliteeditase defektide järgi (B, C või D) või märkusena joonise väljal, mittepurustava katsetamise meetodid ja ulatus. Kõiki keevisõmblusi kontrollitakse visuaalselt ja joonistel kantakse märkus: VT 100%. Võidakse näidata mõõtmete ja kujuhälvete tolerantsid. Ehituslike metallkonstruktsioonide joonistel näidatakse ehitamisklass EXC ja pinna ettevalmistuse klass värvimiseks (P1, P2 või P3).
5. Kui ei ole tegemist standardtoodetega, siis keevisõmbluste kvaliteeditaseme defektide järgi määrab konstruktor, arvestades purunemisest tekkivaid riske. Enimlevinud kvaliteeditase metallkonstruktsioonide valmistamisel on C.

Kvaliteedinõuded

6. Tavakeevitusprotsesside kasutamisel kaasnevad alati kõrvalekalded õmbluse pidevuses ja kujus, mis vähendavad õmbluse ristlõiget ja on pingekontsentraatoriteks. Neid nimetatakse defektideks. Eristatakse lineaarseid defekte, milliseid loetakse ohtlikumaks liite töövõimele kui ruumilised defektid.
7. Igale keevitusprotsessile on iseloomulikud teatud tüüpi defektide esinemine, nt MAG-keevitusel kokkusulamatuse ja pooride risk, käsikaarkeevitusel rübupesade ja pooride risk. Nimetatud asjaoluga tuleb arvestada nii projekteerimisel, valmistamisel kui ka katsetamisel.
8. Arvestades keevistoote purunemisega kaasnevate majanduslike kahjudega ja riskiga inimeste eludele, antakse standardites (nt ISO 5817 jt) ette 3 kvaliteeditaset (B; C; D) lubatud defektide suurusele. Kui defekt ületab oma mõõtmetelt lubatud mõõtmeid, siis liigitub ta keevitusveaks, mis tähendab defektse koha väljalõikamist ja uuesti keevitamist (nn remonteevitus). Tavaliselt lubatakse ühe koha peal teha 2 paranduskeevitust.
9. Standardid või projekteerija annavad ette kvaliteedinõuded defektide järgi. Tuleb arvestada asjaoluga, et liiga kõrged nõuded tõstavad kulutusi valmistamisele ja katsetamisele.
10. Metallkonstruktsioonide valmistamisel kasutatakse sageli kvaliteeditaset C, kuid vastutusrikaste toodete korral võidakse kasutada taset B. Keevitajate eksamitöödel ja protseduuride katsetükkide keevitamisel hinnatakse töid taseme B järgi. Madalamat taset kui D Euroopas ei aktsepteerita.

4. Kaarkeevituse põhiprotsessid

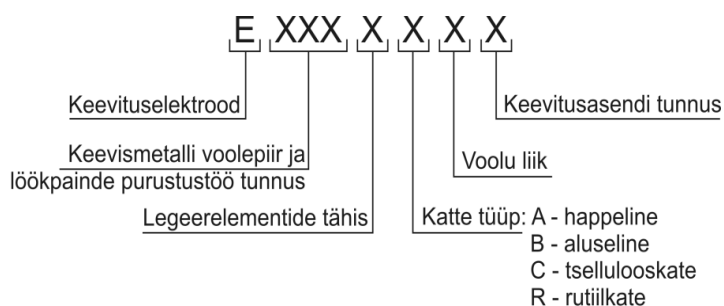
4.1 Käsikaarkeevitus, käsitsi kaarkeevitus

Metal manual arc welding-MMA, USA-s: shielded metal arc welding-SMAW, ISO tunnusnumber 111. Kasutusala: torustike keevitus ja katlaremont, välitööd. Piiratud kasutus arenenud maades (kuni 10 - 20% töödest), Hiinas ja Indias vastupidi. Madal tootlikkus, nõutavad kõrged keevitaja kutseoskused. Kasutatakse CC vooluallikat (alaldi, inverter, keevitustrafo).

Inseneri ülesandeks on valida õiged elektroodid kate tüübi järgi, vajadusel need kuivatada.

Elektroodikatete ja elektroodide (electrodes, consumables, filler metal) põhitüübid:

- happeline – A-täht;
- tsellulooskate – C-täht;
- rutiilkate – R-täht;
- aluseline kate – B-täht;
- paksukattelised ja kõrgtootlikud rutiilelektroodid – RR tähed.
- kombineeritud katted-R,RA,RB



Näiteid:

ISO 2560-A : E46 3 1Ni B 54 H5

ISO 2560-A: E42 2 RB 12

Joonis 4.1 Keevituselektroodide klassifikatsioon (tähistamine)

Elektroodi kate tüüp määrab nii keevitusprotsessi iseloomu kui ka pealesulatatud keevismetalli mehaanilised jm omadused ning elektroodi taassüütamine jätkamisel. Elektroodi otsa tekib keskel süvend ehk kraater, kuna metall sulab kiiremini kui kate. Kraater elektroodi otsas on täidetud vedela räbuga ja elektroodi otsa ja detaili vahel tekib räbukile, mille elektrijuhtivus on madal. Kõige parem elektrijuhtivus on rutiilkattel. Teistel katete tüüpidel on räbu elektrijuhtivus väike madalatel temperatuuridel, kuid kasvab temperatuuri tõustes. Taassüütamiseks peab elektroodi ots olema kas kuum või tuleks elektroodi otsa räbust puhastada.

Happeline kate (tähistuses A täht)

Kate sisaldab suurel määral tervisele mürgiseid Mn ühendeid, kuid tekitab elektroodimetalli peentilk- või pihustussirde, millega tagatakse väga hea keevisõmbluse väljanägemine. Euroopa Liidus on

happelise kattega elektroodid oma kahjulike ainete kõrge eraldumise tõttu keelatud, kuid võidakse kasutada kombineeritud kahest erinevast katte tüübist koosnevat elektroode nt rutiilhappelise kattega (RA) elektroode.

Aluseline B-kate(tähistuses B täht)

Elektroodimetalli jämetilksiire tagab hea detailide servade sildamise, kuid õmbluse väljanägemine ei ole hea ja räbu on keskmiselt eemaldatav. Selle katte tüübiga elektroode kasutatakse ainult siis, kui on nõutavad väga head keevisõmbluse mehaanilised omadused või hermeetilisus, nt surveseadmete ja energeetikaseadmete valmistamisel ning remondil. Sobivad hästi kõrgtugevate ja ultrakõrgtugevate teraste keevitamiseks. Klassikalise koostisega elektroodide korral kasutatakse vastupolaarset alalisvoolu. Kaasaegsed elektroodid võivad olla valmistatud kahekihilistena, millega tagatakse paremad kaare süütamisomadused ja keevitusvoolu polaarsusel ei ole tähtsust. Aluselise kattega elektroode iseloomustab ülimalt suur niiskusimavus ja neid tuleb kasutada mõne tunni jooksul pärast pakist väljavõtmist ja hoida töökohal kuumutatavas topsis ehk pinalis ca 100°C. Standardsed elektroodipakid tuleb kuivatada enne kasutamist vastavalt tootja soovitudele ca 300-350°C erilises kuivatuskapis 2-4 tundi. Valmistatakse madala niiskusimavusega elektroode (LMA- low moisture absorption) või kasutatakse erilisi niiskuskindlaid pakendeid (nn Sahara tüüpi), mille korral ei ole elektroodide kuivatamine vajalik. Osa elektroodide tootjaid soovitavad kuivatamist teha kuni 5 korda, metallkonstruktsioonide valmistamise standard kuni 2 korda. Reeglina keevitatakse lühikese kaarega, alustuspoore saab vältida alustusplaatide (run-on table) kasutamisega. Elektroodimetalli siire toimub jämedate tilkadena ja selle tulemusena satub keevismetalli vähe hapnikku ja lämmastikku, mistõttu on keevismetallil kõrged mehaanilised omadused, kuid madal vedeloolavus ja kõrge viskoossus.

Tsellulooskate e C-kate (tähistuses C täht)

Kattes olev tselluloos laguneb kaares ja eraldub kaarevahmikku süsihappegaasi. Kattes olevad mineraalsed koostisosad tekitavad suhteliselt vähe kiirelt tarduvat räbu. Seetõttu sobivad tsellulooskattega elektroodid ülalt –alla asendis püstõmbluste keevitamiseks, kuna väikeses koguses tekkiv räbu ei voola keevituskaare ette. Puuduseks on pritsmete teke ja suurel hulgal keevitussuitsu tekkimine. Elektroodi iseloomustab väga hea detailide vahelise õhupilu sildamise võime. Ainult tsellulooskattega elektroode kasutatakse põhiliselt torujuhtmete keevitamiseks. Tänapäeval kasutatakse nn kombineeritud rutiil-tsellulooskatet.

Rutiilkate(tähistuses R täht)

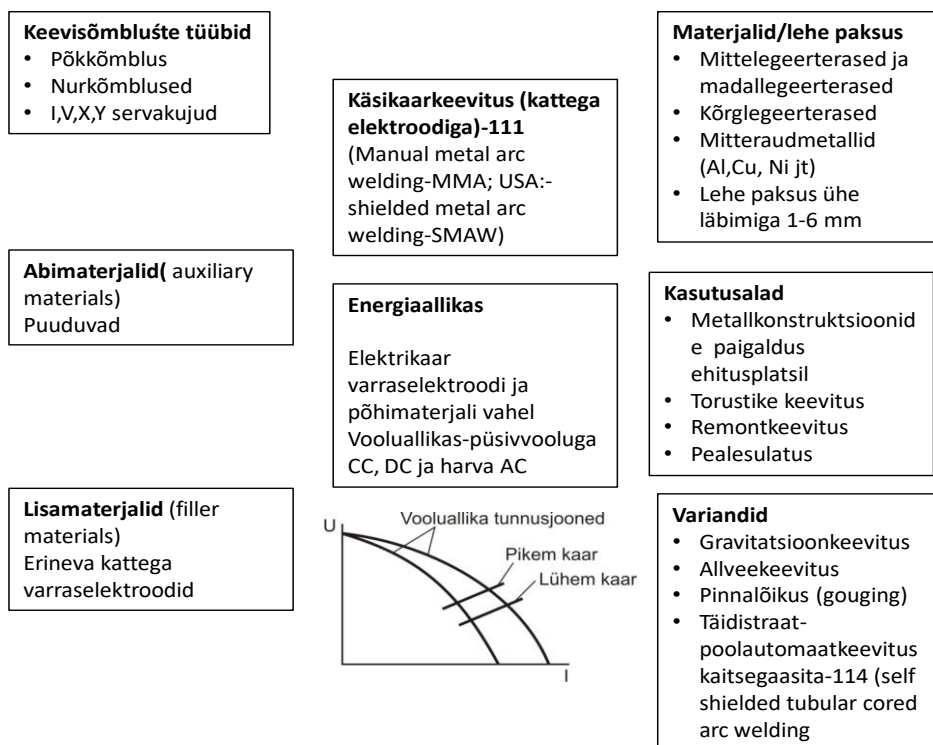
Sisaldab suures koguses hea elektrijuhtivusega titaanoksüüdi (TiO₂), mis määrab elektroodi omadused. Elektroodi otsast eralduvad väikestest kuni keskmise suurusega sula elektroodimetalli tilgad, mille tulemusena tekib sile väikese soomuselisusega keevisõmbluse pealispind. Räbu on kergesti eemaldatav. Tingituna jahtunud räbu heast voolujuhtivusest on lihtne pärast keevitamise katkestamist kaart uuesti süüdata. Saab lisaks alalivoolu kasutamisele keevitada ka vahelduvvooluga (kasutades keevitustrafosid). Vajadusel kuivatatakse 100°C juures 2 tundi- vt elektroodi tootja soovitusi.

Kombineeritud elektroodikatted

Segades kokku erinevat tüüpi elektroodikatete komponente, saab selliste segatud katetega laiendada nende positiivsete omaduste skaalat. Tüübid on järgmised:

- Paks rutiilkate (tähis RR), mis sisaldab kattes suures koguses rauapulbrit. Paksu katte korral tekib palju räbu, mis võib valguda keevituskaare ette püstõmbluste keevitamisel. Sageli on tegemist kõrge efektiivsuse (väljatulekuga) ja keevismetalli tootlikkusega elektroodidega. Keevitusasendid piiratud allasenditega PA või PB.

- Kombineeritud kate happelisest ja rutiilkattest (RA või AR), mis annab väga hea keevisõmbuse pinna ja sageli kasutusel roostevaba terase keevitamisel.



Joon. 4.1 Käsikaarkeevitus

Tabel 4.1 Elektroodikatete omadused

Katte tüüp	Tselluloos	Happeline	Rutiil	Aluseline
Voolu tüüp	AC või DC	AC või DC	AC või DC	DC (AC)
Polaarsus	DC ⁻	DC ⁻	DC ⁻	DC ⁺
Elektroodi siirdeviis	Keskmsed tilgad	Peentilgad, pihustus	Keskmsest kuni peentilka deni	Jämetilgad
Sildamine	Väga hea	Mõõdukas	Hea	Hea
Keevitusasend	Kõik, ka PG	Kõik, välja PG	Kõik, välja PG	Kõik, välja PG
Löögisitkus	Normaalne	Normaalne	Hea	Väga hea
Vesinikpragude risk	Madal	Kõrge	Madal	Väga madal
Õmbuse väljanägemine	Mõõdukas	Hea	Hea	Mõõdukas

Keevituselektroodi tootlikkust iseloomustab efektiivsus või elektroodimetalli väljatuleku tegur (efficiency, recovery, recovery rate), mida kirjeldab valem:

$$\alpha_s = \frac{m_{km}}{m_{el}} \cdot 100(\%),$$

kus : m_{km} -pealesulatatud keevismetalli mass,
 m_{el} -sulanud elektroodivarda mass.

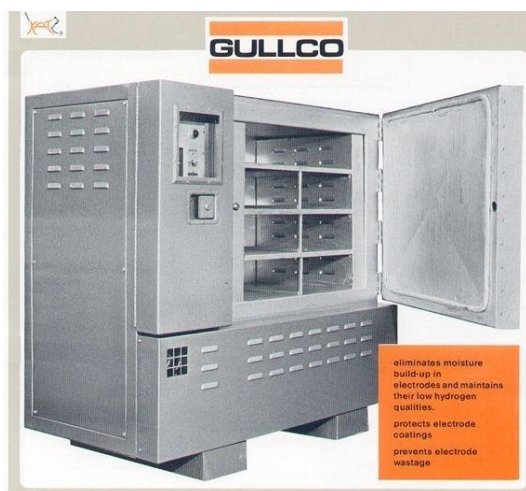
Keevituselektroodide valikul arvestada katte tüübiga:

-vastustusrikkad konstruktsioonid –B kate;

-ehituskonstruktsioonid-R,RR ja RC kate;

-torud-C-kate.

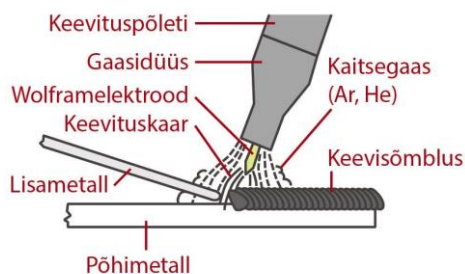
Elektroodide ladustamisele, hoidmisele ja ettevalmistamisele tuleb koostada ettevõttes juhendid.



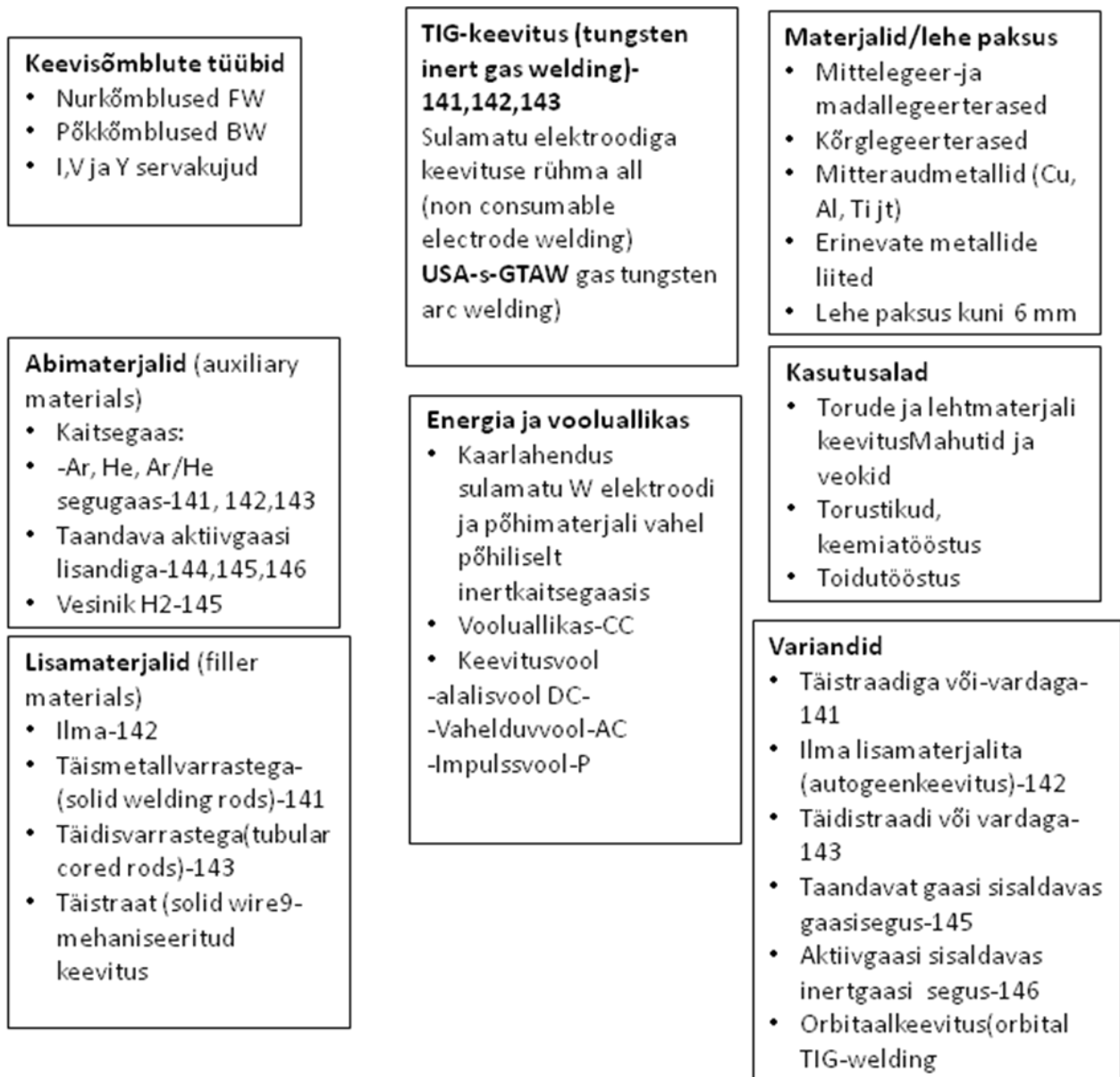
Joon. 4.2 Elektroodide kuivatuskapp

4.2 TIG-keevitus

TIG-keevitus (tungsten inert gas welding; USA-s GTAW (gas tungsten arc welding), tunnusnumber on 141, 142. kuulub sulamatu elektroodiga kaitsegaasis kaarkeevitusprotsesside rühma. Kaitsegaasid Ar või segugaas Ar+He. Kasutatakse CC vooluallikaid.



Joon. 4.3 TIG-keevituse põhimõte



Joon. 4.4 TIG-keevitus

Keevitusprotsessi eelised:

-kõrge õmbluse kvaliteet ja hea väliskuju;

-hea keevismetalli juhtimine, ei ole piiranguid keevitusasenditele;

-puuduvad räbu ja pritsmed;

-küllaltki hästi õpitav-tehnika sarnane gaaskeevituse omale;

-saab keevitada enamikku metalle, v a W. Levinud Al, Cu, Ti, roostevaba terase keevitamisel. Materjali ökonoomne keevitamise paksus on 0,15-6 mm.

Puudused:

-madal tootlikkus;

-tundlik tõmbetuulele;

-tundlik detailide servade puhtusele.

Vooluallika tunnusjoon ja voolu liik

Kasutatakse järsult langeva tunnusjoonega **CC** vooluallikaid-samad mis MMA, kuid pinge ca 2 korda madalam kui käsikaarkeevitusel, vajalik lisaseade kaare süütamiseks.

Kasutatakse päripolaarset alalisvoolu DC⁻, Al keevitamisel kasutatakse vahelduvvoolu AC oksiidikihi purustamiseks.

Keevituskaare süütamise meetodid: kontaktmeetodid ja kontaktivabad meetodid

- kraapimisega-võivad tekkida W-suletised;
 - kontaktsüütamisega (*liftarc*), W-suletised;
 - kõrgsagedussüütega 4 kV ja sagedusega 0,4-5 MHz (vanad seadmed), uutes 20 kV ja 700 Hz.
- Võivad esile kutsuda elektromagnethäireid.

Keevituselektroodid ja kaitsegaasid

W elektroodid: läbimõõt on: 1,0; 1,6; 2,4; 3,2-6,0 mm, pikkus 175 mm

Kas puhas W või legeeritud $\text{La}_2\text{O}_3, \text{ThO}_2, \text{Y}_2\text{O}_3, \text{ZrO}_2, \text{CeO}_2$ elektrood. Kõige vähem mürgised Ce legeeritud elektroodid. Elektroodid enne keevitamist õigesti teritada, Al keevitamisel elektroodi otsa ei teritata. Kaitsegaas kas Ar või segugaas Ar+He.

Keevitusparameetrite valik:

-keevituselektroodi läbimõõt sõltuvalt materjali paksusest;

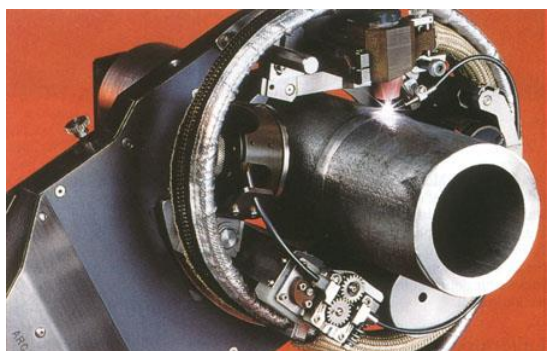
-keraamilise gaasisuudmiku d ehk number;

-voolu liik: alumiiniumi keevitamisel vahelduvvool AC, terastel päripolaarne alalisvool DC⁻;

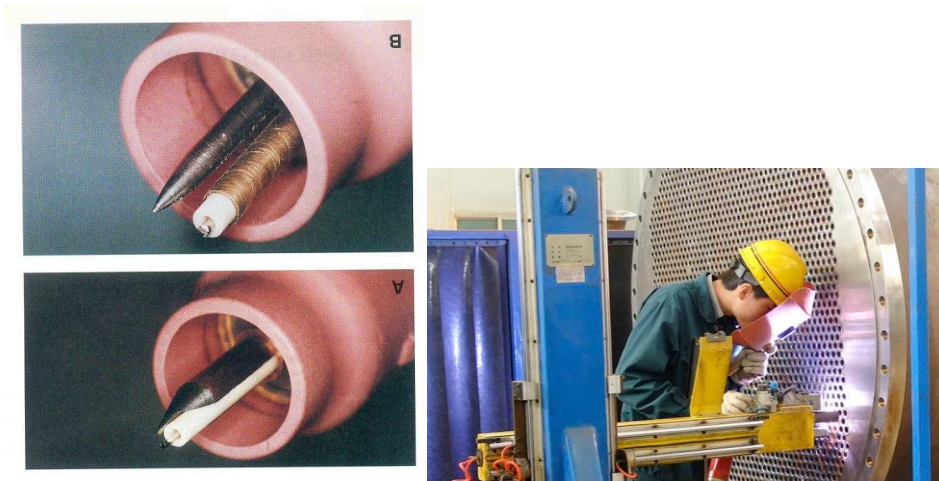
-voolu tugevus.

TIG-keevituse automatiseerimine ja mehaniseerimine

Orbitaalkeevitus- torude keevitamiseks, erinev lisametalli etteandmise tehnika



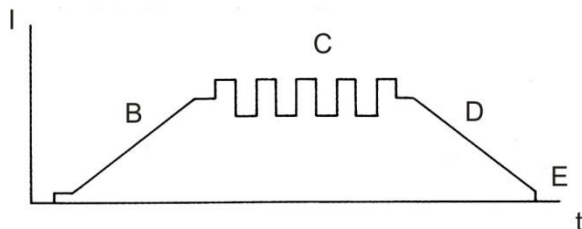
Joon. 4.5 Toru orbitaalkeevitus



Joon. 4.6 TIG- keevituse mehhaniseerimine

TIG keevituse ajagraafik e tsüklogramm

Seadistatakse gaasi eelvool ja järelvool, voolu tõusu ja languse kiirus, keevitusvool. Voolutugevuse lineaarne tõstmine võimaldab detailide eelkuumutust ja väiksemat elektroodide tarbimist. Langev keevitusvool tsükli lõpus võimaldab saada parema õmbluse lõpetuse ja vältida kraatertühiku teket. Enne keevitamise alustamist puhutakse põleti läbi argooniga ja eemaldatakse sealt õhk. Gaasi järelvoolu abil kaitstakse keevitamise lõpetuskohas kuuma keevismetalli oksüdeerumise eest.



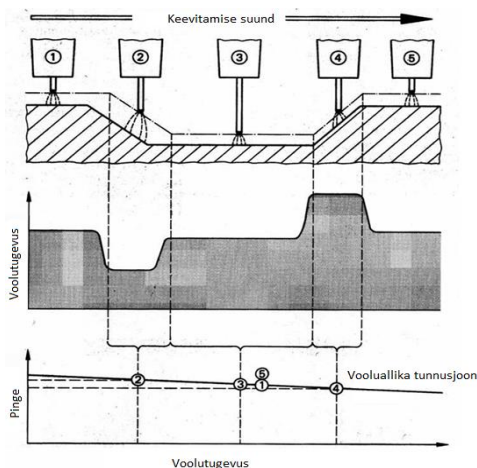
Joon. 4.7 Keevitusvoolu tsüklogramm. Näitamata gaasi järelvool.

4.3 MIG/MAG-keevitus

Kuulub kaitsegaaskaarkeevituse rühma, kasutatakse pidevat sulavelektroodi traadi kujul. Poolautomaatkeevitus, USA-s GMAW (gas metal arc welding), Euroopas MIG/MAG-keevitus, tunnusnumbrid Al-131, terastel 135, 136, 138.

4.3.1 Kaitsegaaskaarkeevituse teoreetilised alused

Kaarepikkuse sisemine iseseaduvus (isereguleeruvus) ja voolukontakti kauguse mõju U ja I -le iseloomustab joonis 4.8, kus keevituspüstol liigub kaldpinnale. Algselt liigub lühiajaliselt tööpunkti 1 punkti 2, kuid edasi liigub punkti 3.

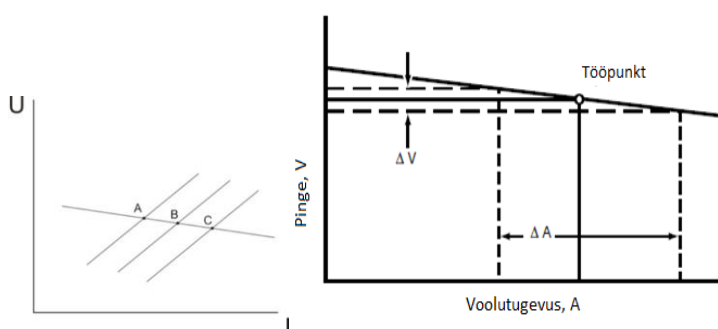


Joon.4.8 Kaare pikkuse sisemine iseseaduvus e isereguleeruvus

Tegelikult tööpunkt ei liigu tagasi lähtepunkti esialgse asukoha taastumisel, vaid nihkub keevituspüstoli kaugenedes detailidest natuke esialgsest väiksema voolutugevuse suunas, mis tingitud pikema väljaulatava traadiosa takistusest põhjustatud pingelangusest.

Lühike ja pikk keevituskaar.

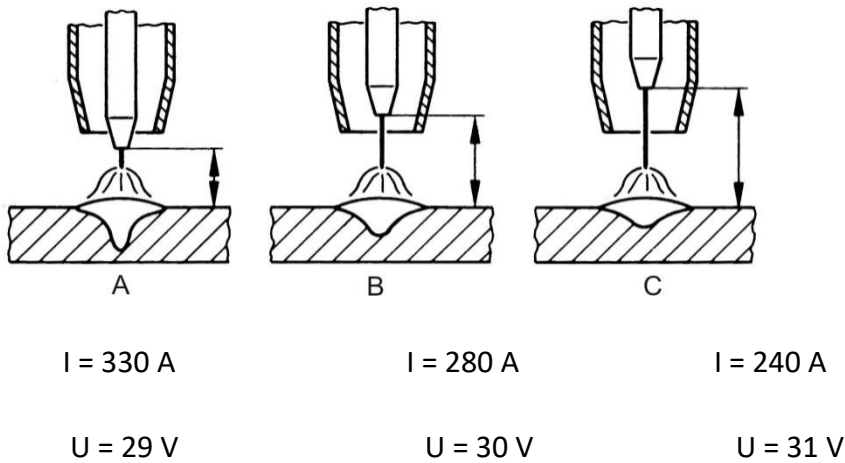
Kaare pikkuse iseseaduvuse (isereguleeruvuse) mõistet lühiajaliselt tekkiva pikema või lühema kaare pikkusega ei tohi ajada segamini poolautomaadi ebaõigel häälestamisel (reguleerimisel) tekkiva pika või liiga lühikese keevituskaarega. Keevitustoolu suurus reguleeritakse traadi etteandekiiruse muutmisega ehk söötmise kiirusega, mis on võrdeline keevitustoolu suurusga: suure traadi etteandekiiruse ehk suure voolu korral tekib liiga lühike kaar (punkt C) ja liiga väikese traadi kiiruse ja väikese voolutugevuse korral liiga pikk kaar (punkt A) koos eelpoolmainitud iseloomulike puudustega. Poolautomaadi seadistamisel tuleb leida katseliselt, **kaare iseloomuliku hääle järgi**, optimaalne tööpunkt B teljestikus U-I (joon.4.9).



Joon. 4.9 Vooluallika tunnusjoon ja kaare tunnusjooned: B – tööpunkt, C – liiga lühike kaar, A – liiga pikk kaar

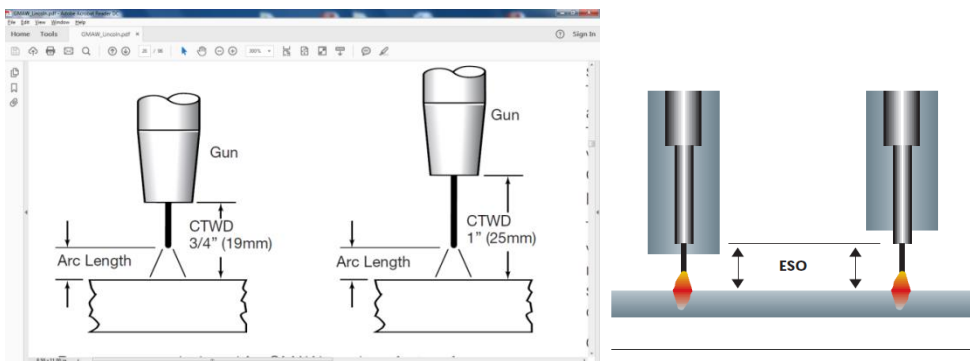
Voolukontakti (püstoli)kauguse mõju

Keevitamisel kontrollib keevitaja keevituspüstoli kaugust detailidest e voolukontakti kaugust.

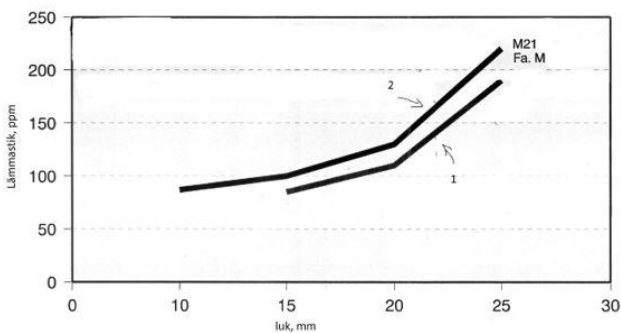


Joon. 4.10 Voolukontakti kauguse mõju

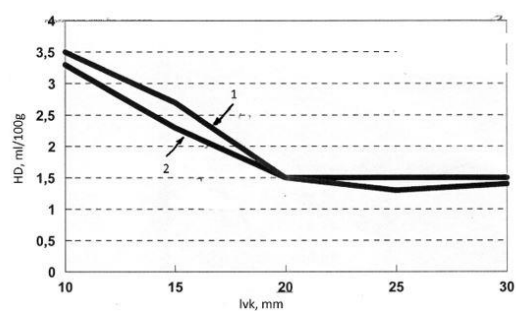
Voolukontakti kaugenedes detailist võidakse kaarevahemikku kaitsegaasi pöörise tõttu kaarevahemikku imeda õhku ja tulemusena võib tekkida poorne õmblus. Keevituspõleti liiga lähedal detailidele hoidmisel (väike voolukontakti kaugus) kasvab keevitusvool. Võivad tekkida sulametalli pritsmed ja protsess muutub ebastabiilseks koos voolukontakti ülekuumenemisega ja kiire kulumisega.



Joon. 4.11 Voolukontakti kauguse tähistusi



a)



b)

Joon. 4.12 Voolukontakti kauguse mõju keevismetalli lämmastiku (a) ja vesiniku (b) sisaldusele

Voolukontakti liiglähendamisel kasvab keevismetalli vesinikusisaldus (Joon. 4.12 b), mis võib tekitada keevismetallis külmp pragude riski. Voolukontakti kaugenedes kasvab keevismetalli lämmastikusisaldus.

Lämmastiku mõju keevismetalli omadustele on keerulisem-väikesed kogused võivad tõsta tugevusomadusi, kuid üle optimaalse piiri halvendada.

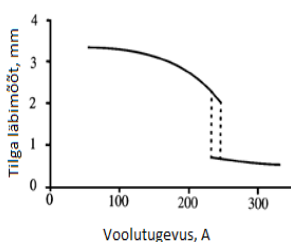
Elektroodimetalli siirdeviisid ja kaaretüübid kaitsegaaskaarkeevitusel.

Kaarlahenduse soojuse mõjul sulab metall keevituselektroodi otsas ja siirdub erineva suurusega sula metalli tilkadena ja viisidel (transfer mode) keevitusvanni. Selle nähtuse füüsikaline sisu ei ole kirjanduse andmetel päris selge. USA-s ja Euroopas on mõnevõrra erinev käsitlus siirdemehhanismide osas. Uurimistöid alustati argooni kui kaitsegaasi kasutamisega. Märgati, et väiksematel voolutugevustel eralduvad elektroodist suuremad ja keskmise suurusega (USA-s axial globular transfer, Euroopas dip transfer) sulametalli tilgad. Voolutugevuse kasvades need tilgad lähevad kontakti keevisvanniga ja lühistavad keevitamise vooluringi. Kui see toimub suhteliselt peenikese traadi kasutamisel ja väikestel voolutugevustel, siis kaasneb küll voolu tõus lühise ajal, kuid seda on võimalik alla suruda vooluallika induktiivpooli (inductance) mähiste suurendamise abil. Süsihappegaasis keevitades kõigepealt traadi ots liigub keevisvanni ja lühistab selle, mille järel tekib sula metalli tilk, mis kasvab suuremaks ja puutub kokku sula keevisvanniga, kaar kustub ja pindpinevusjõudude poolt sula metall imetakse keevitusvanni. Edasi protsess kordub. Selline siiret nimetatakse **lühi(s)kaarsiirdeks** (short circuiting transfer) ja kaart lihtsustatult lühikaareks. Edasisel voolutugevuse suurendamisel kasvab lühisvool ja suure sula metallitilga kokkupuutel keevisvanniga aurustub osa keevisvannist ja eraldub palju sulametalli pritsmeid. Sellist siiret nimetatakse Euroopas **jämetilksiirdeks** (globular transfer) ja kaart vahekaareks. Osa teoreetikuid ei tunnista sellist kaare tüüpi lühikaare ja pikk-kaare vahel. Edasisel voolutugevuse suurendamisel kalduvad suured sula metalli tilgad kaarest kõrvale, nendes lahustunud gaasid eralduvad plahvatuslikult ja keevitamine süsihappegaasis muutub praktiliselt võimatuks ja kaart nimetatakse pikk-kaareks (long arc, repelled transfer), mis ei leia praktilist kasutamist.

Uurimistööd argooni kui kaitsegaasi kasutamisel ja segugaaside Ar-CO₂ kasutamisega näitasid, et suurtel voolutugevustel (kriitilistel voolutugevustel) ja sellega vastavuses oleva kaare pinge korral eralduvad suurel hulgal peenikesed sula metalli tilgad ilma lühisteta ja kasvab järsult pealesulatatud metalli mass. Sellist siiret nimetatakse **pihustussiirdeks** (spray transfer, spray metal transfer), kaare tüüpi pihustuskaareks.

Kriitilise keevitusvoolu mõiste

Esineb Ar-põhiste kaitsegaaside kasutamisel, kus teatud voolutugevusel (transition current) tekib pihustussiire ja pihustuskaar.



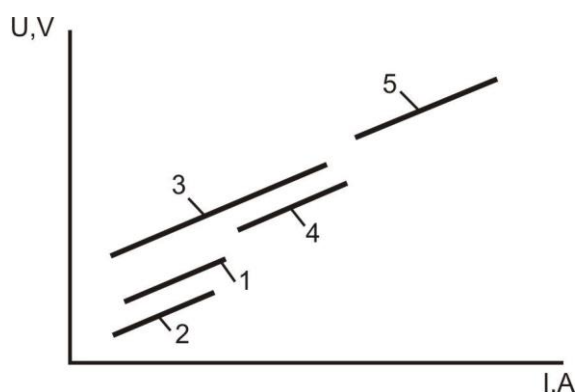
Joon.4. 13 Elektroodilt eralduvate sula metallitilkade suurus sõltuvalt keevitusvoolu tugevusest keevitamisel argoonis

Sõltuvalt kaitsegaasi liigist (Ar või CO₂) ja kaare pingest eristatakse järgmisi elektroodimetalli siirdeviise (transfer mode) ja ka kaare tüüpe.

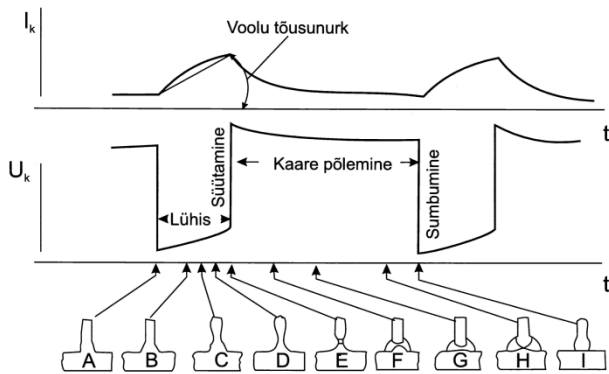
Tabel 4.2 Elektroodimetalli siirdeviisid ja kaare tüübid terase keevitamisel

Tähis tus	Saksa tähistus	Inglisekeelne termin	Kaare pinge, iseloomustus, kasutus	Eestikeelne nimetus ja kaaretüüp
D	k	Short-circuit transfer (dip transfer)	U = 15-20 V, õhuke plekk, kõigis asendites	Lühistega siire, lühikaar, peenikeste ja keskmiste tilkadena siire
G	ü	Globular transfer	U = 20-26 V, keskmise paksusega(4-6mm), ka asendid PG ja PC	Jämetilksiire, vahekaar, üleminekukaar, osaliselt lühistega, osaliselt jämetilkadena, ebakorrapärane siire
S	s	Spray transfer, axial spray transfer	U = 25-38 V, paksem materjal, kõrge tootlikkus, ainult asendites PA ja PB	Peentilksiire, pihustuskaar), ilma lühisteta ühtlane siire peentilkadena
P	p	Pulse transfer		Impulssiire, impulsskaar, pulsskaar), ilma lühisteta ühtlane peentilksiire

Teoreetiliselt pikk-kaart CO₂.U >28-30V, pritsmetega jämetilksiire, ei kasutata.

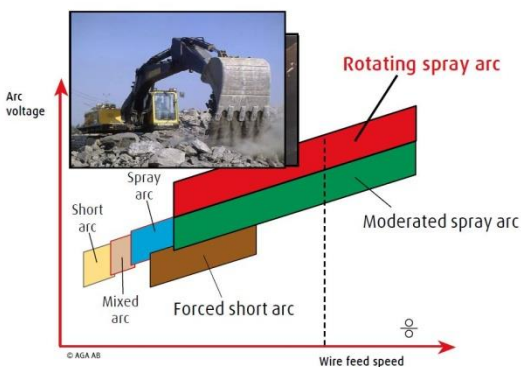
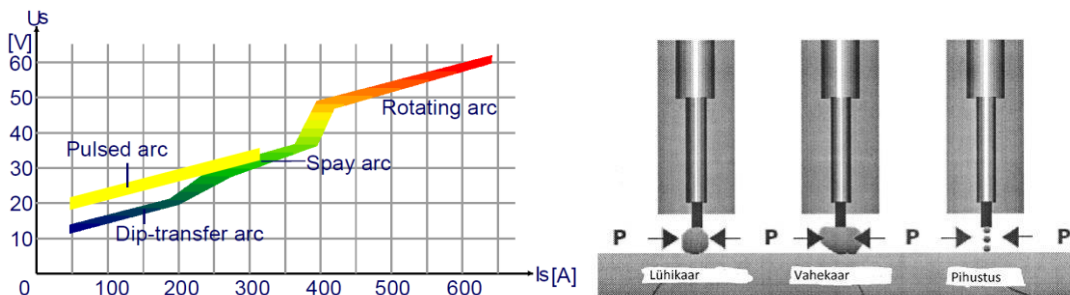


Joon. 4.14 Keevituskaare ja keevitusprotsesside põhitüüpe: 1 – lühikaar, 2 – CMT, Cold Arc, 3 – impulsskaar, 4 – vahekaar, 5 – pihustuskaar



Joon. 4.15 Keevituskaare pinge ja keevitusvoolu muutused lühikaarkeevitusel

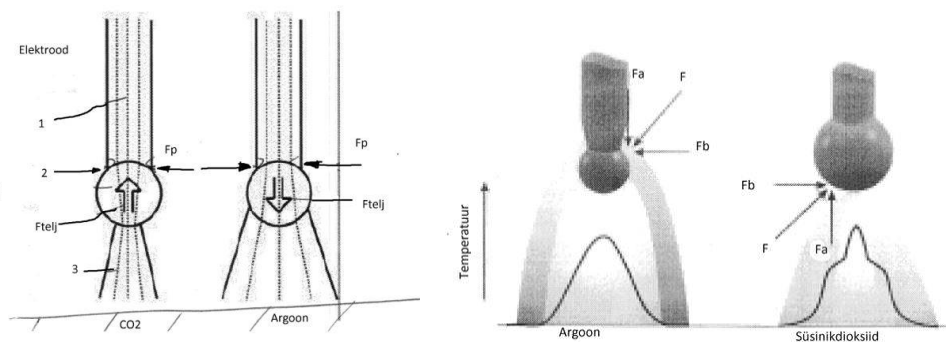
MIG/MAG-keevitusel kasutatakse sõltuvalt keevititava materjali paksusest, keevitusasenditest, tootlikkuse jt tingimustest erineva siirdeviisiga kaaretüüpe. Keevitusinsener tunneb nende siirdeviiside iseärasusi ja näitab siirdeviisi (transfer mode) keevitustehnoloogilisel kaardil-eelspetsifikaadil pWPS ja kasutab neid teadmisi edasisel uute keevitusprotseduuride kehtivuspiiride määramisel. Näiteks standardi ISO 15614-1 järgi lühikaarega keevitamine laieneb kehtivuspiirides ainult lühikaarega keevitamisele, kuid pihustuskaarega keevitamine laieneb ka teistele siirdeviisidele, välja arvatud lühikaarega keevitamine. Lühikaarkeevituse edasiarendused on: voolu tõusu ja kõverat juhitakse tarkvara abil või induktiivsuse muutmise kaudu.



Joon. 4.16 Klassikalised ja täiustatud kaaretüübid

Pihustuskaare tekkemehhanism

Pihustuskaare tekkimist on kirjanduses kirjeldatud keevitustraadi otsale mõjuvate jõududega keevitamisel Ar ja CO₂, kaare samba kujuga ja asjaoluga, et kas kaar ümbritseb voolujuhist keevitustraati või on kontsentreeritud sula metallilga otpinnale, voolutiheduse muutumisega traadis ja kaares ja kaitsegaasi soojusjuhtivusega erinevatel temperatuuridel (Joon. 4.17). Kevitustraadi otsas tekkinud sula metalli tilgale mõjub ülalt-alla raskusjõud, alt-üles plasmavoo reaktsioonijõud ja pindpinevusjõud, mis takistavad metallilga eraldumist ja tilk omandab sfäärilise kuju. Elektrivoolu ja magnetvälja koosmõjul tekib keevitustraadis radiaalsuunas nn Pinchi jõud, mis üritab eraldada traadi otsa tekkinud sula metalli tilkasid. Kui see voolujuht ei ole silindrilise kujuga ja oma läbimõõdult erinev, siis tekib suurema või väiksema läbimõõduga alas sulametalli tilgale mõjuv teljesuunaline jõu komponent. Kui teljesuunaline komponent mõjub ülalt alla, siis ta soodustab metallilga eraldumist, mis esineb keevitamisel argoonis ja seejuures reaktsioonijõud ei ole märkimisväärsed. Kui komponent on suunatud alt-üles, nagu keevitamisel süsihappegaasis, siis võib ta hoida metallilka traadi otsas kinni ja nii soodustada tema läbimõõdu kasvu. Süsihappegaasis keevitamisel selgitab kaare samba kontsentreerumist tilga otsale ka temperatuurivälja terav tipp süsihappegaasi kasutamisel võrreldes argooni kasutamiselega, mis on tingitud asjaolust, et kõrgetel temperatuuridel kaare samba keskel süsihappegaasi soojusjuhtivus väheneb (vt joon.4.19) ja soojus ei levi samba välisosale ja nii tekib terava tipuga temperatuurikõver ja suur voolutihedus tilga otsal. Argooni soojusjuhtivus ei muutu oluliselt temperatuuri tõustes ja saadakse traadi otsas laiem kaare samm, radiaaljõud eraldavad traadist peenikesed sula metalli tilgad, mis liiguvad keevitusvanni. Süsinikterase keevitamisel puhtas süsihappegaasis ei ole võimalik pihustussiiret saavutada, kuid seda on võimalik 75-80% argooni lisamisel ehk segugaasi kasutamisel. Vase ja alumiiniumi keevitamisel kasutatakse pihustuskaare saamiseks heeliumi, millele on lisatud 20-25% Ar.



a) b)
Joon. 4.17 Traadi otsale mõjuvad jõud: a- CO₂; B- Ar

Kaitsegaaside mõju keevisõmblustele

Kaitsegaasid kuuluvad keevituse **abimaterjalide (auxiliar materials)** hulka ja nende ülesandeks on kaitsta kuuma kui ka sulas olekus elektroodimetalli kui ka keevitusvanni õhu keskkonna negatiivsete mõjude eest. Kaitsegaasi omadused mõjutavad keevitusprotsessi. Erinevad gaasifirmad pakuvad keevitamiseks laia valikut kaitsegaase erinevate kaubamärkide all, mis võivad rahuldada väga erinevaid kasutustingimusi. Põhiliselt kasutatakse mitmest gaasist koosnevaid gaasisegusid ehk segugaase. Põhiline kavatsus kasutada gaaside segusid on kombineerida nende positiivseid omadusi

ja kui on võimalik, mitte arvesse võtta ebasoovitavaid mõjusid. Põhimõtteliselt on võimalik ettevõttes ise kokku segada optimaalse koostisega erinevaid gaasisegusid.

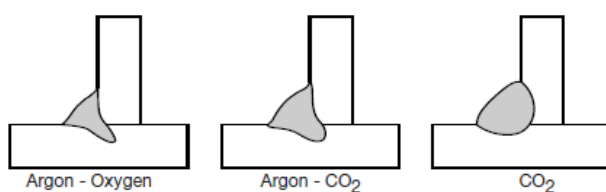
Kaitsegaasi koostis määratleb kaare süütamisomadused ja keevitamiseks vajaliku kaare pinget, elektroodimetalli siirdeviisi ja läbikõrvituse kuju.

Argoon on kergesti ioniseeruv gaas ja tekitab pidevalt põleva kaare. Seda gaasi iseloomustab suhteliselt madal soojusjuhtivus kõrgetel temperatuuridel (Joon. 4.19), mis vähendab kaare tuuma poolt tekitatava soojuse levikut kaugemale detaili ja nii kuumutab kaart kontsentreeritult suhteliselt kitsast ala, mille tulemusena tekib nn sõrmekujuline läbikõrvitus (finger-shape penetration). Sarnase ristlõikega keevisõmblused tekivad segugaasi Ar- CO₂ kasutamisel süsinikterase keevitamisel, soovitatavalt põkkõmbluste keevitamiseks pihustuskaarega.

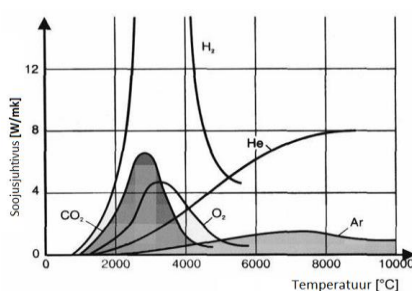
Mõlemad, nii Ar kui ka He ümbritsevad elektroodi otsa ja loovad eeltingimused metalli tilku eraldava Pinch jõudude efekti tekkeks, mis tekitavad pihustuskaare ja ka teised juhivad elektroodimetalli siirdeviisiid.

Süsihappegaas kui aktiivgaas omab kõrget soojusjuhtivust suhteliselt madalatel temperatuuridel, mis esineb kaare välispiirkonnas. Kaare keskel kõrge temperatuuriga südamik piirkonnas on soojusjuhtivus suhteliselt madal. Selle tulemusena surutakse kaare südamik kokku, mis viib suure energiatiheduseni ja ühtlase ja laiemal läbikõrvituse saavutamiseni. Kaare kokkusurumine intensiivistub, kuna CO₂ osaleb aktiivselt keevitusprotsessis. Kuuma elektroodi otsa piirkonnas ja kaares süsihappegaas dissotsieerub ja energia eraldumise ja neeldumisega kaares reaktsiooni järgi: $2\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2 + 564\text{kJ/mool}$.

See võtab energiat kaare südamikust ja kaart surutakse veel rohkem kokku. Teiselt poolt kokkupuutes suhteliselt külma tooriku pinnaga süsinikmonooksüüd ja hapnik rekombineeruvad uuesti, moodustades süsihappegaasi, andes algselt absorbeerunud energia üle sulale keevitusvannile. See võib viia keevisvanni suurenemisele (vt laiem ristlõige). Dissotsiatsiooni tulemusel põhjustab vabanenud hapnik eriti suure Mn ja Si väljapõlemise keevisõmblusest. Keevitustraadi valikul tuleb sellega arvestada ja CO₂ keskkonnas keevitades peab traat olema kõrgemalt legeeritud Mn ja Si kui Ar põhise segugaasi kasutades. Selline täiendava hapniku tarbimine võib viia puhta süsiniku tekkeni ja keevismetalli kõvaduse tõusuni või roostevabade teraste korral terade piiril kroomkarbiidide tekkeni ja interkristallitse korrosiooni arenemisele.



Joon. 4.18 Kaitsegaasi mõju keevisõmbluse ristlõikele

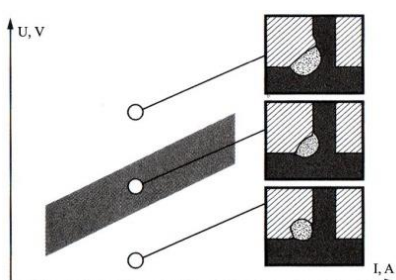


Joon. 4.19 Gaaside soojusjuhtivuse vs temperatuur

4.3.2 Keevitusparameetrite ja keevitamise sooritustehnika mõju

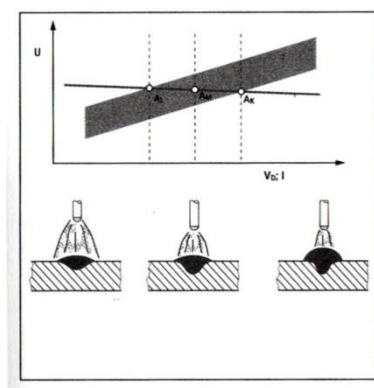
Sõltuvalt keevitava materjali paksusest vajatakse erinevat kaare võimsust, mis seotud kombinatsiooniga U-I ja elektroodi siirdemehhanismiga keevitusvani.

Elektroodi siirdemehhanism sõltub kaare pingest ja voolu tugevusest (traadi etteandekiirusest) ja on näidatud keevituskaare piirkondadena. Vahekaar e üleminekukaar eksisteerib kitsas voolutugevuste vahemikus ja sõltub keevitustraadi läbimõõdust, kasutatakse teoreetiliselt kuni nt 4 mm paksusega teraslehe keevitamisel. Poolautomaadi tavaseadistamisel ehk reguleerimisel antakse ette kaarepinge ja seejärel reguleeritakse voolutugevust (traadi etteandekiirust).



Joon. 4.20 Liiga kõrge kaare pinge ja madala kaare pinge mõju nurkõmbuse kujule

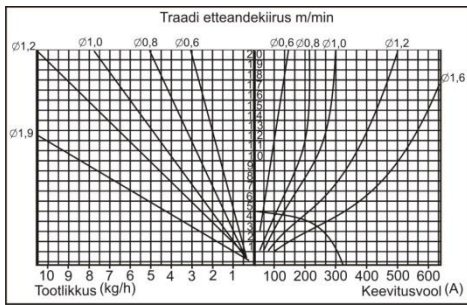
Voolu tugevust reguleeritakse-seadistatakse traadi etteandekiiruse muutmisega.



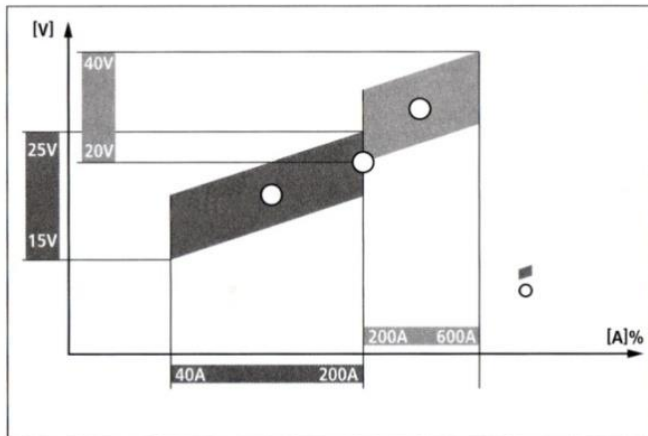
Joon. 4.21 Keevitusvoolu mõju tööpunkti asukohale, kaare pingele ja õmbuse ristlõikele

Voolutugevust võrreldes kaare pingega saab muuta suures vahemikus, ja see parameeter mõjutab kaare võimsust. Dokumentatsioonis (WPS) antakse reeglina traadi etteandekiirus ja mõõdetakse voolu tugevust keevitamise käigus. Võimalik on orienteeruvalt määrata voolu tugevust traadi etteandekiiruse abil allpooltoodud (Joon.4.22) graafikutelt.

Eelpooltoodust selgub, et keevitusparameetrite aken pakub suure hulga U-I kombinatsioone, millest katsekeevitamisega valitakse optimaalsem.



Joon. 4.22 Keevitraadi etteandekiiruse ja keevitusvoolu vaheline seos

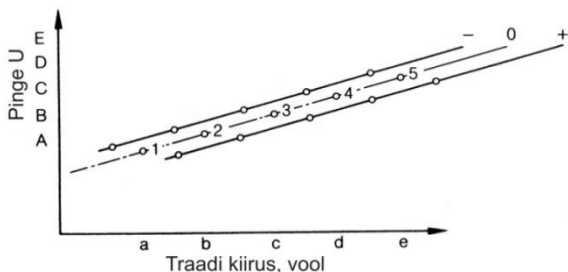


Joon. 4.23 Keevitusparameetrite aken

Keevituse poolautomaadi häälestamine ja juhtimine. Tava- ja sünergiline juhtimine

Tavamasinates kasutatakse keevitusparameetrite seadistamiseks nn kahe juhtimisnupuga skeemi, kus ühe lülitusnupuga seadistatakse kaare pinget ja teise potentsiomeetriga muudetakse traadi etteandekiirust e keevitusvoolu. Vajadusel on võimalik vähendada keevituspritsmeid vooluallika väljundahela induktiivsuse muutmise teel, näiteks maanduskaabli ümbertõstmisega erinevatesse kaablipesadesse.

Tänapäevastes masinates kasutatakse **sünergilist** ehk ühe nupuga juhtimist, kus seostatakse kaare pinget vastava elektrilise ahela kaudu traadi etteandemehhanismi pöörlemisagedusega. Sünergilise juhtimise korral sisestatakse juhtpaneelil materjali tüüp ja materjali paksus, keevitusparameetrid kuvatakse juhtpaneelil. Vajadusel saab korrigeerida tööpunkti asukohta, muutes kaare pinget, muuta väljundahela induktiivsust, kasutades muid poolautomaadi lisafunktsioone.

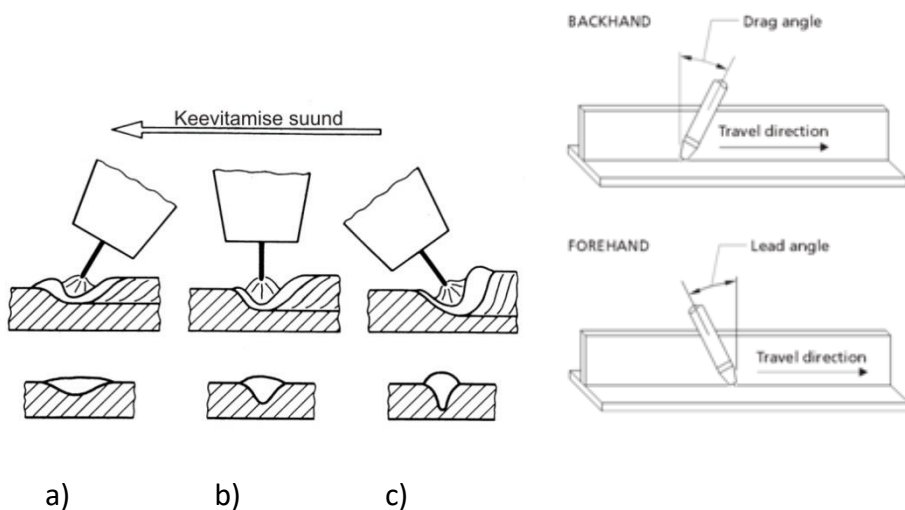


Joon. 4.24 Keevitusparameetrite sünergiline karakteristika. Sisestatakse materjali paksus.

Keevitamise sooritustehnikad

Tavaliselt kasutab keevitaja sellist keevitustehnikat, kus keevituspüstol liigub keevitaja poole ja kaar on suunatud kuumutatud servadele e vedavat tehnikat (backhand welding) (Joon. 4.25).

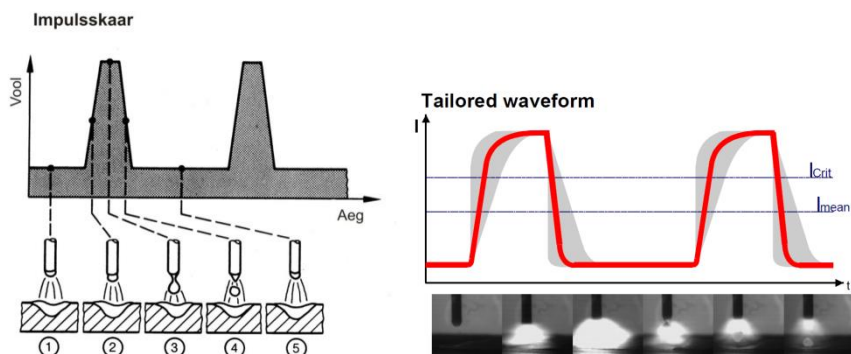
Vertikaalõmbluste keevitamisel ei ole soovitatav paksema materjali korral keevitamisel sellist sooritustehnikat, kuna sula keevismetall võib voolata faasitud servadele ja neid katta, mistõttu kaar ei saa vahetult toorikute servi sulatada. Sellise juhul tuleb kasutada püstoli endast eemale liikuvat tehnikat ehk tõukavat tehnikat. Kogenud keevitaja valdab mõlemat sooritustehnikat. Teoreetiliselt on võimalik juhtida püstoli kaldenurga muutmise abil masinkeevitusel keevisõmbluse kuju ja ristlõiget.



Joon. 4.25 Keevitamise sooritustehnikad

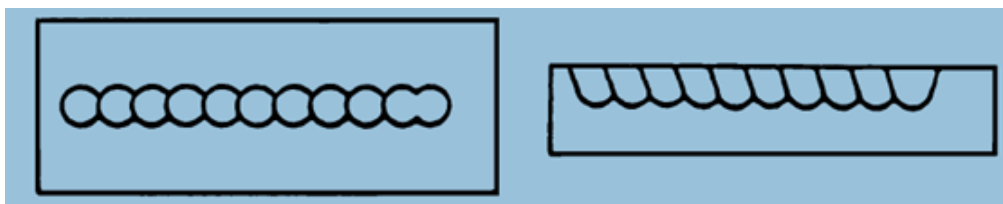
4.3.3 Impulssvooluga keevitamine, pulssvooluga keevitamine

Pihustuskaar saavutatakse impulssvooluga keevitades allapoole keskmist kriitilist voolu tugevust, kus iga voolu impulsi korral eraldub keevitustraadi otsast üks või enam sula metalli tilka. Suure traadi etteandekiiruse ja impulsside sageduse korral impulssfaas kasvab peaaegu kokku ja moodustub üks voolu plato, millega kaasneb väga tootlik pihustuskaar. Kaasaegsed vooluallikad võimaldavad muuta voolu tõusu kiirust, impulsi kestust ja voolulanguse kõvera kuju, mis võimaldab saada parima tulemuse. Tootlikkus (pealesulatustegur) on reeglina väiksem, kuid soojussisestus suurem kui alalisvooluga keevitades. Impulsskeevituse põhiparameetrid on: traadi etteandekiirus, baasvoolu suurus, impulsi voolutugevus, pinge, kestus ja kuju.



Joon. 4. 26 Voolu muutuse kõverad ja elektroodi siire **mittejuhitava** (non waveform controlled power source) lainekujuga ja **juhitava** lainekujuga (controlled waveform) impulssvooluga keevitamisel

Impulsskeevituse ajal väikese baasvoolu ajal keevitav põhimaterjal jahtub ja nii võidakse saavutada väiksemad kujumuunded roostevaba terase ja alumiiniumi keevitamisel (Joon.4.27)



Joon.4.27 Impulssvoolu termiline mõju

Impulssvooluga keevitamise eelised:

- keevitusprotsess täielikult kontrollitav ja pritsmevaba;
- väiksemad keevituskujumuunded, sobib hästi õhukese Al ja roostevaba terase keevitamiseks;
- stabiilne kaar lubab kasutada jämedamat keevitustraati - see tähtis Al keevitamisel, kuna pehme traat või ette söötmisel kinni kiiluda;
- nurkõmbluste keevitamisel saavutatakse parem juure läbikeevitus e kaar sulatab keevisõmbelse kaugeima punkti;
- väiksem metalli tilkade ülekuumutus ja eraldub vähem kahjulikku keevitussuitsu.

Impulssvooluga keevitamise puudused:

- üldiselt tootlikkus (pealesulatustegur, pealesadestustegur) väiksem kui lühikaarkeevitusel;
- kasutamine piiratud Ar põhise segugaasi kasutamisega.

4.3.4 Keevituse poolautomaadi ehitus

Vooluallikad

Lihtsaim MIG/MAG või GMAW tavavooluallikas, nn trafomasin mis sisaldab:

- Trafo, mida kasutatakse jäiga tunnusjoone (CV) piirkonnas. Ülesanne on alandada pinget ja reguleerimine toimub astmeliselt trafo mähiste ümberlülitamise teel.
- Alaldi, mis muudab vahelduvpinge alalispingeks.
- Induktiivpool e drossel, uuemates seadmetes ka reaktorpool väljundahelas, mis muudab ühtlasemaks väljundil voolu kõikumised ja piirab voolu kasvu kiirust vooluahela lühise korral.
- Juhtsüsteemi kontrolleri, mis koordineerib kogu MAG seadme seadmestikku (traadi etteandja, kaitsegaasi klapp) ja juhib protsessi kulgemist. Selline vooluallikas **ei vasta** tänapäevastele tööstuse nõuetele.

Tänapäevaste vooluallikate struktuur on palju keerulisem ja seade koosneb **elektroonilisest invertervooluallikast**, mida iseloomustab väike mass, head dünaamilised omadused, tagasisideahela kaudu tagatakse parameetrite stabiilsus, võimalus kiire reageerimisajaga ehk suure sagedusega muuta ja juhtida keevitusvoolu ning kaare pinget keevitusprotsessis. Digitaalne kiire **signaali**

protsessor koordineerib kõigi seadme osade süsteemi tööd. Seade võib olla varustatud voolutugevuse sensoritega, mille abil saab keevitusparameetreid hoida erinevates olukordades stabiilsetena.

Ettevõtte keevitusinseneri ülesandeks on tagada seadmete perioodiline hooldus vastavalt koostatud ajagraafikutele. Võidakse nõuda tellija poolt MAG-seadme kalibreerimist, mille käigus kontrollitakse traadi etteande kiiruse ja ampermeetri näitude vahelist seost.

4.3.5 Täidistraatkeevitus (protsessid 136, 138)

Täidistraadid (tubular cored wires) saadakse tavaliselt traadi tõmbamisega.

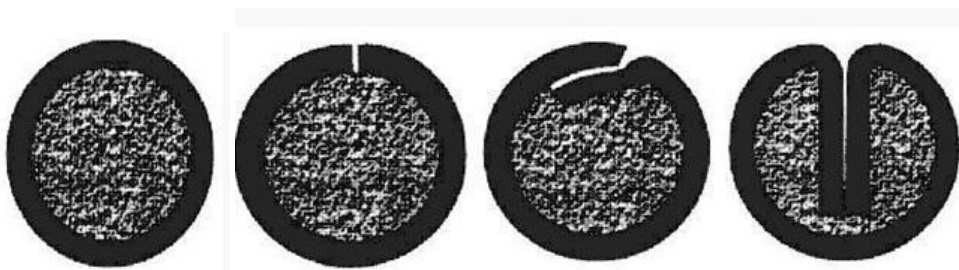
On justkui tegemist ümberpööratud käsikaarkeevituse elektroodiga, kus südamik on elektroodi kätte omadustega ja torukujuline ümbris ehk kest on voolujuhtiv element. Valmistatakse nii õmbluseta (seamless) kui ka õmblusega (closed-shape) täidistraate. Torukujuline ümbris on valmistatud plastsest materjalist ja täidis võib olla metallipulber või rübusti pulber. Legeerelemendid on samuti on viidud täidisesse. Õmblusega täidistraatide puuduseks on nende madal kuju stabiilsus ja nad võivad kergesti saada kahjustatud traadi etteanderullide liigsuure surve tõttu, samuti ladustamisel võimaliku niiskuse imendumise tõttu täidisse õmbluse pilu kaudu.

Õmbluseta täidistraadid ei deformeeru etteanderullide vahel nii kergesti, sisaldavad rohkem täidist ja ei ima niiskust. Puuduseks on nende mõnevõrra kõrgem valmistushind. Õhuke traadi kest sulab täielikult kergemini ja samuti pulbriline täidis, mistõttu väheneb õmbluse pikkusühiku kohta tarbitav energiahulk. Täidis võimaldab juhtida keevismetalli mehaanilis-tehnoloogilisi omadusi ja samuti ette anda elektroodimetalli tilkade suurust ja keevitusvanni viskoossust ja ka keevisõmbluse ristlõike kuju. See võimaldab toota täidistraate erilisteks rakendusteks, nt ruumiasendites (out of positions) keevitamiseks, juureõmbluste (mitmekihilise õmbluse esimese läbimi) keevitamiseks (viskoossem keevitusvann, suured metallitilgad, kiiresti tarduv räbu) kui ka hea väljanägemisega pinna täiteläbimite (cover passes) keevitamiseks (suur keevitusvann, elektroodi pihustussiire, heade märgamisomadustega ja aeglaselt tarduv räbu). Piiratud kasutamist leiavad isekaitsvad ehk ilma kaitsegaasita keevitavad täidistraadid (self shielded wires) tööks välitingimustes.

Täidistraatide eelised täistraatide ees:

- voolutihedus täidistraadis võrreldes täistraadiga kasvab kuni 60% A/mm², suureneb pealesulatustegur;
- minnakse üle pihustuskaarele väiksematel voolutugevutel;
- sobivad hästi ruumiasendites keevitamiseks.

Tavaliselt kasutatakse täidistraate paksema kui 3 mm terase keevitamisel, nt laevaehituses. Paksu materjali korral on suurema tootlikkuse (pealesulatustegur) tõttu vaja vähem keevitajaid. Kirjanduse ja tootjate soovitusel eri tüüpi täidistraatide kasutamiseks on sageli vastuolulised.



Joon. 4.27 Täidistraadid

Tabel 4.3 Täidistraatide omadused

Metallpulbertäidisega täidistraadid (metal-cored wire). Protsess 138	Täidistraadid pulbertäidisega (flux -cored wire) Protsess 136		
Metallpulbertäidisega, M-täht	Rutiiltäidisega (R või P täht)		Aluselise täidisega (B täht)
Puudub pidev räbu, kuid õmbluse pinnal räbu tilgad. Allasendis PA pihustuskaarega, eraldub palju keevitussuitsu	Aeglaselt tarduva räbuga, P-täht (slow freezing slag) Allasendis keevitamiseks (PA,PB)	Kiiresti tarduva räbuga R-täht (fast freezing slag) Ruumiasendites keevitamiseks. Keevituskiiirus suurem kui 135 protsessil.	Tekib räbu. Sobib keevitamiseks kõigis asendites: -lühikaarega ruumiasendites -pihustuskaarega allasendis PA
Kõrge tootlikkus PA ja PB asendis pihustuskaarega, täiteläbimid	Eriti head keevitusomadused -vähe pritsmeid; -õmbluse hea ja ühtlane väljanägemine ja sileda pinnaga.		Eriti head keevitusomadused ruumiasendites
Saab keevitada ülalt-alla püstasendis PG ja s juureläbimite keevitamiseks	Hea õmbluse servade kokkusulatamine ja liitevea risk väike		Vähem tundlik pinna ebapuhtusele, parem õmbluse hermeetilisus
Sobib torude keevitamiseks	Hea räbu eemaldatavus		Sobib jäikade paksust terasest sektsioonide keevitamiseks, eriti juureõmbuste jaoks
Sobib robotkeevituseks	Kiiresti tarduva räbu korral võivad tekkida püstised gaasisuletised õmbluses, tingituna mustusesest traadi pinnal või detailide servadel		Eriti hea keevismetalli löögisiskus
Sobib hästi juureõmbluste keevitamiseks	Juureõmbluste keevitamisel kasutatakse eemaldatavat (keraamilist) juuretuge		Võib kasutada välitingimustes tuule kiirusel kuni 5 m/s

4.3.5 Täiustatud MAG-keevitusprotsessid

Traditsioonilised MIG/MAG-keevitusprotsessid, kus kasutatakse alalisvoolu või sümmeetrilise kujuga pulssvoolu, ei võimalda tänapäeval edukalt lahendada järgmisi ülesandeid:

- õhukese materjali (alates 0,3 mm) keevitamist,
- kvaliteetse juureõmbluse e esimese keevitusläbimi keevitamist, näiteks torude keevitamisel,
- keevitada suure detailidevahelise õhupilu korral,

- paksu materjali keevitamist suure läbikeevituse sügavusega,
- keevitusprotsessi stabiilsust keevituspüstoli ja voolukontakti kauguse muutudes.

Viimastel aastakümnetel on MIG/MAG-protsesse arendatud järgmistes suundades:

1. Täiustatud lühikaarkeevitus kaubamärkide all: CMT, Cold Arc, Fastroot, STT, RMD jt;
2. Forsseeritud pihustuskaarkeevitus: Force Arc, Rapid Arc jt;
3. Pulssvoolu kasutamise ja vooluimpulsside juhtimisega.

Digitaalselt juhitud lühikaarprotsessid (digitally controlled, digitally regulated short arc processes) on arendatud peamiselt pritsmetevabaks lühikaarega keevitamiseks. Elektrodimetalli siirdeprotsessi on uuritud kiirfilmimisega ja saadud tulemusi interpreteerides juhitakse tarkvaraga voolu muutumise kõvera kuju. Digitaalselt juhitava protsessiga saab keevitada edukalt õhukest materjali paksusega 0,3-0,5 mm. Väga madal keevitamise soojussisestus teeb selle lahenduse ideaalseks erinevate metallide segaliidete keevitamiseks. **Kõrgtootlikud kaitsegaaskaarkeevituse protsessid** (high productivity gas shielded metal arc processes) alla kuuluvad keevitusprotsessid suurema traadi etteande kiirusega kui 15m/min ühe või mitme traadisüsteemi kasutamise.

Kokkuvõte

Käsikaarkeevitus

1. Käsikaarkeevituse elektrodide keevitus-tehnoloogilised ja liite mehaanilised omadused sõltuvad elektroodi katte tüübist, mida kajastab suurel määral elektroodi klassifikatsiooni tähistus.
2. Erinevate tööde jaoks kasutatakse erineva kattega elektroode: ehituskonstruktsioone keevitatakse tavaliselt R, RR ja RC kattega, surveanumad jm vastutusrikkad tooted-B kattega elektrodidega. Iga terase margi jaoks sobiva elektroodi leiab tootekataloogidest.
3. Käsikaarkeevituse elektroodi kate, eriti B-tüüpi, võib imada keskkonnast niiskust ning põhjustada keevismetallis poore ja tugevates terastes külmpirgude riski, mistõttu tuleb neid valmistajate soovitude kohaselt enne kasutamist kuivatada.

MIG/MAG-keevitus

4. MIG/MAG-keevituse kirjeldamiseks kasutatakse erineva tähendusega mõisteid nagu kaare pikkus või lühike kaar ja lühem kaar. Keevituskaare pikkuse iseseaduvuse mõiste selgitamisel kasutatakse keevituskaare pikkuse isereguleeruvuse mõistet. Poolautomaadi häälestamisel antud kaare pinge juures kaasneb suurema traadi etteandekiirusega suurem keevitusvool ja tekib lühem kaar, mis omakorda tingib läbikeevituse suurenemise. Väikese traadi etteandekiiruse ja madala keevitusvoolu korral tekib pikem kaar, millega kaasneb läbikeevituse vähenemine. Keevituskaare pikkus sõltub sellest, kui palju traadi etteandekiirus või pinge erinevad optimaalse tööpunkti- (U-I) suhtest.
5. Sõltuvalt keevitatava materjali paksusest leitakse vajalik kaare elektriline võimsus $U_x I$. Poolautomaadi häälestamisel antakse ette kaare pinge ja edasi leitakse katseliselt optimaalne keevitusvoolu tugevus. Sünergilisel häälestamisel seadistatakse materjali paksus ja automaatselt leitakse U-I kombinatsioon ehk tööpunkt. Sõltuvalt keevitatava materjali paksusest keevitatakse kas lühi (s) kaarega, vahekaarega või pihustuskaarega. Kaare tüübi näitab keevitusinsener keevitusprotseduuri spetsifikaadil WPS-il.
6. Keevitades argoonipõhistes kaitsegaasides esineb teatud voolutugevuse väärtustel järsk sula elektrodimetalli tilkade läbimõõdu vähenemine, tekib nn pihustuskaar, mida iseloomustab kõrge tootlikkus, kuid piiratud asendiomadused. Seda voolutugevuse väärtust nimetatakse kriitiliseks

voolutugevuseks. Pihustuskaare teket põhjendakse elektroodi otsas tekkiva sula metalli tilgale mõjuvate jõudude skeemiga.

7.Poolautomaatkeevitusel mängib tähtsat rolli püstoli kaugus detailidest ehk voolukontakti kaugus. Kui püstol on liiga lähedal detailidele, siis tööpunkt liigub suurema voolutugevuse poole, mille tulemusena kuumeneb voolukontakt liigselt ja võidakse keevismetalli lisada vesinikku (vt külm- e vesinikpragude risk). Kui keevitaja hoiab keevituspüstolit liiga kaugel (suur voolukontakti kaugus), siis kasvab keevismetallis kaitsegaasi keeriste tekkimise korral õhu pooride risk.

8. Pulssvooluga (impulssvooluga) keevitamisel kasutatakse kaare põlemise tagamiseks madalat baasvoolu, millele lisatakse perioodiliselt kriitilist voolu ületavaid voolu impulsse. Levinud kaasaegsetes seadmetes õhema ja keskmise paksusega materjali keevitamisel ja robotkeevitusel.

9. Paksema terasplaadi keevitamisel on keevitusaja lühendamiseks ja keevitajate vajaduse vähendamiseks otstarbekas kasutada täidistraati. Seejuures kõrgem tootlikkus kompenseerib traadi kõrgema hinna.

10. Poolautomaatkeevituse kasutamisel tuleb arvestada paksemate faasitud detailide keevitamisel kogematu keevitaja korral servade kokkusulamatuse tekke defekti riskiga, mida saab avastada ultrahelikatsetamisega. Nurkõmbuste keevitamine optimaalsest kõrgema kaare pingega võimaldab saada nõgusaid õmbusi, kuid võib tekkida sisselõike ja pealevalgumise defektid. Liigmadala kaare pinge ja väikese keevituskiiruse korral võidakse saada kumerad nurkõmbused.

11. Kaasaegsed poolautomaadid on varustatud keevitaja tööd hõlbustavate lisafunktsioonidega. Vastava lisatasu eest on võimalik hankida ja alla laadida seadme võimalusi laiendavaid tarkvarapakette

12.MAG-keevitus sobib hästi robotkeevituseks ja odavate väikemehhaniseerimisvahendite kasutamiseks.

TIG-keevitus

13.TIG-keevitus põhineb mittesulava elektroodi (W) ja kaitsegaasina inertgaasi (Ar) kasutamisel. Keevitusprotsessi iselomustab madal tootlikkus, kuid kõrge õmbuse kvaliteet. Majanduslikult on kasutamine õigustatud suhteliselt õhukese metalli, tavaliselt roostevaba terase ja Al, harvem Ni ja Cu keevitamiseks.

14.Kasutatakse nii puhtast W kui ka legeerivate lisanditega elektroode. Teraste keevitamisel elektroodi ots teritatakse, Al korral mitte. Teraste keevitamisel kasutatakse alalisvoolu (DC⁻), alumiiniumi keevitamisel vahelduvvoolu AC.

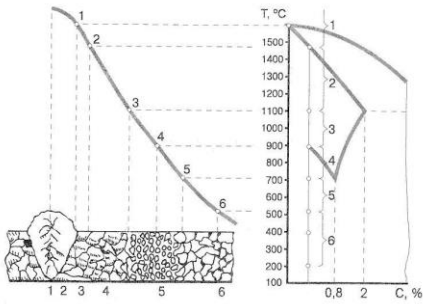
15.Keevitusvoolu tugevus ja elektroodi läbimõõt valitakse sõltuvalt keevitatava materjali paksusest, keraamilise gaasisuudmiku suurus (nr) voolu tugevusest ja liigist.

16.TIG-keevitust saab kasutada torude automaakeevitusena orbitaalkeevituse seadmeid kasutades.

5. Erinevate metallide keevitatus

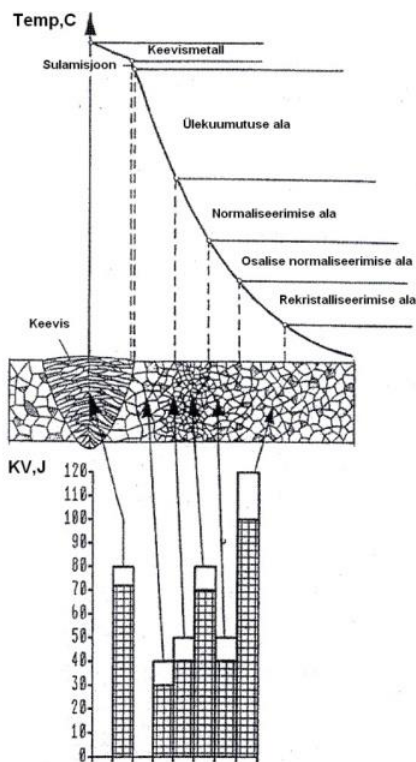
5.1 Keevitamise termotsüklid ja soojuslevi

Keevisliite mikrostruktuuri ja omaduste ebaühtlus



Joon. 5.1 Terase faasidiagramm (0,3%C) ja liite ebaühtlane struktuur

Keevisliite struktuur ja erinevate alade mehaanilised omadused erinevad märgatavalt. Kiirel jahtumisel karastustemperatuuride piirkonnas võib tekkida martensiit ja on võimalik vesinik- e külmpfragude risk (vaata terase keemiline koostis).

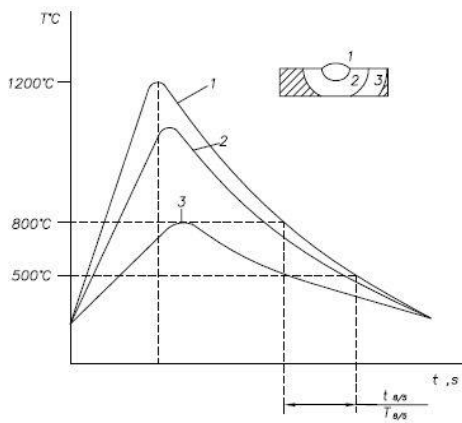


Joon. 5.2 Erinevate liite alade löögisitkus e löökpaindetugevus

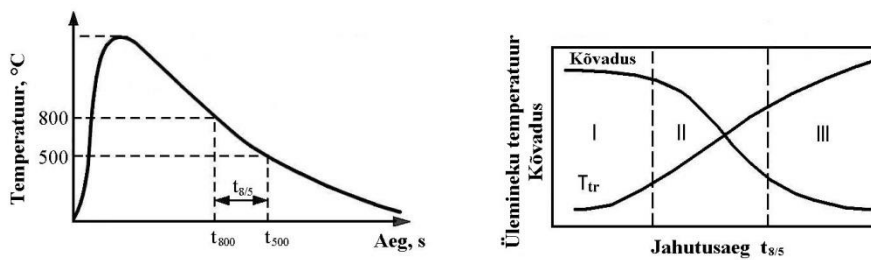
Ohtlikud piirkonnad seotud tera kasvuga või karastusefektiga

Keevituse **soojussisestuse suurendades** väheneb jämedateralise ala löögisitkus, ala laius kasvab.

Keevituse termotsükkel, CCT diagrammid ja $t_{8/5}$ kontseptsioon



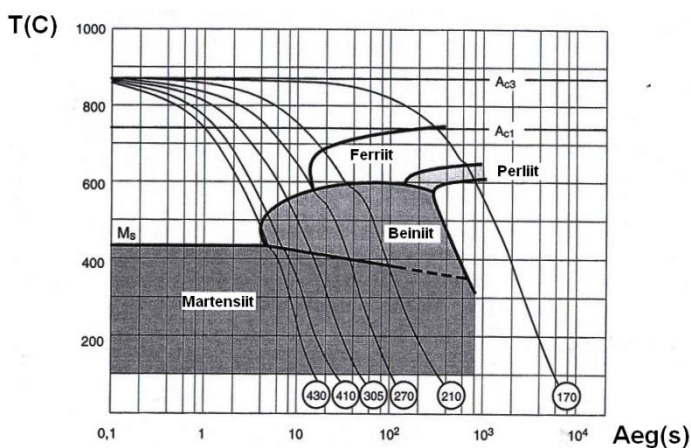
Joon. 5.3 Keevisliite erinevate alade jahtumiskõverad.



Joon. 5.4 Külmhapruse piiri T_{tr} (transition temperature) ja kõvaduse sõltuvus jahtumisajast

Soovitav on tagada jahtumisaeg piirkonnas 2. Jahtumiskiirus on otseselt seotud soojuse levimisega keevisliites. Terase tootjad võivad anda soovitusi oma terasemarkidele $t_{8/5}$ osas.

Kasutatakse keevitustehnoloogias **pidevjahtumise diagramme (CCT)**. Antakse jahtumisaeg temperatuurivahemikus 800-500, tähistusega $t_{8/5}$ kraadini (süsinikteras) või 1200-800 kraadi ($t_{12/8}$ (kõrglegeerteras)).



Joon. 5.5 CCT diagramm terasele mark St E 355 ja kõvadusarvud erinevatel jahtumiskiirustel(Ruukki)

Keevisliite kõvaduse mõõtmise kaudu võime hinnata tekkivaid struktuure ja nende koostist.

Soojuse levimine keevisliites

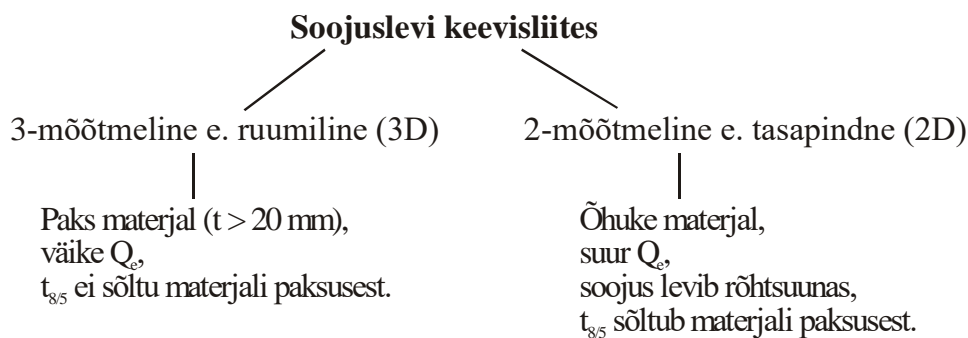
Metalli jahtumisaeg määrab tekkiva mikrostruktuuri ja on juhitav kas soojussisestuse või ettekuumutuse kaudu.

Jahtumisaeg $t_{8/5}$ sõltub:

- soojussisestusest Q_e ;
- liite tüübist (BW, FW); nurkõmblus (FW) jahtub kiiremini kui põkkõmblus (BW);
- ettekuumutusest.

Jahtumisaeg $t_{8/5}$ mõjutab järgmiselt:

- liiga lühike $t_{8/5} \rightarrow$ väike Q_e – karastusstruktuurid, kasvab kõvadus ja võimalikud karastuspraod, võib kasvada löögisitkus;
- liiga pikk $t_{8/5} \rightarrow$ suur Q_e – termomõju tsooni lõõmutus ja noolutus – võib väheneda löögisitkus.
-



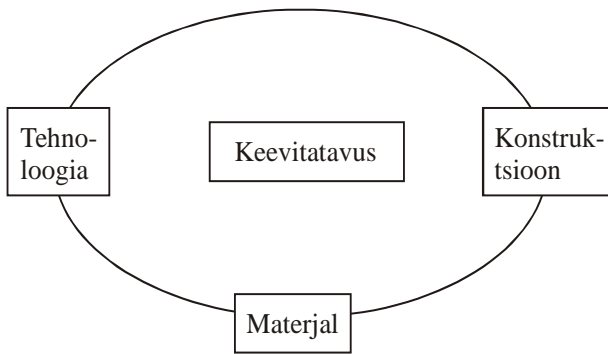
Joon. 5.6 Ruumiline ja tasapindne soojuslevi

Kodutöös programmiga "SSAB Weldcalc 3.0" määratakse automaatselt, kas tegemist on tasapindse või ruumilise soojusleviga ja kasutatakse sellele vastavaid arvutusvalemeid.

5.2 Metallide keevitatus ja selle kriteeriumid

Metallide omadus moodustada antud keevitustehnoloogiaga konstruktiivsetele ja

ekspluatatsiooninõuetele vastavat keevisliidet. Kirjanduses ja eri maades väga erinevad lähenemised ja kriteeriumid.



Joon. 5.7 Keevitatavuse alaosad

Vana keevitavuse liigitus: hea, rahuldav, piiratud, halb-kas tuleb kasutada ettekuumutust või mitte. Tuleb seostada toote kasutusnõuetega eksploatatsioonis.

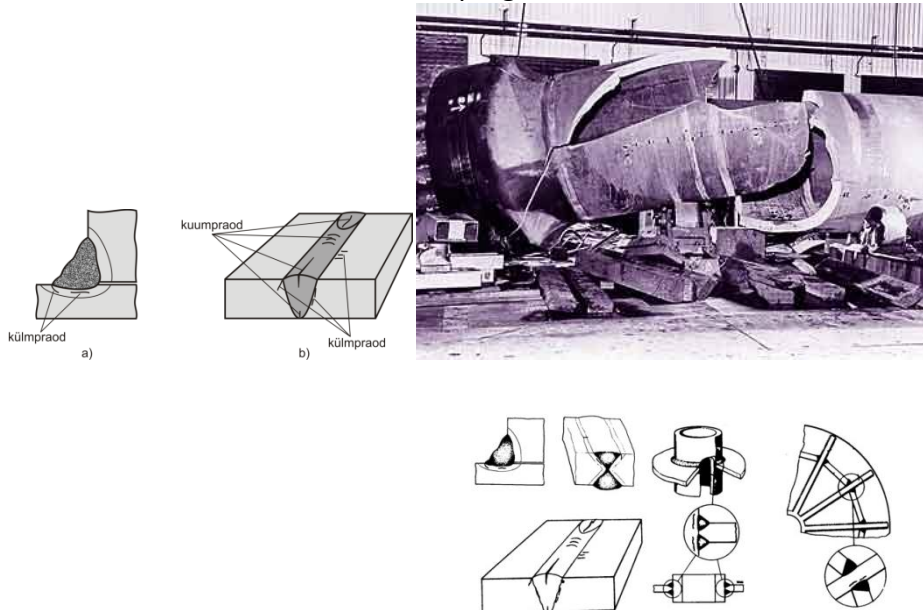
Paljudel juhtudel kasutatakse terminit „kalduvus (tundlikkus) pragudele- susceptibility of cracking“ .

Eksploatatsiooninõuded keevisliidetele:

- mehaanilised omadused (R_m , KCV);
- hermeetilisus;
- korrosioonikindlus;
- kuumuspüsivus, -tugevus;
- töö madalatel temperatuuridel jne.

Keevitavuse kriteeriumid:

1. Kalduvus (risk) külmpragudele; teraste korral vesinikpragudele. Ei ole ühtset seisukohta terminites;
2. Kalduvus kuumpragudele (tardumispraod, likvatsioonpraod);
3. Kalduvus lamellpragudele;
4. Kalduvus korduvkuumutuse pragudele.



Joon.5.8 Praod keevisliidetes ja toote purunemine vesinikpragude mõjul (IIW)

5.2.1 Konstruktsiooniteraste keevitavus

Vesinik (külm)pragude tekkimise põhjused (pragude risk).

Reeglina esinevad keevisõmbuluse kõrval –termomõju tsoonis (TMT-HAZ), aga ka kõrgtugevates terastes keevisõmbuluses. Võivad esineda õhukese teraslehe keevitamisel miinustemperatuuridel või paksu lehe keevitamisel toatemperatuuril, kui teras on antud tingimustes kalduv õhus jahtumisel karastuma. Sageli piiratakse keevitustööde temperatuuri. Keevitustöödel alla +5^o C on vaja keevituskohta ette kuumutada.

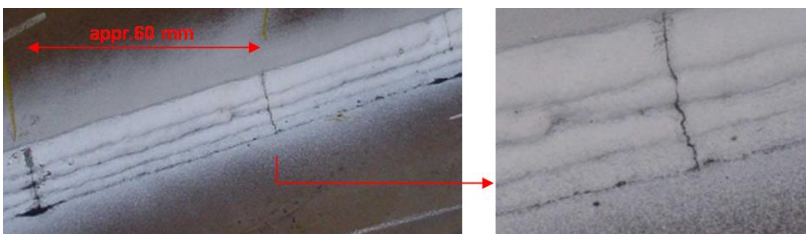
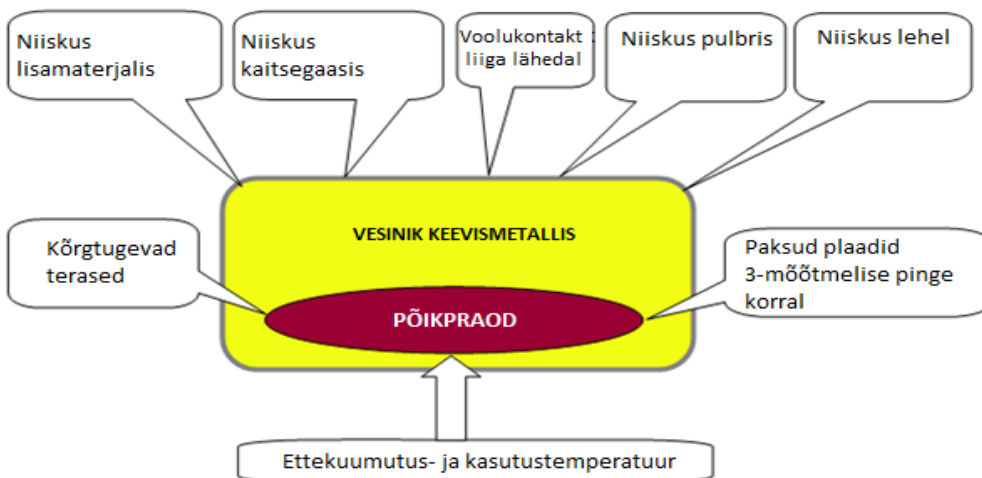
Vesinikpragude tekkimise põhjusteks on:

- vesiniku difusioon,
- põhimetalli karastumine ja martensiidi teke,
- suured keevituse sisepinged ehkjääkpinged.

Kõik kolm eelpoolnimetatud tegurit peavad erinema **üheaegselt**, et tekiks praod.

Karastusefekt: sõltub terase keemilisest koostisest (legeeremendid reeglina suurendavad efekti), jahtumiskiirusest: lehe paksuse suurenedes kasvab, soojussisestuse suurendamisel väheneb, liite tüübist- FW jahtub kiiremini kui B).

Vesiniku difusioon. Vesinik satub keevisõmbulusesse elektroodi kattest, niiskusest detailide servadel ja kaitsegaasis, roostekihist ja mustusest detailide servadel. Pragude tekke inkubatsiooniperioodi tõttu näevad mõned standardid ette keevisliidete kontrolli mitte varem kui 16-40 tundi pärast keevitamist. Vesiniku saab keevisliidest eemaldada, jätkates ettekuumutust pärast keevitamise lõpetamist.



Joon. 5.9. Külmpraod kõrgtugeva terase nurkõmbuluses. Vältida jätkuva kuumutusega pärast keevitamist 250°C 2h vesiniku eemaldamiseks

Alati tekivad keevisliidetes sisepinged ehk jääkpinged.

Raskesti konstruktsioonis prognoositavad, sõltuvad konstruktsiooni jäikusest, materjali paksusest ja keevitamise sooritamisest (lõikudena, suunast jm). Tehnoloogilised lahendused-keevitamine lõikudena, mitme läbimiga jm on negatiivsed majandusnäitajatele.

Vesinikpragude riski vähendamine:

- kasutada võimalusel **mittekarastuvaid** teraseid ($CE < 0,41$, $R_e < 350 \text{ N/mm}^2$, $R_m < 500 \text{ N/mm}^2$, $t < 25 \text{ mm}$);
- kasutada minimaalse vesinikueraldusega keevitusprotsesse (MAG) ja elektroode (B-kattega elektroodid);
- **ettekuumutuse** kasutamine;
- sisepingete vähendamine.

Sakslaste soovitus: ilma ettekuumutusega võib keevitada teraseid, mille:

- voolavuspiir $R_e < 360 \text{ MPa}$ või
 - tõmbetugevus $R_m < 500 \text{ MPa}$;
 - teraslehe paksus on alla 25–30 mm.
- Teras mark **S355** piiri peal.

5.2.2 Vesinikpragudekindluse arvutuslik ja katseline hindamine

Arvutuslik hindamine IIW valemiga aastast 1949. (põhineb kõvaduse mõõtmistel).

C – ekvivalendi valem (IIW)- nt ehitusterastele:

$$CE = CEV = C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

$CE < 0,41-0,43$?, hästi keevitav, ei ole vaja ettekuumutust arvestada $t_{5/8} > 12 \text{ s}$, Q_e ja t_{komb} .

On vaja täpselt teada konkreetse terase partii keemilist koostist, mis standardi järgi võib mõne keemilise elemendi, nt Mn osas erineda laiades piirides. Materjali mehaanilised omadused ja keemiline koostis tuuakse dokumentides, nn sertifikaatides, mis võivad olla erinevad, nt vormid 3.1 või 2.2 jm.

Ei ole standardites antud CE täpsemat piirväärtust. EN 1090 annab kinnituvale juuretoe materjalile $CE < 0,43$.

Erandlikud terasemargid: 14GS, 16GS, 0962S, 15HSND jt, mille tarvis tuleb kasutada teisi valemeid.

Standardis EN 1011-2 valem parameeter CET määramiseks, mis välja pakutud Saksamaal ja sobib Weldox- ja Hardox-teraste keevitamisel :

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

Ei ole toodud piirarvu, millest alates tuleb kasutada ettekuumutust, kuid toodud graafik $T=f(CET)$.

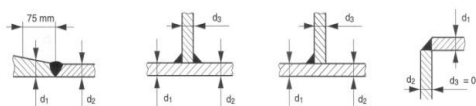
5.2.3 Terastoorikute ettekuumutus pragude vältimiseks

Terase tootjad annavad sageli soovitusi oma terasemarkidele tabelite kujul ettekuumutuse temperatuuri määramiseks.

Ettekuumutuse temperatuuri määramiseks kasutatakse standardis EN 1011-2 toodud metoodikat, arvestades:

- keevitusprotsessi vesinikusisaldusega HD/ml (100g keevismetalli kohta);
- keevituse soojussisestusega;
- kombineeritud lehe paksusega.

Ettekuumutustemperatuur – on funktsioon $f(t_{komb}, CE, Q_e)$, kasutatakse kombineeritud lehepaksuse mõistet. Aluseks võetakse kombineeritud lehepaksus, mis on pökkõmblusele 2 lehe paksust ja nurkõmblusele 3 paksust.

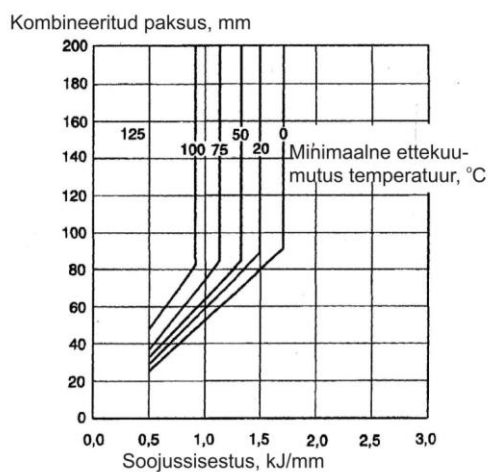


Pökkliited $t_{komb} = 2t$

T-liited $t_{komb} = 3t$

Joon. 5.10 Kombineeritud lehe paksuse arvutuskeemid.

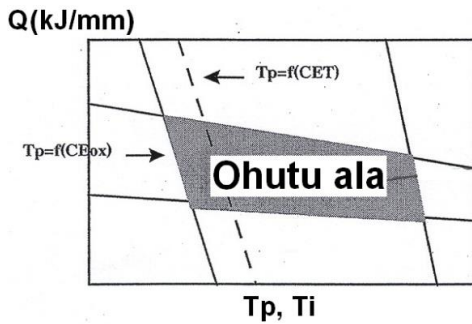
Skaala seotud C_{ekv} väärtuse ja keevismetalli sisestatava vesiniku hulga. MAG-keevitusel on see 5 ml/100g metall, kasutame skaalat D.



Skaala	A	B	C	D	E
C_{ekv}	0,38	0,41	0,43	0,48	0,50

Joon. 5.11 Ettekuumutustemperatuuri määramine graafikutelt standardi EN 1011-2 järgi

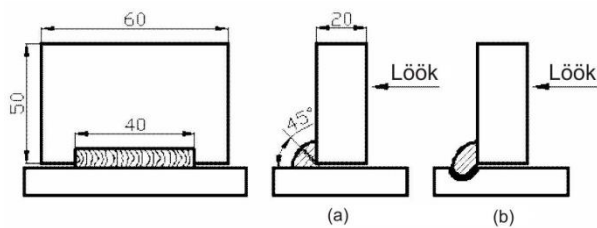
Skaalad vastavad vesiniku hulgale keevitusprotsessis. Kodutöö lahendamisel kasutame SSAB tarkvarapaketti Weldcalc3.0 või äppi. Näide diagrammil näidatud aladest on allpool.



Joonis 5.12. Kevitusparameetrite aken keevitamisel (SSAB tarkvarapakett "Weldcalc 3.0")

Liigsuure soojussisestuse kasutamisel halveneb liite löögisitkus, liiga madal soojussisestus (kaare energia) võib põhjustada õmbluse servade kokkusulamatuse defekti, liiga kõrge ettekuumutuse temperatuur halvendab liite mehaanilisi omadusi, liiga madal ettekuumutuse temperatuur võib põhjustada külmpugasid.

Tehnoloogilised katsed keevitatavuse hindamiseks



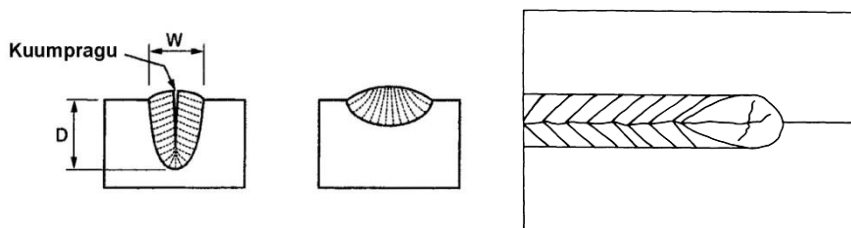
Joon. 5.13 Murdekatse keevitatavuse hindamiseks

Töökohal keevitatakse lühem ühepoolne T-liide ja see purustada vasara löögiga või pressi all. Murdekatse kasutusel keevitajate tööde hindamisel ja kvalifitseerimiskatsel, eriti MAG-keevitusel. Ehituslike metallkonstruktsioonide valmistamisel hinnatakse keevitatavust süsinikekvivalendi abil. Tegevust nimetatakse tüübikatseteks ja näidatakse toote vastavusdeklaratsioonis viitega terase margile ja standardile.

Detailide ettekuumutuse temperatuuri mõõtmise kohad on tavaliselt **75 mm** keevisõmbluse servast.

5.2.4 Kuumpraod

Konstruktsiooniterastes risk väike, ainult rübustikaarkeevitusel. Kuumpraod(hot cracks) võivad tekkida austniitsetes roostevabades terastes, malmi, Al keevitamisel õmbluse keskkohas või ka kõrval. Põhjuseks enamasti tardumisel tekkivate väiksema tugevusega kergsulavate faaside eraldumine.



Joon. 5.14 Kuumpraod terases, õmbluse ristlõike mõju

Võib tekkida probleeme austeniitse roostevaba terase suure keevituskiirusega keevitamisel ja uute kõrgtootlike keevitusprotsesside rakendamisel.

5.2.5 Lamellpraod

Lamellpraod (lamellar tearing) võivad tekkida termomõju tsoonis (TMT-HAZ) paralleelselt lehe pinnaga. Põhjuseks terase valtsimise madal kvaliteet (kihustumine) ja sulfiidide ja silikaatide lisandid. Kahtluste korral kontrollida teraslehte, nt UT meetodil.

5.3 Roostevaba terase keevitamine

5.3.1 Teraste rühmitamine ja nõuded korrosioonikindlusele

Terased, mis minimaalselt legeeritud 10,5% kroomiga, mis tekitab pinnale korrosioonikindla õhukese oksüüdi kelme, mis kaitseb teda edasise korrosiooni levimise eest. Enne keevitamist välja selgitada:

- terase rühm või tüüp mikrostruktuuri järgi;
 - nõuded korrosioonikindlusele, eriti kõrgendatud temperatuuridel ja erinevates keskkondades, erinevad korrosiooni liigid;
 - nõuded mehaanilistele omadustele- eriti külmatehnikas nõutav löögisitkuse säilimine.
- Terase rühmitamine mikrostruktuuri järgi EN 1011-3 järgi:

- austeniitterased, S300 seeria, legeeritud Cr-Ni, margid S304, S306, S317 jt ;
- ferriitsed terased, S400 seeria- margid S 405, 409, 430;
- martensiitsed terased, margid S403, 410, 416, 420;
- ferriit-austeniitsed e. dupleksterased, margid S3201, S3230, S32760, S32760
- dispersioonkõvenevad terased (precipitation hardening steels- PH stainless steels, margid S13800, S17400, S15500, S17400)- see on uus rühm. Tugevusomadustelt ületavad austeniitseid teraseid 3-4 korda. Ei ole standardis EN 1011-3. Hea korrosioonikindlus, suhteliselt madal löögisitkus. Kasutamine gaasi- ja naftatööstuses, tuumaenergeetikas, kosmosetööstuses. Sadestuskõvenemine saavutatakse Cu, Al, Ti, Nb, Mo lisamisega ja karastamise ning vanandamise järel. Puudub sageli standardtähistus. Eraldi marginaalne rühm -hea lõiketöödeldavusega terased (stainless steel for machining)-sisaldab mittevoolava laastu saamiseks P=0,2-4%, Se=0,15%. Puuduvad soovitused keevitamise osas, ilmselt raskesti keevitav keemilise koostise (kuumpragude risk) tõttu.

Tabel 5.1 Erinevat tüüpi roostevaba teraste liigitus, enimlevinud margid ja omadused

Terase tüüp, mark	Koostis, legeerelemendid (%)				Kasutusala Soojusjuhtivus W/m ² *K Joonpaisumistegur (10 ⁻⁶ 1/k)
	C	Cr	Ni	Mo	

Tavaausteniitsed 18-8 tüüpi, AISI304 17-11-3 tüüpi AISI316	<0,25 0,04 0,04	12-30 18 17	6-40 8 11	3	Soojusvahetid, mahutid, torustikud, toiduainetetööstus, energeetika, külmatehnika, soojusjuhtivus 13-15, joonpaisumine 15-17,5, mittemagneetilised
Superausteniitsed, täisausteniitsed, + Cu (0,5-2,0%), N (0,11-0,25%)	0,02-0,03	17-24	13-32	3-7	Eriti happeskindlad, 1NiCrMoCu25-20-5. , mittemagneetilised
Ferriitsed, AISI430, veel superferriitsed X2CrMoTi29-4, +0,045% N	<0,25 0,04 0,025	12-30 28	0	4	Kodumasinad, autodetailid, keemiatööstus, soojusjuhtivus 23-25, joonpaisumine 10-10,5
Martensiitsed AISI410, veel supermarteniitsed AISI 420	0,1-0,3 0,1 0,2	11-17 12 13	0-3		Valuterased, tööriistad, hüdroturbiinid, puurtornide (offshore), naftatööstuse torustikud, soojusjuhtivus 25, joonpaisumine 10,5
Dupleks, +0,17%N 14462, +0,17%N Superdupleks 14410 25Cr7NiMo, +0.2%N	<0,15 0,02 0,02	18-30 22 25	4-10 6 7	0,1-4, 3 4	Dünaamiliselt koormatud masinaelemendid, nafta-, gaasi-, ja keemiatööstus, puurtornid, paberi ja tselluloositööstus, joonpaisumine 16

Kuumapüsivad ehk tagikindlad terased (heat resistant steels) sarnanevad oma keemilise koostise ja tüüpide kohaselt roostevabadele terasetele, kuid neil on temperatuuridel üle 600°C hea tagikindlus pikaajaliseks tööks kuumades gaaside põlemisproduktides, lisaks piisavad mehaanilised omadused. Kuumapüsivust määratakse temperatuuriga, mille juures on tagist tingitud materjali massi kadu on alla 1g m²/h.

Tagikindlus saavutatakse terase legeerimisega täiendavalt Cr, Si ja Al, mis moodustavad terase pinnal tiheda oksüüdikihi.

Liigitatakse nagu roostevabasid teraseid:

-ferriitsed terased: 6-29% Cr ja ligikaudu 1% Al, on püsivad väävlit sisaldavas keskkonnas;

-austeniit-ferriitsed: 25% Cr, 4% Ni ja ligikaudu 1% Si;

-austeniitsed: 15-26 %Cr, 9-37% Ni ja ligikaudu 1% Al.

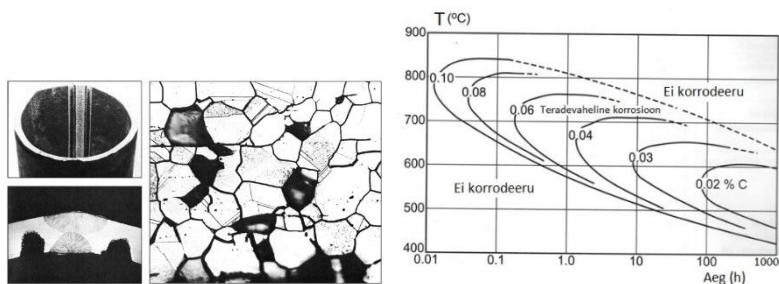
Korrosiooninähtused roostevabas terases:

- Üldkorrosioon;



Joon. 5.15 Töö 7 aastat korrodeeruvus keskkonnas 90°C kraadi ja rõhul. Seespool väikesed praod.

Teradevaheline, interkristallitne **korrosioon** (sensilization, intergranular corrosion). Põhjustab suur C-sisaldus-ei ole tänapäeval probleemiks stabiliseeritud teraste (legeeritud Ti, Nb) korral. Teradevahelise korrosioonikindlusega tuleb arvestada austeniitteraste keevitamisel ja ekspluatatsioonis.



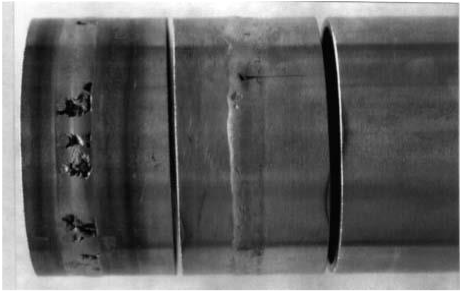
Joon 5.16 Teradevahelise korrosiooni piirid sõltuvalt terase süsinikusisaldusest, temperatuurist ja ajast.

Efekti vähendamiseks toodet kiiresti jahutada, nt vasest jahutusplaatide kasutamisega.



Joon.5.17 Jahutusplaadid (copper chill, Euroopas heat sink)

- **punktkorrosioon**



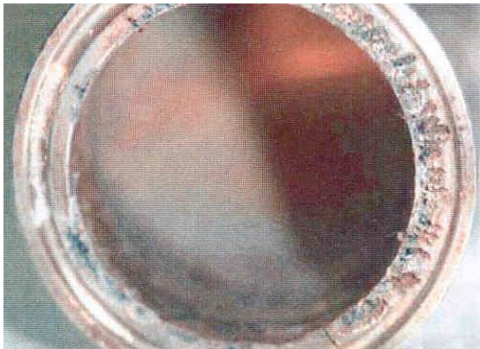
Joon. 5.18 Punktkorrosioon (pitting corrosion)

Korrosioonikindlust saab hinnata ekvivalendiga:

PRE = Cr% + 3,3Mo% + 14Ni%. Näitaja levinud dupleksteraste juures

Dupleksterased PRE järgi jagatud 3 rühma: 25; 35; 41.

-pilukorrosioon



Joon. 5.19 Pilukorrosioon- nt tihendite juures

Kalduvust hinnatakse parameetriga $CRE = Cr\% + 4,1Mo\% + 27Ni$

5.3.2 Austeniitateraste keevitamine

Sisaldavad 16-26% Cr 8-24% Ni +natuke Mn, ka Mo; Ti, Nb,Ta.

Tüüpiline 18-8 tüüpi teras, **keevitamine ei valmista üldiselt raskusi** ja üldised soovitused on toodud EN 1011-3 ja terase tootjate poolt internetis.

Austeniitaterase keevitamist iseloomustavad järgmised tegurid võrreldes süsinikkonstruksiooniterastega:

-madalam materjali soojusjuhtivus ja sulamistemperatuur-väiksem keevitusvool ja soojussisestus, see on keevitatakse väikese keevitusvooluga ja suure keevituskiirusega, et vähendada deformatsioone, kuumpragude ja intermetalliidide tekke riske. Sageli sirged läbimid elektroodiotsa võngutamata – nn niitõmblused.

- probleemiks kuumpragude vältimine. Vältida liiga laiu või kitsaid keevisõmbuseid. Keevisõmbuse laiuse ja sügavuse suhe b/h või w/d peab olema vahemikus 1-1,5 (varem 1,5-2,5).

- keevisõmbuse ferriidisisaldus on normeeritud. Ferriidi number peab olema vahemikus 3 FN – 15 FN. Õmbuse ferriidisisaldus peab olema 5 – 12 %, see parameeter on ebatäpne.

- suurem joonpaisumistegur-suurem õhupilu detailide vahel, detailid kinnitatakse omavahel traagelõmbustega 2 korda tihedamalt kui madalsüsinikterased: nt. kui $t = 2-3$ mm, vahekaugus 70-120mm. Vähendada keevitusdeformatsioone – vastusammuga keevitamine.

Keevitusprotsessidena kasutatakse MAG-keevitust, kaitsegaas on Ar, lisatud kuni 2-5% CO₂, **TIG-keevitust**, kaitsegaas Ar või Ar + He, harvem käsikaarkeevitust. Keevitamise käigus tuleb tagada protsessi puhtus – **vältida rauaosakeste sattumist terase pinnale** roostevaba terase ladustamisel, transpordil, keevitamisel, puhastamisel. Roostevaba terase keevitamine peab toimuma süsinikteraste omast **eraldi** ruumis või isegi hoones.

Lisamaterjali valik

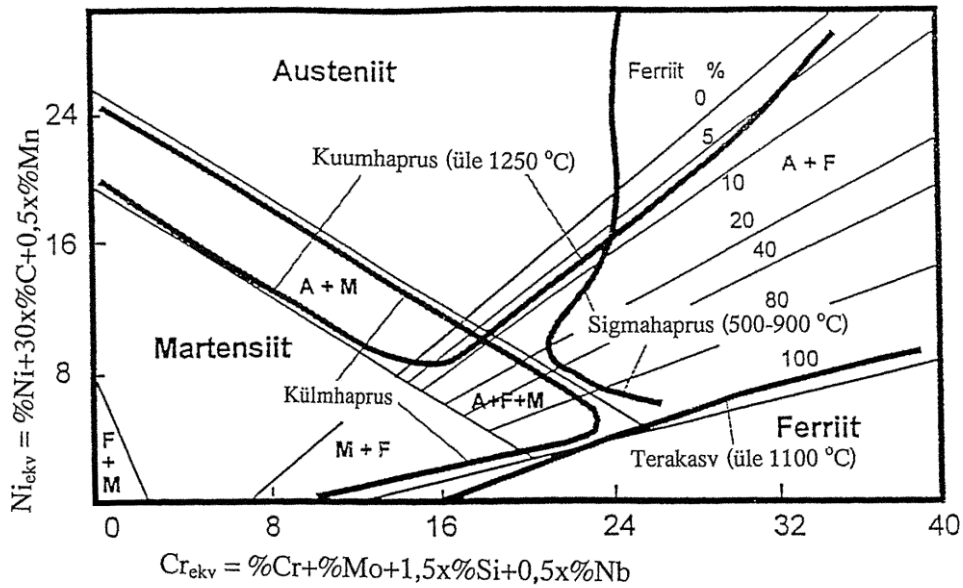
Tuleb vältida puhta austeniitstruktuuri tekkimist. Struktuuride prognoosimiseks kasutatakse erinevaid diagramme lisamaterjali leidmiseks. Teraсте tarnijad annavad sageli soovitusi sobivate lisamaterjalide valikuks.

Roostevaba terase legeerelemendid jagunevad:

-ferriiti tekitavad- iseloomustab $Cr_{ekv} = \%Cr + \%Mo + 1,5xSi + 0,5xNb$,

-austeniiti tekitavad- iseloomustab $Ni_{ekv} = \%Ni + 30x\%C + 0,5x\%C$.

Diagrammid keevisõmbuse mikrostruktuuri prognoosimiseks. Kõige vanem Schaeffleri diagramm 1949. aastast, ei arvesta uute legeerelementidega.



Joon. 5.20 Klassikaline Schaeffleri diagramm

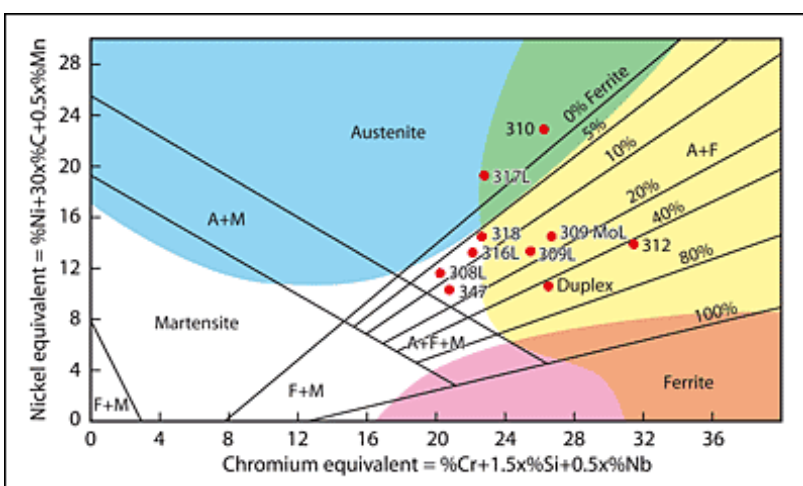
Iseloomulikud alad diagrammil:

-A (austeniit)-austeniit-kuumpragude tekkimise tõenäosus suur. Soovitav vältida puhast A, vaid eelistada struktuuri 5-12% F, asetseb kolmnurgana diagrammi keskel. Suurem F sisaldus halvendab korrosioonikindlust.

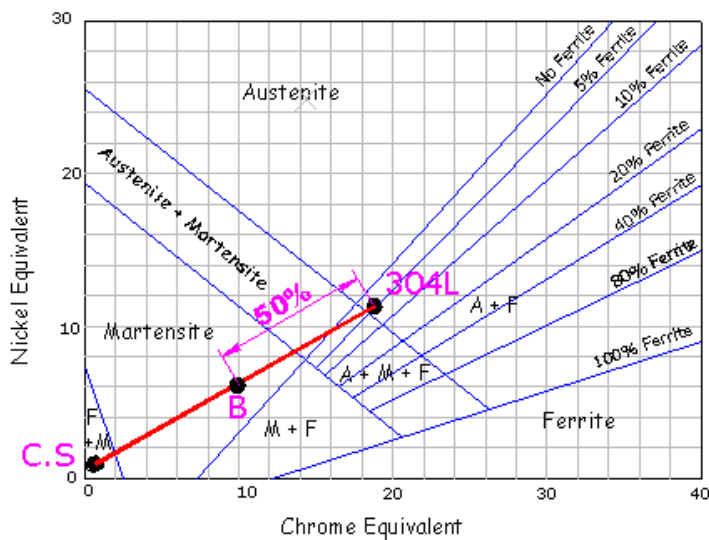
-A+F struktuur, võib tekkida temperatuuridel 470- 900 kraadi sigma happus. Vältida antud piirkonda või keevitada nii, et see ala keevisliites oleks võimalikult kitsas.

-F (ferriit)-tera kasv ja löögisitkuse halvenemine,

M (martensiit)-võivad tekkida vesinik-e külmpraad-vähendada vesiniku sattumist õmblusesse.



Joon.5.21 Lisamaterjalide punktid Schaeffleri diagrammil



Siin

Joon. 5.22 Schaeffleri diagrammi kasutamine süsinikterase (Cs) ja roostevaba terase (S304) kokkukeevitamisel ilma lisametalli kasutamata.

Moodsam De-Long diagramm (1973), mis arvestab N mõju. Puudus-algab kroomiekvivalendist 16.

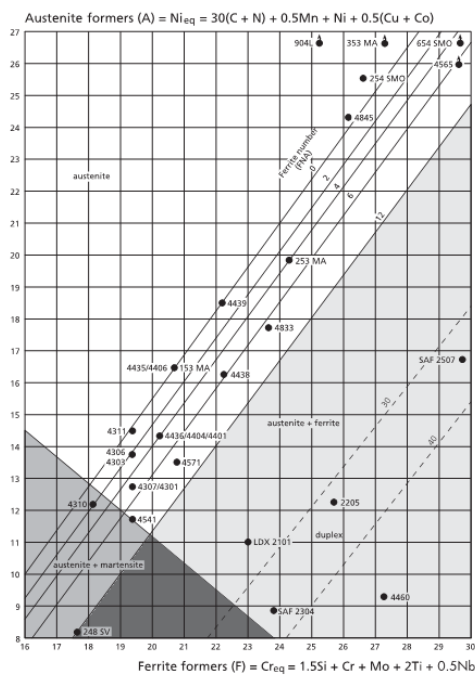
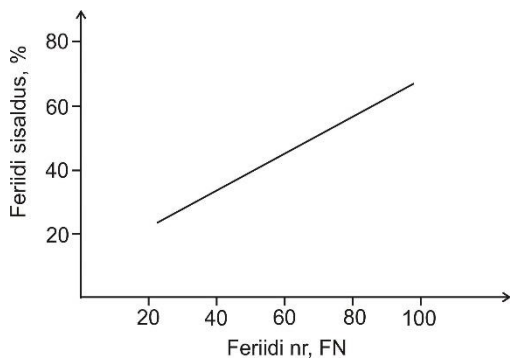


Figure 1.1. DeLong diaagram for stainless steels

Joon. 5.23 De-Longi diagramm. Ferriidi number aluseks

Olemas 2 diagrammi koos (Schaeffler-De-Long diagramm), sarnane Schaeffleri diagrammiga, juurde N element. Siin võib olla koos ferriidi sisaldusega ka ferriidi number, mida saab määrata graafikult.

Ferriidisisalduse ja ferriidi numbriga (FN) vaheline seos ; $F = FN/f$, kus f on tegur vahemikus 1,25-1,7.

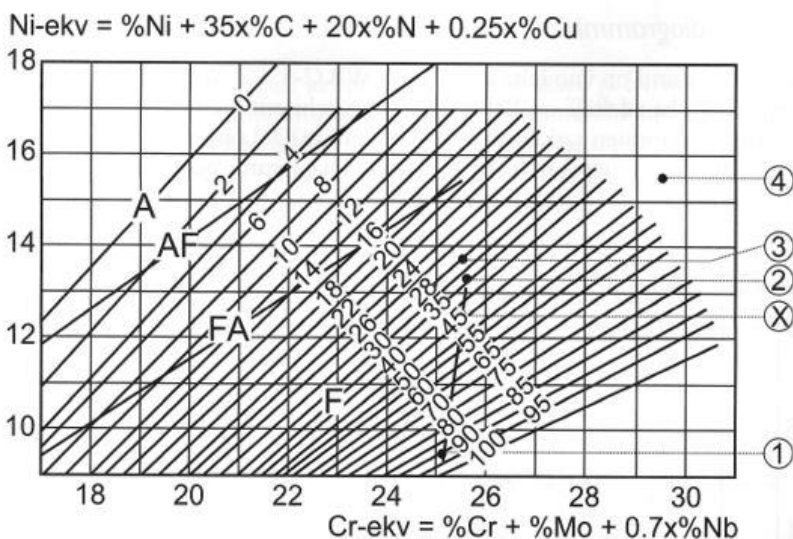


Joon. 5.24 Ferritiidide sisalduse ümberarvutamine ferritiidide numbriks

Kõige uuem diagramm WRC-1992, mis sobib dupleksteraste ja erinevate teraste-(dissimilar metals)-madalsüsinikteraste ja roostevabade teraste kokkukeevitamiseks. Erinevused eelmistest diagrammidest: välja on jäetud Si ja Mn; N ja Nb koefitsienti on muudetud. Lisaks tulnud austenitisaatorina Cu mõju. Erinevad piirkonnad:

A ja AF-kalduvad kuumpragudele.

Kõige väiksem kuumpragude risk on piirkonnas FA .



Joon. 5.25 Näide WRC diagrammi kasutamisest: 1-dupleksteras; 2,3,4 elektroodi punktid. Seotud punktid 1 ja 2(elektrood), kaugusel 1/3 õmbluse ristiga punkt—ferritiidisisaldus FN 45.

Põhimõtteline erinevus diagrammidel on, et Schaeffleri diagrammi aluseks on metallograafilised uuringud, kuid De Longi ja WRC-diagrammil määratakse ferritiidide sisaldus magnetmeetodil-ferritoskoobi abil.

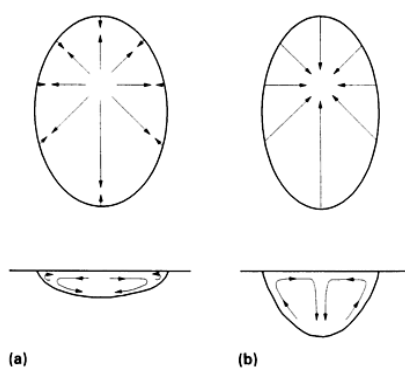
Diagrammide kasutamisel vajalik otsustada õmblusmetalli segunemisteguri (dilution) osas. Tavaliselt võetakse 0,3 või 30%-s, see tähendab, et 30% keemilistest elementidest läheb üle keevismetalli põhimaterjalist ja 70% elektroodist.

Voolamisnähtused keevitusvannis ja keevitusdefektid roostevaba terase TIG-keevitusel. Sula keevitusvann on dünaamiline: toimub soojusülekanne keevituskaarelt detailide servadele plasmajoa ja kaitsegaasi joa abil ning keevitusvannis liikuva sulametalli mõjul. Sulas olekus keevismetall võib liikuda erinevat trajektoori pidi erinevate talle mõjuvate jõudude poolt. Ülesandeks on tootmises stabiilselt saavutada õmbluse läbikeevitus või suhe d/w või b/h . Roostevaba terase TIG keevitusel võib saavutada väga erinevaid tulemusi.

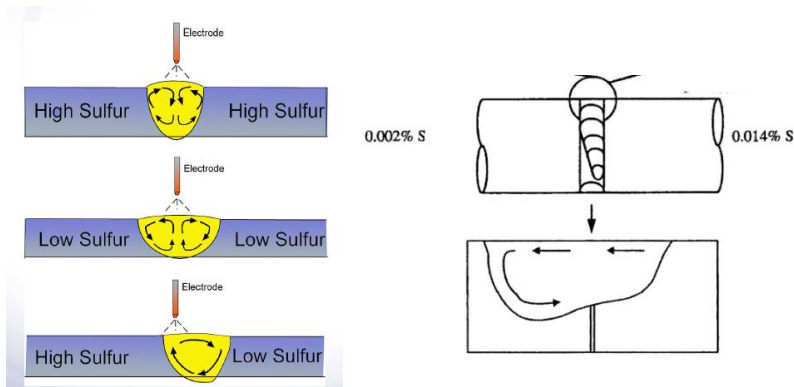
Marangoni e. pindpinevuse gradientjõud (*Marangoni convention, surface tension gradient*). Esineb TIG-keevitusel ja laserkeevitusel. Erineva temperatuurialade tihedus on erinev, sulametall liigub kõrgema temperatuuri alalt madalamale temperatuuriga alale.

Pindaktiivsed ained võivad segregeeruda keevitusvanni pinnale ja vähendavad pindpinevustegurit – sula metalli osakesed transpordivad soojust keevitusvanni põhja poole. Sula keevismetall võib liikuda vanni tsentrist vanni sügavusse, saadakse suur läbikeevitus (Joon. 5.26 b) või siis tsentrist perimeetri poole ja saadakse väike läbikeevitus (skeem a).

Praktikas teine skeem parandab läbikeevitust terase legeerimisega või väikese koguse O_2 esinemisega keevitusvannis. Viimane satub metalli pinnale traatharjadega või liivapritstöötlusega töötlemisel enne keevitamist. Liiga intensiivsel töötusel viiakse metalli suur kogus hapnikku ja võidakse saada ebapiisav läbikeevitus. Läbikeevituse ristlõike kuju TIG-keevitusel võib sõltuda detailide väävlisisalduse erinevustest (Joon. 5.27). Juba väga väikesed keemilise koostise (nt S sisaldusel kuni 0,03%) muutused võivad halvendada keevitustulemusi. Tootmises on vaja kontrollida kasutatavate teraste keemilist koostist, nt terase spetsifikatsioonide võrdlemise teel ja mitte segi ajada erinevaid terase partiisid.



Joon. 5.26 Pindpinevusjõudude mõju voolamisele keevitusvannis ja keevitusvanni ristlõikele



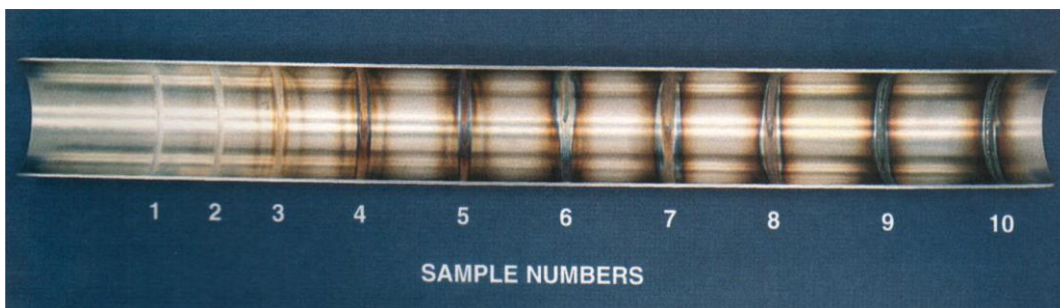
Joon. 5.27 Erineva S sisaldusega- 0,002% ja 0,014% torude läbikeevituse kuju

Keevisliidete ja toodete järeltöötlus

Keevituskuumuse mõjul kroom difundeerub õmbluse ja detailide pinnakihti. Selle tulemusena asetseb selle kihi all õhuke kroomivaene, alla 10-13% Cr ala. Selles alas võib hakata arenema punktcorrosioon. Sama nähtus võib esineda keevituspritsmete kohtades põhimaterjalis. Vajalik on alati keevisõmbluse ja kõrvalala puhastamine, **söövitamine** või **passiveerimine**-hapetamine. Vajalik õmbluse ja lähiala järeltöötlus: eemaldada oksiidikelmest roostevabast terasest harjadega, liivapritsi- või klaashaaveltötlusega. Sellise töötlemise käigus on pinnakiht mehhaaniliselt aktiveeritud ja puudub kaitsev kroomoksüdi kelme. Selle tekitamiseks tuleb pind **passiveerida**-töödelda 15-20% HNO_3 pasta või vannis, jäädid maha pesta. Detailide pinnalt võib ka oksiidikelmest eemaldada ka keemiliselt söövitamise teel 15-20% HNO_3 +1,5-3% HF lahuses, pesta hiljem voolava veega.

Projekteerija peab ette nägema korrosioonikindluse tagamise meetmed (hea inseneritava või eraldi kirjutama tootekirjelduses)- nt pickling, nägema ette kontrolli meetmed ja tööde kalkulatsioonides näha ette vastavad kulud. Torude keevitamisel juhitakse toru sisepinna oksüdeerimise vältimiseks toru sisse inertgaasi-nt argooni ja tulemust hinnatakse sisepinna värvuse järgi (Joon. 5 28.). Mõlemale poole keevisliidet paigutatakse toru sisse eemaldatavad korgid. Seda gaasi nimetatakse ka juuregaasiks.

Aktsepteeritakse viimasena positsioon 4 ,vastasel juhul tuleb pind happega puhastada ja veega läbi pesta ja kuivatada.





Joon. 5.28. Toru oksüdeerumisvärvid ja tööstuslikud korgid torus.

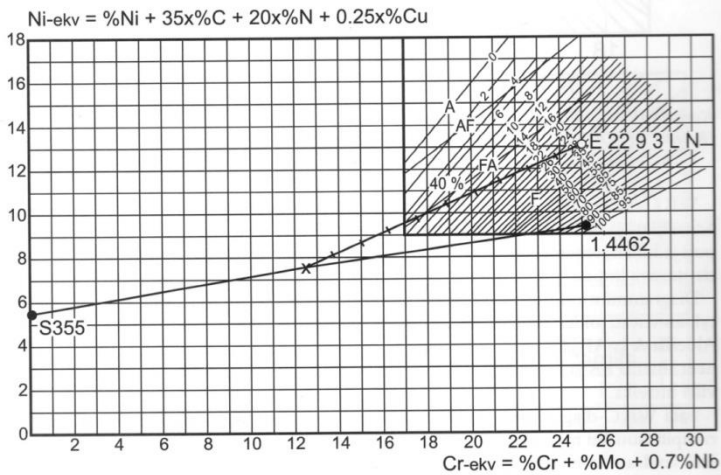
Suuremate toodete järeltöötlus toimub vastavalt projekteeritud ja varustatud ruumides passiveerimisvedeliku pihustamisega tootele (Joon 5.29).



Joon. 5.29 Roostevaba terase toodete järeltöötlus

5.3.3 Eri tüüpi terastest(süsinikteras-roostevaba teras) e segaliidete keevitamine

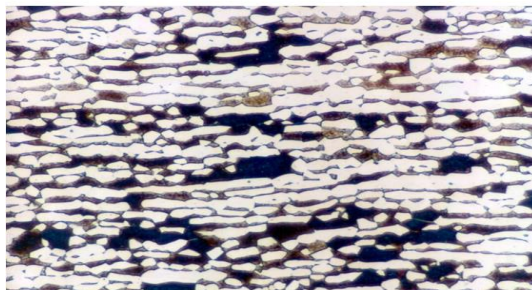
Sama marki roostevabade teraste korral kasutame keevitamise lisamaterjali-elektroodi või traadi leidmisel nende materjalide tootjate soovitusi. Segaliidete keevitamisel tuleb lahendada keerulisem ülesanne, prognoosides keevismetalli keemilist koostist erinevate diagrammide abil. Näitena kasutame süsinikterase kokkukeevitamiseks dupleksterasega WRCdiagramm (Joon. 5.30).



Joon. 5.30 Dupleksterase kokkukeevitamine konstruktsiooniterasega mark S355. Segunemistegur 40%, keevismetall FN15

5.3.4 Dupleks-roostevabade teraste keevitamine

Kaasaegsed dupleks teraste margid erinevad esimestest väljatöötlustest väiksema kroomi (21-28%) ja kõrgema nikli s (4-8%) kui ka molübdeeni (0-4,5) sisalduse poolest. Lisaks on teras legeeritud lämmastikuga, sõltuvalt terase margist 0,05-0,35%. Selline keemiline koostis tagab lõõmutatud olekus mõlema faasi F:A 50:50 osaluse. Võrreldes austeniit-terastega on dupleksterased korrosioonikindlamad, neil on kõrgemad tugevusomadused ja sisaldavad vähem kallist niklit.



Joon. 5.31 Dupleksterase 2205/14462 mikrostruktuur lähteolekus. Hele faas-austeniit A, tume– ferriit F

Dupleksterased saab liigitada keemilise koostise ja korrosioonikindluse põhjal 3 rühma:

1. Cr-Ni-N terased, numbertunnus 1.4362, PRE=25;
2. Cr-Ni-3Mo-N terased, 1.4462; PRE=30-36;
3. Superdupleksterased Cr-Ni-Mo-N, 14410, PRE≥40.

Põhjamaades ja Eestis on enimlevinud dupleksteras mark 14462 (X2CrNiMoN22-5-3).

Dupleksteraste keevitatus

Kaasaegsete teraste keevitatus on parem esimese põlvkonna omadest, kuna saab hoida paremini kontrolli all ferriidi-austeniidi suhet. Lämmastik soosib märgatavalt austeniidi teket, eriti termomõju tsoonis. Dupleksteraste keevitamine on keerulisem võrreldes austeniitsterastega ja nõuab täpsemat tehnoloogiat järgimist, et saada soovitud mikrostruktuuri ja vältida habraste faaside tekimist. Puhtalt keevitamise sooritustehnika seisukohalt tuleb arvestada, et sulakeevismetall käitub erinevalt austeniitsteraste omast ja ei ole nii voolav. Läbikuumutamise suurus on reeglina väiksem kui austeniitsteraste keevitamisel. Töökohad, mis on omandanud hästi austeniitsteraste keevitamise, peavad probleemide ja keevitusdefektide vältimiseks arvestama eelpoolmainitud asjaoluga.

Dupleksteraste ei ole kalduvad kuumpragudele, kuna keevismetall tardub ferriitse mehhanismi abil ja seda faasi on piisavalt.

Vesinikpraod (külmpaod) võivad esineda keevitustsoonides, kus ferriidisisaldus on suur ehk ferriidi number - FN > 85-100 (ferriidisisaldus on üle 65-70%).

Ferriidi sisalduse vähenemine alandab pingekorrosiookindlust ja tugevusomadusi. Liiga palju ferriiti vähendab löögisidust. Keevismetalli ferriidisisalduse määramiseks võib kasutada mitmeid diagramme, nt WRC-92 diagrammi.

Kui keevitatakse õmblust mitme läbimiga, siis ferriidi sisaldus on igas läbimis erinev, eriti just erineva jahtumiskiiruse tõttu. Liiga aeglasel jahtumisel eelneva läbimise uuesti kuumutamisega eraldub sekundaarausteniiti. Keevitusprotseduuri katsel ei ole tavaliselt liite tugevusnäitajatega probleeme, kuid paindekatsel liiga suure ferriidi sisalduse korral võib tekkida mitteaktsepteeritav pragu, eriti keevitustsooni juure poolel.

Dupleksteraste keevitamisel kasutatakse väikestel tootmiskahtudel TIG-keevitust, suurematel MIG/MAG-keevitust ja vähem käsikaarkeevitust.

Keevitamine ilma lisametallita ja ilma keevitusjärgse termotöötluseta võib anda rahuldavaid tulemusi siis, kui kasutatakse lämmastikku sisaldavat kaitsegaasi.

Kirjanduse andmetel tuleb sõltuvalt materjali paksusest esimese 2 dupleksteraste rühma (nt margid 23CrNi0.1N ja 22Cr5.5Ni3Mo0.1N) keevitamisel piirata soojussisestust väärtustega 0,5-2,5 kJ/mm ja läbimitevahelist temperatuuri $T_i \leq 250^\circ \text{C}$.

Kolmanda rühma-superausteniitsete teraste, nt mark 25Cr7NiMo0.25N, keevitamisel on soojussisestus väike ja peab olema piires 0,4-1,5 kJ/mm ja $T_i \leq 150^\circ \text{C}$.

Kokkuvõtlikult on toodud erinevat tüüpi roosteabade teraste keevitamise üksikasjad tabelis 5.2

Tabel 5.2 Roostevabade teraste keevitamine

Terase rühm, koostis, struktuur	Lisamaterjal	Pragude risk, omaduste muutus	Keevitamise eritingimused	
<p>Tavaausteniited, standardausteniitsed</p> <p>18Cr-(8-10Ni) tüüpi AISI304</p> <p>17Cr-11Ni-3Mo tüüpi AISI316</p>	Vastab põhimaterjali koostisele	<p>FN<4-12, kuumpraod, F>30-70</p> <p>sigmahaprus, sitkuse ja korrosioonikindluse halvenemine</p>	Hästi keevitavad, õmbluse ristlõike kuju tähtis	
<p>Superausteniitsed</p> <p>(18-28)Cr-(13-32)Ni-(3-8)Mo +N</p>	Lähedane koostis, suurem Mo(2-6%), Ni sisaldus või Ni põhised	Suurem kuumpragude risk	Keevitatavus hea, keevitusparameetrid piiratud, väiksem soojussisestus	
<p>Ferriitsed, C<0,08,</p> <p>(12-17)Cr, harvem (0,4-1)Ti, 2Mo</p>	Austeniitsed, harva ferriitne (13Cr)	Ferriidi terakasv, sigma haprus	Madala soojussisestusega, PWHT 700-800° C, sisepinged °300-400°	
<p>Dupleks (tava)</p> <p>(22-28)Cr-(3-6)Ni-N terased, numbertunnus 1.4362, PRE=25</p>	Kõrgema legerimisega 23Cr-9Ni-3Mo-0,15N	Vaja saada õige F/A suhe (50:50), teatud juhtudel vesinikpraod	Hoolikas tehnoloogia, piiratud soojussisestus, TIG-keevitusel vajadusel kaitsegaasis 1-5% N ₂	
<p>Dupleks</p> <p>Cr-Ni-3Mo-N terased, 1.4462; PRE=30-36</p>	Dupleks 23Cr-9Ni-3Mo-0,15N			Sama, mis tavadupleks
<p>Superdupleks</p> <p>Cr-Ni-Mo-N, 14410, PRE≥40</p>	25Cr—9Ni-4Mo-N			Madal soojussisestus <1-1,5kj/mm, T _i <100°
			C	

<p>Marteniitsed</p> <p>(0,08-0,35)C-(11,5-17)Cr-((0-2,5)Ni</p> <p>Martensiit-austeniitsed (valu)</p> <p>(13-16)Cr-(4-5)Ni</p>	<p>Austeniitsed</p> <p>23Cr-12Ni</p>	<p>Vesinikpragu</p> <p>de risk</p>	<p>Tavaliselt valuterased.</p> <p>Halb või eriti halb keevitavus</p> <p>Ettekuumus 200-300° C, vajadusel noolutus või lõõmutus 650-750° C</p>
<p>Dispersioontugevnevad</p> <p>(precipitation hardening)</p> <p>Martensiitne</p> <p>0,05C-0,75Mn-16,5Cr-4,2Ni-4,2Cu-0,3Nb</p>	<p>Austeniit- või</p> <p>dupleks</p>		<p>Töödeldud tardlahusesse</p> <p>Ettekuumus 100° C, PWHT 750° C</p>
<p>Austeniit-martensiitsed</p> <p>0,05C-15Cr—(5-7)Ni-(1,4-2,6)Mo-1,2Al</p>	<p>Kokkusobivad</p> <p>(matching)</p>		<p>Inertgaasis keevitamine</p>
<p>Austeniitsed</p> <p>(0,01-0,07)C-(0,04-1,4)Mn-(15-17)Cr-(11-30)Ni—1,2Mo-?Al,V,B</p>			
<p>Kuumapüsivad, tagikindlad</p> <p>Ei kuulu roostevabade rühma</p> <p>Ferriitsed</p> <p>(6-29)Cr-1Al</p>	<p>(9-30)Cr-(9-20Ni)</p>		<p>Ei ole hästi keevitavad,</p> <p>ettekuumus 150-300° C, sitkuse tõstmiseks lõõmutus 650-750° C</p>
<p>Ferriit-austeniitsed</p> <p>(2Cr-4Ni-1Si</p>	<p>25Cr-4 või 25Ni</p>	<p>Parem keevitavus kui ferriit-rastel</p>	<p>Ei ole vaja lõõmutada, eelistada ettekuumutust</p>
<p>Austeniitsed</p> <p>(15-26)Cr-(9-37)Ni-1Al</p>	<p>22-36)Cr-(12-20Ni)</p>		<p>Ei ole vaja ettekuumutada, lõõmutada</p>

5.4 Alumiiniumi- ja sulamite keevitamine

5.4.1 Alumiiniumi omadused ja mõju keevitamisele

Al – sulamite kasutamise põhjused keevistoodetes on:

-väike tihedus, toote massi vähenemine;

-küllaltki kõrged mehaanilised omadused;

-löögisitkus ei sõltu miinustemperatuuridest (külmhapruse piir puudub), tavaliselt keevitamisel ei määrata liidetel löögisitkust;

-hea korrosioonikindlus, eriti kloriidides, nt merevees;

-suur energia absorptsioonivõime, eelis autoõnnetuste korral;

-ehitusel kasutatakse profile, ei vaja hooldust, anodeeritud või ka värvitud tooted.

Tabel 5.3 Alumiiniumi omadused võrreldes terasega

Omadused	Ühik	Al	Fe	Suhtarv
Kristallvõre		Tahktsentr	Ruumtsentr	
Tihedus	g/cm ³	2,7	7.8	1:3
Joonpaisumistegur	1/K	24x10 ⁻⁶	12x10 ⁻⁶	2:1
Erisoojus	J/kg•K	890	460	2:1
Sulamissoojus	J/g	390	272	2:1
Sulamistemp.	° C	660	1536	1,5:1
Soojusjuhtivus	W/m•K	235	75	3:1
Elektrijuhtivus	m/ Ωm•m	38	10	4:1
Oksüüdide sulamistemp.	° C	2050	1400/1600	Al 3x kõrgem
Oksüüdide tihedus	g/cm ³	3,89	5,7-5,0	Suurem Al

Mõju:

Erisoojus ja soojusjuhtivus

Al erisoojus on 2 korda suurem kui Fe, tihedus 3 korda väiksem, ühe ruumiühiku kuumutamiseks sulasse olekusse vajatakse ligikaudu **3 korda rohkem** soojust kui raual. Tegelikult vajatakse sulatamiseks ligikaudu sama palju energiat kui raual (võrdle MIG-keevitusel voolutugevusi).

Suur soojusjuhtivus- vaja kasutada **suure energiatihedusega** keevitusprotsesse (**nt Ar-He segugaas**) ja vajadusel **anda lisaenergiat (ettekuumutust)** protsessile. Kiire jahtumine võib põhjustada liite servade kokkusulamatuse ehk liitevea defekti ning poore, kuna metall jahtub kiiresti ja lahustunud gaasid ei jõua eralduda keevismetalli pinnale.

Suurem joonpaisumistegur- on oodata suuremaid kujumuutusi ehk deformatsioone. Keevisliite jahtumisel tekivad suuremad sisepinged. Paksu materjali või jäikade konstruktsioonide korral suurem kuumpragude risk.

Oksüüdi tihedus

Alumiiniumoksüüdi põhimetallist suurema tiheduse tõttu osakesed vajuvad keevitusvanni sisse ja põhja, põhjustades defekte. Tekib Al pinnale õhuke oksüüdikelme ($T_s = 2050^\circ\text{C}$), mis takistab materjalide kokkusulamist.

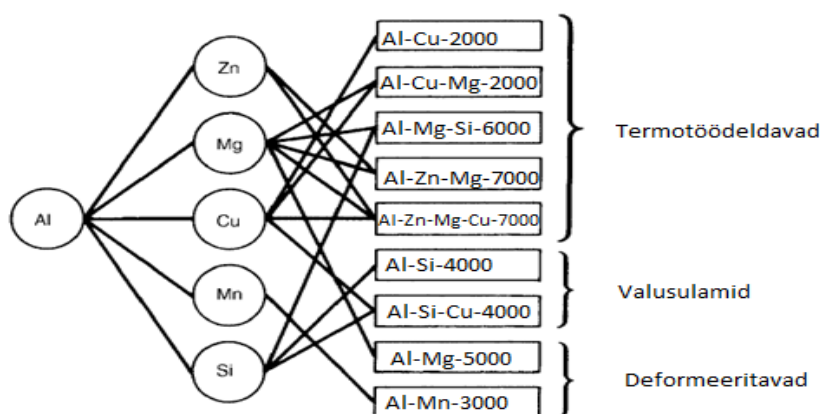
Kahanemine sula metalli tardumisel.

Võrreldes rauaga on sula Al kahanemistegur 3 korda suurem tardumisel, tekib suurem lõpukraater, milles võib tekkida ka kraaterpragu.

Kitsas sula metalli tardumisvahemik

Faasidiagrammide põhjal toimub sulametalli tardumine kitsas vahemikus, gaasid ei jõu tõusta pinnale- tekib pooride risk. Ei esine kuumutamisel pinna värvimuutust-keevitajal raske hinnata kuumutusastet (terasel kuumutusvärvid).

5.4.2 Al-sulamid ja tarneolekud



Joon. 5.32 Termotöödeldavate ja deformeeritavate alumiiniumisulamite liigitus AWS järgi

Eestis kasutatakse: **Lehtmaterjali:** merealumiinium 5083- H11, H321; Saaremaal AlMg4,5Mn0,7.

Profiilid: 6063- T6 AlMgSi, Lasertoolis 5754-H26 jt

Alumiiniumi tarneolekud

Alumiiniumi omadused ja käitumine keevitamisel sõltub suurel määral tema tarneolekust, mida tähistatakse suurtähe ja numbrite kombinatsiooniga.

Deformeeritavad sulamid

O-löömutatud, et deformeerida. Ei näidata omadusi;

H-kalestatud ehk deformeeritud;

H1x-ainult kalestatud (X (1-9) näitab kalestusastet. H11 ainult kalestatud, 1/8 kõva, H111-sama mis H111, ja rohkem kalestatud;

H3X-kalestatud ja stabiliseeritud, kuumutatud veidi üle töötemperatuuri: H32 ja H321-laevaehituses, ¼ kõva.

Termotöödeldavad ja deformeeritavad sulamid

T-termotöödeldud (T1-T9):T3-karastatud, kalestatud külmalt ja loomulikult vanandatud; T2 on kuumalt deformeeritud ja jahutatud, loomulikult vanandatud;

T4-karastatud ja loomulikult vanandatud, T6-karastatud ja kunstlikult vanandatud.

Mehaaniliste omaduste vähenemine sõltub tarneolekust –vaja teada keevitamisel.

Tabel 5.4 Erinevate Al-sulamite kasutusala ja keevitatus

Koostis, tähist	Omadused, kasutus	Keevitamine
Deformeeritavad, mittetermotöödeldavad		
Seeria 1000, 17 nimetust, Al99,5, 1050H111	Profiilid laevaehituses, tugevustegur 0,5-0,7	Hea keevitatus, sama koostisega lisametall
Seeria 3000, 13 nimetust AlMn	Hea korrosioonikindlus ja deformeeritavus, tõmmatud torud, vähe kasutatakse keevistoodetes	Hästi keevitav
Seeria 4000, 12 nimetust AlSi	Põhiliselt valusulamid, lisametallina AlSi5 ja AlSi12	Väike kuumpragudekalduvus
Seeria 5000, 43 nimetust 5083H321	Hea korrosioonikindlus merevees, merealumiinium, hästi anodeeritavad, tugevustegur 0,6-0,8	Väike kuumpragudekalduvus, ei kasuta AlSi lisametalli, hästi MIG, piiratud MMA, ei gaaskeevitus. Probleemid puhta Al Kokku keevitamisel
Deformeeritavad, termotöödeldavad		
Seeria 2000, 18 nimetust, AlCu	Karastamine+vanandamine Duralumiinium	Keevitatus piiratud, kuumpragude risk, valida lisametallina AlSi5 või AlSi12
Seeria 6000, 32 nimetust, AlMg5 6063 T6, 6082	Kõrged meh. omadused, hea korrosioonikindlus, profiilid laevaehituses, hästi anodeeritav	Hea keevitatus, AlSi5 lisamaterjaliga kuumpragude risk, likvatsioonpragude risk õhukese materjali keevitamisel suure Q ja AlMg5
Seeria 7000, 27 nimetust AlZn	Suurimad meh. omadused, Parim korrosioonikindlus, tugevustegur 0,8	7004, 7005 hästi keevitav 7075, 7079, 7178 piiratud keevitatus
Seeria 8000, 11 nimetust AlLi ja muud		Puudub info

Valusulamid

Hästi keevitavad: Al, AlSi4200-lisametall AlSi5 , 43100,44400 t AlSi12 lisametalliga
 Piiratud keevitavus: 46200-AlSi5,51400-AlSi5, AlMg5, 7100-AlMg5
 Ei keevitata: kuumpragude risk-51200, 2100, survevalu 46000

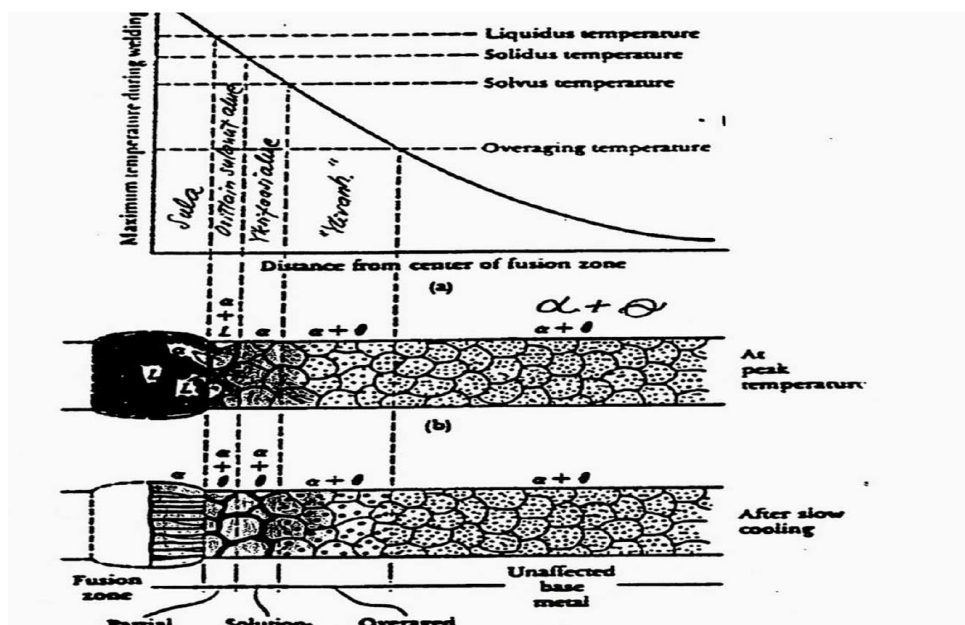
5.4.3 Keevisliite ehitus ja omadused

Keevisliide koosneb: keevismetall, osalise kokkusulamise (solid-liquid transition zone) laiusega kuni 0,4 mm, termomõju tsoonist, mille struktuur, koostis ja omadused erinevad deformeeritavatel ja termotöödeldavatel sulamitel. Keevituskuumuse mõjul võivad muutuda ka kas ülevanandamise või vanandamise mõjul ka õmbluse kõrvalala mehaanilised omadused.

Deformeeritavad mittetermotöödeldavad sulamid



Joon. 5.33 Deformeeritavast sulamist keevisliite struktuur



Joon. 5.33 Struktuurimuutused termotöödeldud (karastatud+vanandatud) duralumiiniumis-ülevanandamise efekt

Deformeeritavatel mittevanandatavatel sulamitel (Al MgZn ja AlMg süsteem) esineb termomõju tsooni omaduste langus, mille suurus sõltub:

-deformatsiooni e kaldestusastmest;

- keevituse soojussisestust, liigsuur soojussisestus on ebasoovitav;
- deformeeritud materjali tugevusest;
- keevitusprotsessist ja keevitusparameetritest.

Erinevalt terasest puuduvad kuumutamisel-jahtumisel faasimuutused.

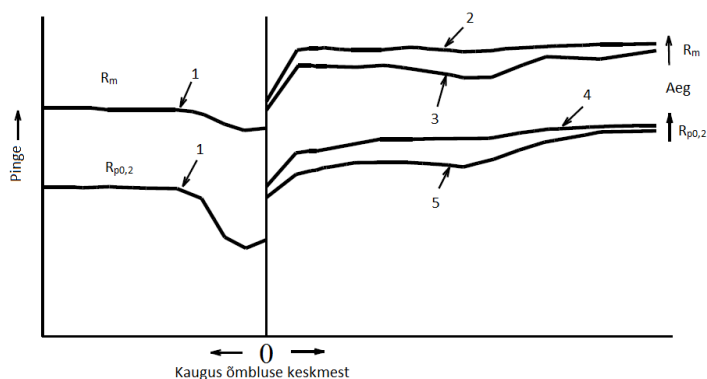
Lokaalsed kõrged temperatuurid teevad sadestuvad faasid lahustuvateks, hõlbustades materjali plastsemaks muutumist ja vähendades dislokatsioonide tihedust.

Termotöödeldavad sulamid

AL-Mg-Si sulamite struktuur. On 3-komponendilise sulam, siis keevismetallis lahustuvad nende elementide aatomid ja moodustavad keerulisi keemilisi ühendeid, mis sadestuvad välja toatemperatuuril. Sulas keevismetallis on keemilised elemendid jaotunud ühtlaselt ja suhteliselt kiirel jahtumisel ja tardumisel tekivad sadestustsentrid, millel ei ole aega kasvada tugevust mõjutava suuruseni. Keevismetallis ja termomõju tsooni metallis esineb kuumutamisel ülevanandamise efekt, kus difusiooni toimel sadestised Mg_2Si kasvavad suureks, kuid nende arv väheneb ja see toob kaasa selle ala tugevuse vähenemise. Samaaegselt esineb sadestuskõvenemise ehk kunstliku vanandamise efekt. AL-Mg-Si sulamis, seeria 6000 eraldub Mg_2Si . Kui materjali tarneolek oli T6, siis pärast keevitamist tekib olek T4.

5.4.3 Keevisliite tugevus

Enamusel juhul tekib keevitamisel ca 25 mm laiuses liites (keevismetall ja termomõju tsoon) kõrval madalama tugevusega ala-kas ülevanandamine või kalestumise kõrvaldamine kuumutamise käigus. (joon. 5.34). Vasakul kõveral on deformeeritav sulam. Paremal loomulikult vanandatav sulam $AlZn4,5Mg1:5$ ja 4- $R_{p0,2}$ ja R_m vahetult pärast keevitamist; 3 ja 2 samad näitajad pärast 3 nädalat loomulikku vanandamist.

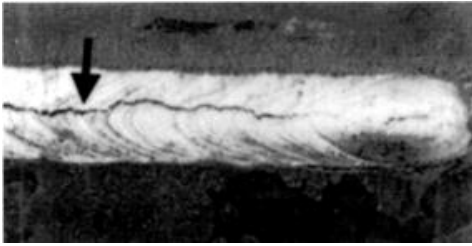


Joonis 5.34 Liite mehaanilised omadused kaugusel liite keskjoonest

Tugevuse alanemist võetakse arvesse vastava teguriga (**joint efficiency factor**), nt WPS-i katsetel on lubatud väärtus 0,8-1,0.

5.4.4 Alumiiniumi keevitavus ja pragunemistähtsused

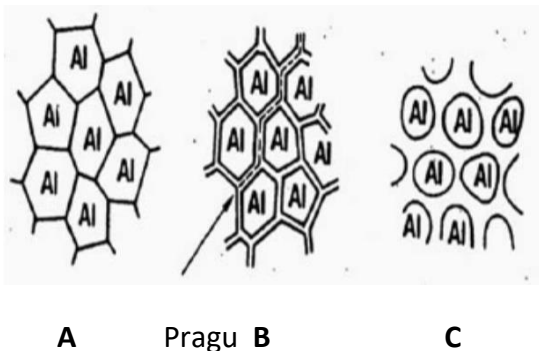
Võivad tekkida kuumpraod (hot cracks) kahanemispingete või konstruktsiooni sisepingete toimel keevismetalli jahtumisel kui **tardumispraod** (solidification cracks) või siis vahetult õmbluse kõrval termomõju tsoonis kui **likvatsioonipraod** (liquation cracks).



Joon. 5.35 Kuumpragu õmbluses

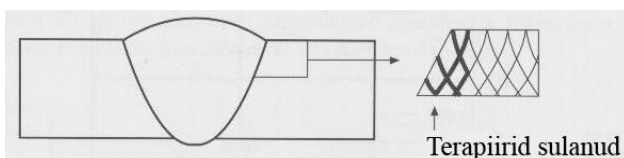
Tardumispragude risk sõltub keevimetalli legeerimise astmest. On näidatud, et liiga väike legeerelementide nagu 0,5-2% Mg, Cu, Mg, Si sisaldus võib olla pragude põhjuseks. Pragusid saab vältida sobiva koostisega lisamaterjali valikuga. Pragude tekkimise riski saab vähendada nii toote jäikuse vähendamisega kui ka toorikute jäiga omavahelise kinnitamisega, nt tõmmitsetega.

On täheldatud kuumpragusid termotöödeldavates sulamites, kus võivad välja sadestuda terade piiridel eutektilised sulamid. (Joon. 5.36)



Joon. 5.36 Pragude tekkimise skeem sõltuvalt legeerelementide sisaldusest

Harva võivad tekkida likvatsioonipraod võrgustikuna õmbluse kõrval (termomõju tsoonis), nt võib mark AW-6082 (AlSi1MgMn) õhukese lehtede keevitamisel, kui kasutatakse ebasobivat ALMg5 lisamaterjali).



Joon. 5.37 Likvatsioonipraod

5.4.5 Ettekuumutuse temperatuuri määramine (vt EN1011-4)järgi

Tabel 1 — Maksimaalsed soovituslikud eelkuumutuse ja läbimitevahelised temperatuurid

Põhimetall	Eelkuumutuse temperatuur	Läbimitevaheline temperatuur
	°C max	°C max
Termiliselt töötlemata sulamid lxxx 3xxx 5xxx AISI valu AlMg valu	120 ^a	120 ^a
Termiliselt töödeldud sulamid 6xxx AISI _{Si} Mg valu AISI _{Si} Cu valu	120 ^a	100
7xxx	100 ^a	80

5.4.6 Lisametalli valik

Valitakse reeglina põhimaterjali järgi tabelitest standardis EN 1011-4, veel kasutusel saksa, ameerika ja laevaehituse tabelid. Standardis võimalik valida 3 kriteeriumi järgi:

Lisametallide valik lahtritest (numbrid lahtrites vastavad tabelis B.1 antud tüübi numbrile)

Esimene rida – optimaalsed mehaanilised omadused

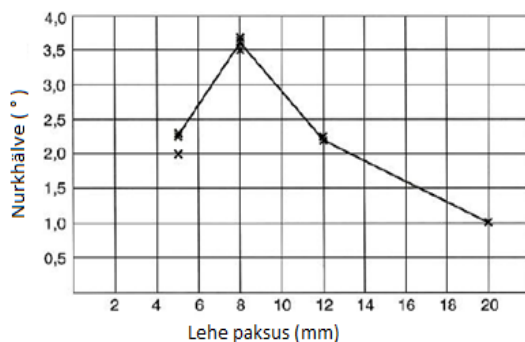
Teine rida – optimaalne korrosioonikindlus

Kolmas rida – optimaalne keevitatavus

Põhismetall						
Al	4 1 4					
AlMn	4 või 5 1 4	3 või 4 3 4				
AlMg < 1 % ^a	4 või 5 1 4	4 4 4	4 4 4			
AlMg 3 %	4 või 5 5 ^d 4 või 5	5 5 ^d või 3 4	5 5 ^d 4	5 5 ^d 5		
AlMg 5 % ^b	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5	5 5 5	
AlMgSi ^c	4 või 5 5 4	4 või 5 5 4	4 või 5 5 4	5 5 4	5 5 4	5 v 5 4
AlZnMg	5 5 5	4 või 5 5 4	4 või 5 5 4	4 või 5 5 4	4 või 5 5 4	4 v 5 4
AlSiCu < 1 % ^{e,f}	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4
AlSiMg ^g	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4
AlSiCu ^{e,f}	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4	4 4 4
AlCu ^c	Nr ^g	Nr ^g	Nr ^g	Nr ^g	Nr ^g	4 4 4
Põhismetall	Al	AlMn	AlMg < 1 %	AlMg 3 %	AlMg 5 %	Al

Kujumuunded keevitamisel

Nurkhälve sõltub materjali paksusest. Kujumuundete vähendamiseks kasutatakse tagasisammuga keevitamist (back step welding).

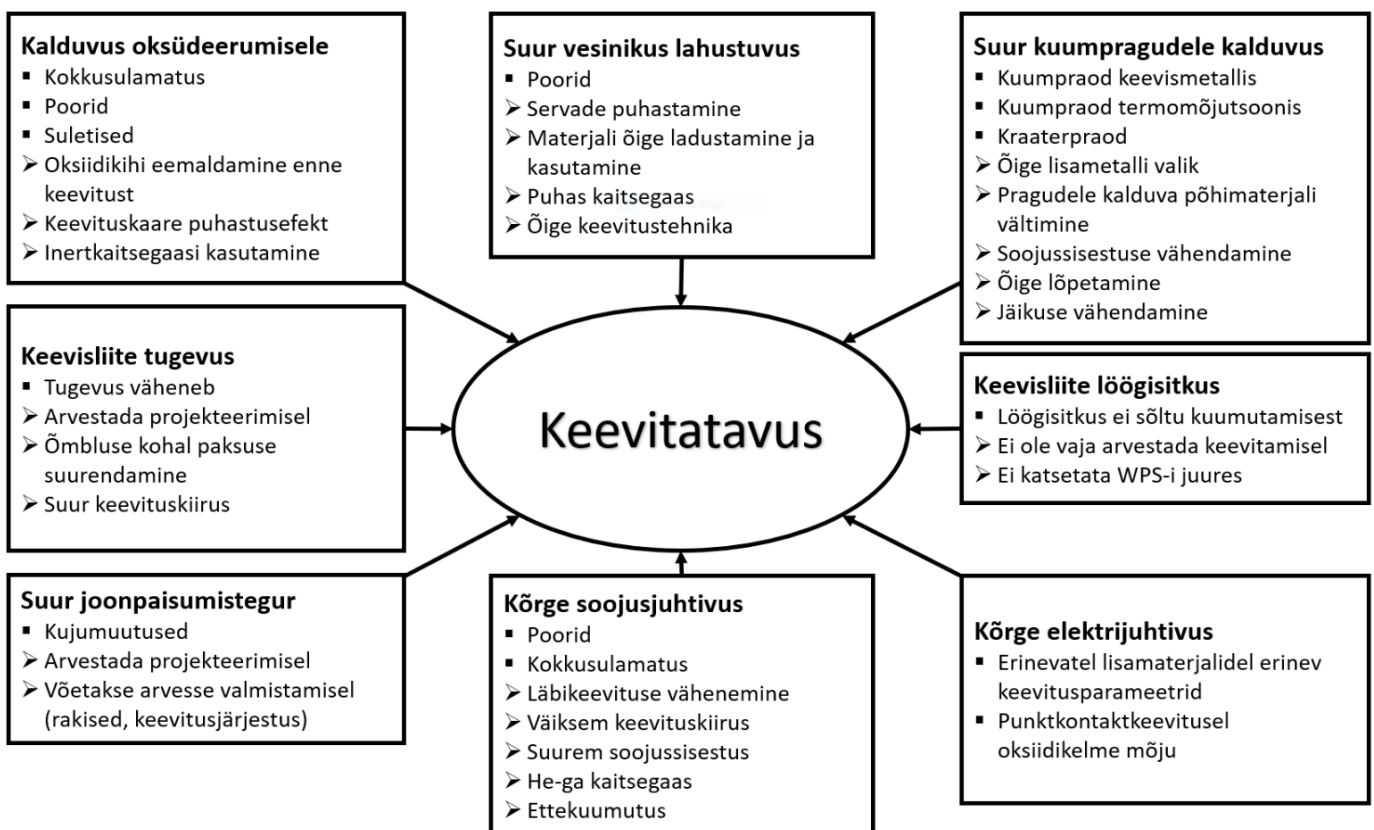


Joon. 5.38 T-liite nurkhälve Al keevitamisel

Keevitusprotsessid

Õhema materjali korral kasutatakse TIG-, paksema korral MIG-keevitust, samuti ka otshõõrdkeevitust (friction stir welding) jt, remondil käsikaarkeevitus (vt keevitatavus).

1. Al TIG-keevitusel kasutame vahelduvvoolu (AC), mis võib olla täisnurklaine kujuline ja ebasümmeetriline. Vahelduvvool-pluss komponent purustab oksiidikihi alumiiniumi pinnal.
2. MIG protsess on parem paksemate materjalide puhul, kus prioriteediks on suurem keevituskiirus ja pikad õmblused. Ei kasutata MIG-keevitust lühikaarega (U madal, I väike).
3. MIG -impulss protsess lehe paksusel 1 mm ja enam annab parema kontrolli keevitades õhemaid materjale, veel sobib CMT protsess. Al ja sulamid keevitatakse lehe paksusel 3mm ja enam pihustusrežiimis. Kaitsegaasina kasutatakse puhast Ar (99,99%) või Ar-He segu. Al keevitamiseks kasutada ainult selleks ettenähtud masinat. Keevituspüstolis ja voolikus seisnud traat tuleb enne keevitamise alustamist eemaldada. Joonisel 5.39 on kokkuvõtlikult näidatud Al keevitatavuse aspektid.

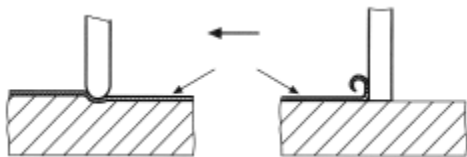


Joon. 5.39 Al sulamite keevitatavus

5.4.6 Soovitused Al tootmiskeevituseks

- eraldi ruumis keevitamine;
- erilised puhtusnõuded, nt värvida põrandad heledaks, et tolm oleks näha, puhastada pinnad tolmuimejaga;

- põhimaterjalid, lisamaterjalid hoida kuivas ja ühtlase temperatuuriga laos, vältida nende niiskumist. Kui detailide pinnad on niiskunud-oksüüd imab vett, siis detaile kuumutada taandava gaasileegiga enne keevitamise alustamist;
- terasest tööpinnad ja kinnitusrakised peavad olema värvitud või kaetud muul teel, et vältida rauaga saastumist;
- ettekuumutus TIG-keevitusel üle 5 mm ja MIG-keevitusel alates paksusest 15 mm, tavaliselt alustuskohalt taandava leegiga. Liiga pikk või kõrge temperatuuriga ettekuumutus põhjustab paksu oksüüdikihi teket;
- kõige parem viis puhastada kuivad liitepinnad on nende töötlemine teravate roostevabast terasest harjadega ja eriliste pöörlevate harjadega;
- sirgete detailide valmistamiseks kasutame kas giljotiinlõikust või ketasfreese. Faasid võib lõigata kujufreesidega. Lõikepinnad tuleb enne keevitamist puhastada roostevabast terasest pöördharjadega või käsiharjadega. Kõverjoonelise toorikud valmistatakse kas plasma- või laserlõikusega ja liitepinnad töödeldakse.
- kui eriti kõrged puhtusenõuded, siis enne keevitamist puhastada detailid, sukeldades süsinikterasest nõusse lahusega (50g NaOH+1 liiter vett) 60-70° C 10-60 sekundit, pärast HNO₃ vesilahuses neutraliseerida 30 sekundit roostevabas anumast ja veega loputada;
- anodeeritud Al tuleb pinnad eriti hoolikalt puhastada, oksüüdikiht võib takistada kaare süütamist;
- kui pinna puhastamisest on möödunud kas 2,4 või 6 tundi, tuleb liitepinnad uuesti mehaaniliselt puhastada. Kasutatavad roostevabast puhastusharjad peavad olema teravate piidega, kuid mitte liiga jäigad, et mitte suruda oksüüdi osakesi materjali sisse. Harjamisliikumised teha sirgjooneliselt. Puhastusharjad peavad olema teravad ja puhtad, sama viilide kohta-ei ole kokku puutunud rauaga;



Joon. 5. 40 Traatharjad peavad olema teravad

- ära kasuta terase lihvmasinat servade ettevalmistamisel, vaid kujufreese ja ketasfreese, soovitatavalt kõvasulamist lõikehammastega, ei ole soovitatav kasutada suruõhuga käitavaid tööriistu, kuna võib eralduda õlide aurused;
- kasutada keraamilise sideainega käiasid, mis mõeldud Al jaoks;
- käia asemel kasutada teisi pöörlevaid lõikeriistu-ketassaage, freese ja tuleb kasutada tavalisest suuremat tööriista pöörlemissagedust;
- pinnale kantud markeriga tehtud märkimisjäljed ja muu tuleb enne keevitamist kõrvaldada.

Kokkuvõte

1. Keevitatavuse mõiste ja konstruktsiooniteraste keevitatavus

1. Materjalide keevitatavust hinnatakse reeglina erinevat tüüpi pragude riski hindamise teel. Konstruktsiooniterastel on see risk seotud külmpragude (vesinikpragude) riskiga, roostevabade teraste ja mõnede Al sulamite korral kuumpragude riskiga. Al esineb veel poorsuse ja oksüüdilisandite esinemise risk.

2. Teraste vesinik- külmpragude riski hindamisel arvestatakse nii keevituse termotsükli-jahtumisajaga $t_{8/5}$ (jahtumisaeg sekundites 800°C kuni 500°C): liiga lühikese jahtumisaja korral võivad tekkida karastusstruktuurid ja TMTpraod, liiga pika jahtumisaja korral langevad terase mehaanilised omadused ja esineb ferriidi tera kasv. Nurkõmbluste jahtumiskiirus on suurem põkkõmbluste omast, mis võetakse arvutustes arvesse vastava teguriga.

3. Külmpraad teraste esinevad põhiliselt liite termomõju tsoonis karastusefekti, vesiniku difusiooni ning sisepingete toimetel.

4. Keevitatavuse hindamisel arvestatakse soojuslevi tingimustega: kas esineb tasapindne või ruumiline soojuslevi, mis sõltub kasutatud keevituse soojussisestusest ja detailide paksusest. Karastusstruktuuride olemasolu hinnatakse kaudselt kõvaduse mõõtmiste kaudu, nt WPS-de kvalifitseerimisel.

5. Külmpragude riski hindamiseks kasutatakse seostatuna karastusstruktuuride võimaliku tekkega erinevaid arvutuslikke meetodeid, mis põhinevad terase süsinikekvivalendi võrdlemisel etalonväärtustega. Standardites ei ole selgelt välja toodud kriitilist süsinikekvivalendi väärtust, kuid kirjanduse põhjal võib selleks lugeda $CE=0,41-0,43$. Süsinikekvivalendi väärtuse saab terase saatedokumentdest-sertifikaatidest iga terase valukopa või partii kohta.

6. Orienteeruvalt võib hinnata külmpragude riski suureks terastes suurema kui 360 MPA voolavuspiiriga või 500 MPa tõmbetugevusega ja paksusega 25-30 mm. Teras mark S355 on selle piiri peal.

7. Külmpragusid saab vältida keeviliite jahtumiskiiruse vähendamisega - kas ettekuumutusega või teatud juhtudel soojussisestuse suurendamisega. Ettekuumutuse temperatuuri määramiseks on soovitatav kasutada standardi EN1011-2 diagramme või siis tarkvarapakette.

8. Reeglina võivad kuumpraod esineda keevisõmbuluse metallis, nt austeniitse roostevaba terase keevisõmbuluses ja põhjuseks on madalama tugevusega faaside tekkimine keevismetalli tardumisel koos suurte sisepingetega.

Roostevaba terase keevitamine

9. Roostevabade teraste keevitatavus on seotud nende struktuuriga. Enne tootmise alustamist tuleb määrata terase rühm ja juhendada iga rühmale antud keevitussoovitustest (Vt EN 1011-3) ja terase tootjate prospektidest. Enimlevinud austeniitterased (18-8 tüüpi) on üldiselt hästi keevitatavad, kuid tuleb lisamaterjali (elektroodi) valikuga vältida puhta austeniitstruktuuri tekkimist. Soovitatav on saada keevismetallis 5-12 massi % ferriiti. See nõue on rahuldatud sama marki teraste keevitamiseks väljatöötatud lisamaterjalides.

10. Tuleb arvesse võtta, et austeniitstruktuur roostevabades terastes, sh dupleks-terastes põhjustab suuremat joonpaisumist, mis nõuab tihedamate ja pikemate traagelõubluste valmistamist. Roostevaba terase keevitamisel esineb suurem mõõtmete kahanemine, mida arvestada toorikute lõikamisel. Madalam metalli sulamistemperatuur piirab soojussisestuse suurust ja läbimitevahelist temperatuuri.

11. Korrosioonikindluse tagamiseks tuleb eemaldada keevisliitelt värvi muutnud oksüüdikiht ja selle järel pind passiveerida. Torude keevitamisel tuleb torude sisse juhtida oksüdeerumise vältimiseks inertgaasi.

12. Roostevaba terase keevitamine peab toimuma eraldi ruumis ja eraldi seadmetel võrreldes süsinikterase keevitamisega. Tuleb igati vältida materjalile ja detailidele raua osakeste sattumist ladustamisel ja käitlemisel.

13. Erimetallidest (süsinikteras+roostevaba teras) keevituselektroodi valikul tuleb analüüsida tekkivaid keevismetalli struktuure Schaeffler, De Longi, WRC92 diagrammide abil, vältides puhta austeniitstruktuuri, aga ka külmpragude, sigma hapruse piirkonda sattumist või märgatava löögisitkuse langust ferriidi suure osatähtsuse korral struktuuris.

14. Marteniitsete teraste keevitamisel tuleb kasutada ettekuumutust ja järeltermotöötlust. Dupleks-roostevabade teraste keevitamisel tuleb järgida terase tarnijate soovitusi, nt piiratud soojussisestuse kasutamist esimese läbimi keevitamisel. Üldised soovitused on enimlevinud roostevabade teraste keevitamiseks toodud terase tootjate infomaterjalides.

Alumiiniumi keevitavus

15. Alumiiniumi omadused erinevad raua omadest suurema erisoojuse ja soojusjuhtivuse poolest, mistõttu on vaja kasutada suure energiatihedusega keevitusprotsesse ja paksema materjali keevitamisel ettekuumutust.

16. Probleemideks Al keevitamisel on oksüüdi kelme detailide pindadel ja osakesed keevitusvannis, mille vältimiseks tuleb detailide servad puhastada mehaaniliselt enne keevitamise alustamist ja vältida oksüdeerivate lisandite sattumist (nt kaitsegaasist) keevismetalli. Vaja on rakendada erilisi puhtusnõudeid.

17. Al toodete konstrueerimisel tuleb arvestada, et keevituskuumuse tõttu langevad õmbluse kõrval ca 25 mm laiuses alas mehaanilised omadused kuni 30%.

18. Al ja sulamite keevitavust tuleb vaadelda erinevate materjali rühmade lõikes (seeria, alarühm klassifikatsioonis) ja üldiselt iseloomustab neid hea keevitavus, esineb ka sulameid, mille keevitavus on piiratud või mida ei soovitata keevitada. Üldised soovitused lisamaterjalide valikuks ja ettekuumuutuse temperatuuri osas on toodud EN 1011-4.

19. Teatud juhtudel kindla sulami rühma korral on võimalik õmbluse keskel kuumprao tekkimise risk, kui keevismetallis on vähe legeerelemente nagu Mg, Cu, Mg. Pragusid on võimalik vältida sobiva lisamaterjali valikuga. Kuumpragude ja suurte keevitusdeformatsioonide tekkimist soodustab metalli suur kahanemine alumiiniumi jahtumisel.

6. Keevitusdefektid ja keevisliidete katsetamine

Ettevõtte keevitusinsener ja keevitaja peavad analüüsima esinevate keevitusdefektide tekke põhjuseid ja plaanima tegevusi nende kõrvaldamiseks. Keevitajat tuleb koolitada ja anda juhised defektide vältimiseks. Ideaalis peaks keevitaja enne uue toote keevitamise alustamist keevitama nii palju proovitükke, kuni defekte enam ei esine.

6.1 Keevitusdefektide tüübid

Pindmised keevitusdefektid (surface imperfections). Avastatakse visuaalse uuringuga (VT), kuid ka kapillaarkatsega (PT) või magnetpulberkatsega (MT).

Detailide servade nihkumine koostamisel ehk keevisliite lohakas koostamine (fit-up) koos liigsuure õhupiluga detailide vahel võib viia pingekontsentraatori tekkele ja põhjustada keeviskoostus täiendavaid sisepeingeid, nt surveanumates. Nende põhjuseks võib olla lohakas detailide servade ettevalmistus (nt ebaühtlane faasimine), kõverdumine termolõikusele, traagelõmbuste purunemine keevitamise käigus ja detailide nihkumine või kujumuundet valmistusprotsessis. Saab vältida detailide hoolika valmistamisega ja koostamisega enne keevitamist. Detailide servade nihe, aga ka torude ekstsentrilisus võivad MAG-keevitusel põhjustada servade kokkusulamatuse või puuduliku läbikeevituse defekti teket.

Nurkõmbuse vaegpaksus (kõrgus) ehk a-mõõde. Nurkõmbustele on seatud piirid nii õmbuse miinimumpaksusele kui ka liigpaksusele.

Sisselõige (undercut) on õmbuse kõrvale tekkinud soonekujuline süvend, mis on keevituskaare surve poolt tekitatud, kas liigsuure keevitusvoolu või vale keevitustehnika kasutamisel. Sooned võivad tekkida liiga pika kaarega või MAG-keevitusel kõrge kaarepinge korral. Sisselõiked ja juure kahanemissooned vähendavad liite ristlõiget ja suurendavad liites pingeid, ühtlasi olles märkimisväärseks pingekontsentraatoriks. Need alad on reeglina keevisõmbuses kõige nõrgemad. Sageli on sisselõiked pragude tekke algkohaks.

Järsk üleminek keevisõmbuselt põhimaterjalile (incorrect weld toe), veel ebaõige õmbuse üleminekunurk (incorrect weld toe angle), ebaõige õmbuse üleminekuraadius (incorrect weld toe radius) on kujuhälbed, kus üleminek õmbuselt detailile on järsk väikese puutenurgaga või üleminekuraadiusega. Põhjuseks võib olla liiga madal kaarepinge MIG/MAG-keevitusel. Paljud kaasaegsed MAG-keevituseadmed võimaldavad tagada sujuva ülemineku ja vajaliku läbikeevituse.

Õmbuse liigtugevdus (excess weld metal) ja **nurkõmbuse liigkumerus** (excessive convexity). Kumera nurkõmbuse tekkimise põhjuseks on sageli MAG-keevituse liiga madal kaare pinged või väike keevituskiirus. Õmbuse järsk üleminek koos tema liigkumerusega ja sisselõike defekti kombinatsioonina halvendab oluliselt liite väsimustugevust ja võib põhjustada toote värvimisel selle piirkonna ebapiisavat korrosioonikaitset, kuna värv ei märga üleminekukohta.

Läbipõletus (burn-through) tekib auguna keevisõmbuses ja nõrgendab liidet, vähendades õmbuse ristlõiget ja olles oluliseks pingekontsentraatoriks sellisel määral, et ei ole aktsepteeritav ühelgi kvaliteeditasemel. Loetakse alati keevitusveaks.

Keevisliite **noolutusvärvid ja kuumutusvärvid** (temper colours) tekivad metalli pinna reageerimisel õhu hapnikuga keevitussoojuse toimele. Kuumutusvärvid võidakse eemaldada kas mehaaniliselt või söövitamisega spetsiaalsetes happelahustes (vt roostevaba terase keevitus).

Sisemised defektid (internal imperfections). Eristatakse ruumilisi ja lineaarseid defekte. Lineaarseid defekte loetakse reeglina ohtlikumateks kui ruumilisi liite tugevusele.

Sisemised defektid võivad olla avastatud ainult radiograafia ja ultrahelikatsetamisega. Makrolihvitud tehtuna risti keevisõmblust annavad küll infot juhuslikult valitud kohast, kuid vähe terves pikkuses õmbluse kohta. Tähtsamad sisemised defektid on järgmised.

Puudulik läbikeevitus, vaegläbikeevitus (incomplete penetration, lack of penetration) Puuduliku läbikeevituse korral detailid ei ole põkkõmbluses kokku sulatatud terve paksuse ulatuses, nurkõmbluse pealispinnast kaugeim punkt-õmbluse juur ei ole läbi sulatatud. Defekt mõjutab negatiivselt liite kandevõimet. Põhjuseks võib olla liiga väike õhupilu detailide vahel (koostamine ja traageldamine), madal keevitusvool, lohakalt faasitud detailid jm.

Tühikute (cavity) alla kuuluvad erineva kujuga **gaasipoorid** ehk **poorsus** (gas pore, porosity), mis moodustuvad ümmargustest või väljavenitatud üksikutest pooridest või üksikutest akumuleerunud pooridest e pooripesadest, tuntud kui klastritest. Poorid võivad olla suletult materjali sees kui ka pealispinnale või juurepinnale avanevad pinnapoorid. Pinnale avanevaid poore saab avastada nii visuaalse kui ka kapillaar- ja magnetpulberkatsetamisega. Poorid tekivad reeglina metallis lahustunud gaaside eraldumisel keevismetalli tardumisel. Kuna sellised poorid on ümmaruse kujuga, siis nad ei ole liiga suureks pingekontsentraatoriks. Poori pesade korral võivad nad põhjustada ülemäärased pinged tootes ja vähendada toote ristlõike kandevõimet. Standardites antakse tavaliselt pooride suurimad lubatud mõõtmed. Pooride tekke põhjuseks võib olla niiskus elektroodi kattes või detaili pindadel, ebapiisav kaitsegaasi juhtimine keevituspiirkonda, tõmbetuul töökohal, eemaldamata kruntvärvi kiht detailidel jm.

Tahked võõrlisandid ja suletised, nt räbusuletised ehk räbupesad (solid inclusions, slag inclusions, metallic inclusions). Metallsed lisandid võivad sattuda keevismetalli volframelektroodi keevitusvanni kokkupuutel, vasksuletised kas vasest juuretugede kasutamisel või kokkupuutest kaitsegaasi suudmikuga. Mittemetallsed lisandid võivad tekkida räbu või räbusti või metallide oksüüdide jääkidest. On kergesti avastatavad radiograafia või ultraheli uuringutega. Lisandid on pingekontsentraatoriks, kuna nende mehaanilised omadused erinevad metalse maatriksi omadest. Lisandite kahjuliku mõju suurus sõltub nende suuruselt ja tüübist.

Kokkusulamatus, liiteviga (incomplete fusion) tekib siis, kui pealesulatatud vedel keevismetall puutub kokku tahke põhimaterjaliga ja tema poolt edastatav soojushulk ei ole piisav õmbluse servade sulatamiseks. Keevisliite faasitud servade kohal ei ole sageli detailide külgservad kokku sulatatud. Põhjuseks on ebapiisav keevituse soojusallika energiahulk või siis kitsa keevituskaare ebaõige orientatsioon, kus keevituskaar ei puutu kokku mitte vahetult faasitud servadega, vaid sinna peale valgunud sula metalliga. Võib esineda paksema materjali MIG/MAG-keevitusel, aga ka keevitamisel vertikaalasendis ülalt alla. Servade kokkusulamatus defekti on raske avastada radiograafia uuringuga, kuid paremini ultraheliuuringutega võnkumiste suunamisega risti liitepindu.

Kokkusulamatuse defekt võib esineda ka roostevabast terasest torude TIG-keevitusel väärade keevitustehnika kasutamisel.

Praod (cracks) on põhjustatud materjali struktuuri ebapidevusest. Neid iseloomustab suurem või väiksem pindala ja nad on kitsad. Praod on teravateks ja suurteks pingekontsentraatoriks ja analoogselt kokkusulamatusega raskesti avastatavad. Üldjuhul standardid ei luba keevisõmbluses pragusid. Kui toote ekspluatatsioonis on mingil põhjusel tekkinud lokaalselt pragusid, siis tuleb nende alustus-lõpukohad läbi puurida prao edasise leviku takistamiseks, õmbluse servavahemik eemaldada käiamise või termolõikusega ja uuesti keevitada. Sellist tegevust nimetatakse remontkeevituseks (repair welding) ja seda tuleb teha vastavate protseduuride järgi ja reeglina samal kohal mitte rohkem kui kaks korda. Vastasel juhul tekivad ülekuumutuse tõttu suured struktuurimuutused liites.

Kahanemistühikud (shrinkage cavities) tekivad keevitamise lõpetuskohas ja kasvavad keevismetalli tardumise käigus. Nad võivad meenutada oma kujult pragusid. Kahanemistühik tekib sageli õmbluse lõpus madalamas kohas e lõpetuskraatris (kraatertühik) ja teda tuleb vältida õige keevitustehnika kasutamise või on MAG-keevitusseadmetel installeeritud elektrooditraadi etteandmise kiiruse vähendamise funktsioon, nt Crater fill.

6.2 Mittepurustava katsetamise meetodid ja piirangud

Keevisliidete mittepurustaval katsetamisel (kontrollil), inglise keeles tähistatakse lühenditega NDT (non destructive testing) või NDE (non destructive, examination, evaluation) saab keevistoodet katsetada ilma teda purustamata. Enimlevinud katsetamise meetodid on järgmised koos tähistustega:

1. Visuaalne uuring ehk kontroll (VT), uuemate standardite järgi on rutiinne tegevus ja ei kuulu NDT alla;
2. Penetrandi katse ehk kapillaarkatse (PT);
3. Magnetpulberkatse (MT);
4. Ultrahelikatse (UT);
5. Radiograafia katse (RT), enimlevinud, röntgenkatse või röntgenuuring.

Mittepurustava katsetamise meetodi ja ulatuse (mahu) rakendamist võidakse arvestada keevistoodete projekteerimisarvutustes varuteguri kaudu, nt surveadmetel korral kasutatakse lähenemist, et kui tehakse ainult VT=100% ja RT=0%, siis varutegur võetakse 0,7, kui tehakse VT=100% ja RT=10%, siis varutegur on 0,8 ja kui tehakse RT=50%, siis varutegur võetakse 1,0.

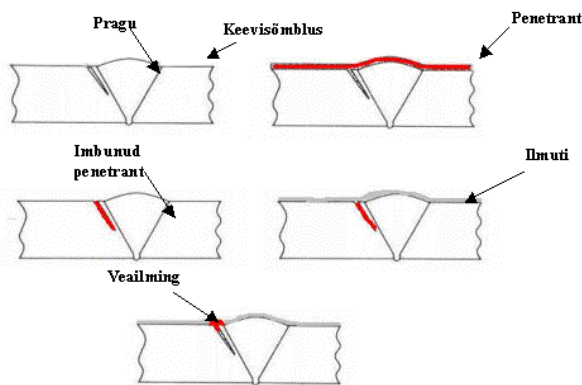
Visuaalne uurimine või kontroll (visual testing, visual inspection, VT)

Visuaalne keevisliidete uuring on lihtsaim keevisliidete vahe- ja lõppkatsetuse vorm. Keevisliidete uuritakse mõlemalt poolt (nii pealis- kui ka vastaspoolelt) ja seda saab täiendada avastatud defektide täpsemaks tuvastamiseks teiste uurimismeetoditega. Saab lisaks õmbluse kujuhälvete ja läbikeevituse suuruse avastada selliseid väliseid defekte nagu praod, poorid, sisselõiked, juure

läbikõevitamatus jt. Visuaalne uuring tuleb teha mitte kaugemal kui 600 mm objektist ja hea valgustusega. Soovitav on katsetajal VT2 sertifikaat.

Penetrandi ehk kapillaarkatse (penetrant test, PT) võimaldab avastada pinnadefekte.

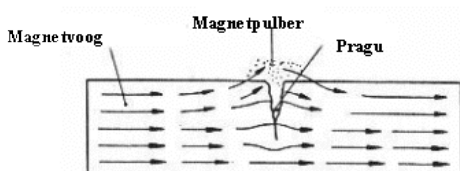
Puhastatud keeviskomponendi pinnale pihustatakse reeglina punast värvi kapillaarvedelikku ehk penetranti, mis kapillarjõudude toimele tungib pragudesse, lõhedesse, kokkukeevitamata kohtadesse, pooridesse jt pindmistesse defektidesse. Pärast seda eemaldatakse vedeliku jäägid pinnalt puhastamisega ja sinna kantakse õhukes kihina valget värvi ilmutit. Ilmuti pinnale imendub defektidest punane kapillaarvedelik ja nii ilmuvad valgele foonile defektide indikatsioonid kas punaste laikude või joontena. Katset võib teha ultraviolettkiirguses fluorestseeruva kapillaarvedelikuga, mis omab eelseid kasutamiseks halvasti valgustatavates toote piirkondades.



Joon. 6.1 Penetrandikatse (PT) ehk kapillaarkatse etapid

Magnetpulberkatse (magnetic particle test MT)

Põhineb sellel, et kontrollitava toote magnetimisel magnetjõujooned hajuvad tootes defekti kohal. Defekti korral painduvad magnetvälja jõujooned ümber defekti, sest defekti väiksema magneetilise läbitavuse tõttu tekib magneetiline puistevoog. Saab avastada pinna- ja teatud juhtudel suuri pinnaluseid defekte.

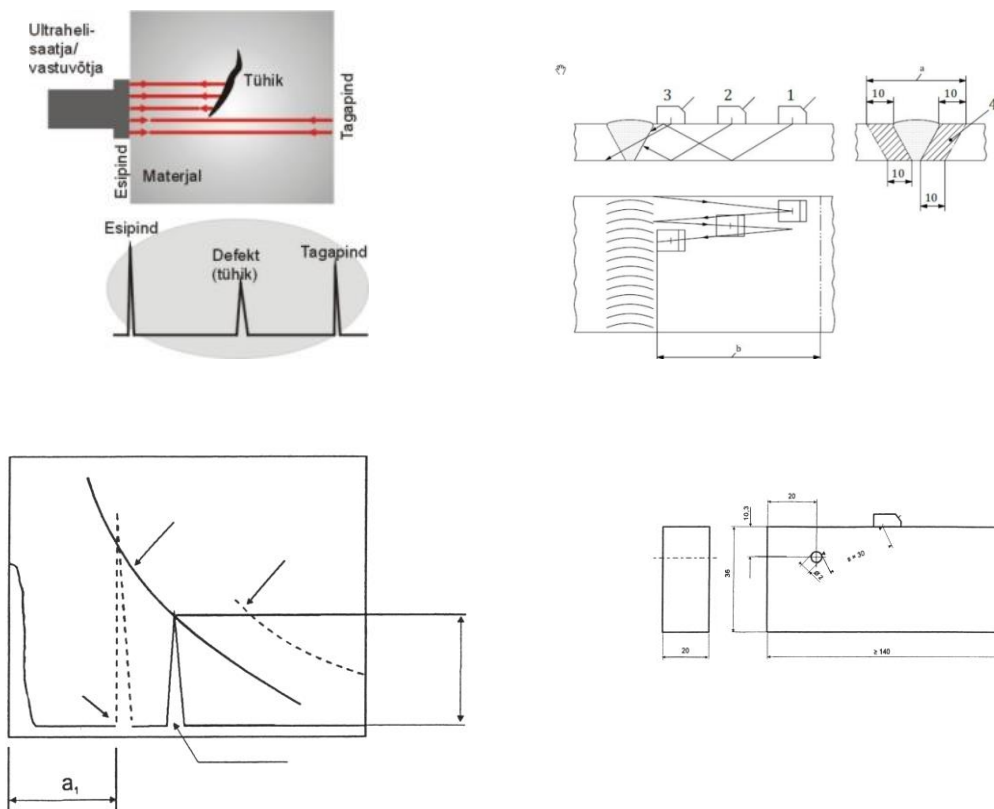


Joon. 6.2 Magnetpulberkatse (MT)

Ultrahelikatse (ultrasonic testing UT)

Ultrahelimeetod põhineb ultraheli (2...5 MHz) suunatavusel, mille tõttu on võimalik teda suunata vihuna materjali sisse kindla selle materjalile omase kiirusega ja fikseerida tema tagasipeegeldused võimalikelt defektidelt. Põhimõtteliselt mõõdetakse akustilise teekonna pikkust ehk laine levimise aega. Ultraheli

ei levi õhus ja mittemetalsetes lisandites. Põhiliselt kasutatakse käsitsi impulss kaja (ehho) meetodit, mida tähitatakse (UT-PE). Materjali suunatakse saatja-vastuvõtja andurite abil ultrahelivõnkumiste vihk erineva nurga all 0, 45, 60, 70 kraadi. Võnkumised peegelduvad detaili pinnalt, defektilt kui ka detaili vastaspinnalt (joon. 6.3). Katsetatav pind puhastatakse pritsmetest ja sinna kantakse võnkumiste juhtimiseks materjali peale kontaktvedelikku, nt geeli. Katsetaja liigutab õmbluse kõrval saatjat-andurit skaneerimisliikumistega. Saadakse kas defekti otsepeegeldus või või skaneeriva liikumise korral kaudne peegeldus defektist. Kuvari ekraani vertikaalteljel näidatakse võimenduse suurust ja horisontaalteljel kaugust saatjast-vastuvõtjast. On võimalik leida defekti suurust kui ka asukohta (sügavust) detailis.



Joon.6.3 Ultrahelikatse ja DGS meetodi kalibreerimiskõver ja avaga kalibreerimisetalon

Teatud toodete, nt torustike katsetamiseks kasutatakse DGS (distance gain size) meetodit, tuntud ka kui DAC (“Distance Amplitude Curve”) meetod. Seade kalibreeritakse nt 2 või 3mm läbimõõduga külgsuuritud avaga kalibreerimisetaloni abil ja saadakse kalibreerimiskõver. Kui skaneerimise käigus ületab vertikaalne signaal kalibreerimiskõverat, siis seade võib anda selle kohta helisignaali ja seda kohta uuritakse üksikasjalikumalt.

Viimastel aastatel on välja arendatud uus digitaalne ultrahelikatsetamise meetod, tuntud kui - difraktsioonmeetod TOFD, tähistatud UT-TOFD. Ultrahelikatsetamisel saadakse parimad tulemused nn lineaarsete defektide avastamisel (praod, kokkusulamatus, läbikõõlamatus). Standardid loevad usaldusväärseks ferriitesteraste testimist lehe paksustel üle 6 mm, praktikas testitakse edukalt ka õhemat teraslehte.

Ultrahelitestimist ei kasutata austeniitsete roostevabade teraste katsetamiseks.

Ultrahelikatsetamise eelised:

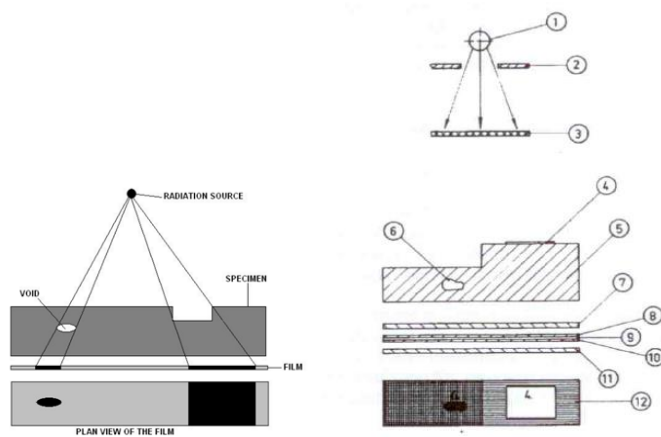
- saab avastada pragusid, arvestades nende suunda;
- saab leida defektide kauguse detaili pinnast;
- saab leida defektide kõrguse;
- saab leida valtsimisdefekte-laminaate ehk kihistumist;
- ei ole töötajate tervisele kahjulik.

Ultrahelikatsetamise puudused:

- ei sobi krobelsele pinnale;
- ei sobi väga õhukesele materjalile;
- tulemus sõltub materjali struktuuri ühtlusest;
- usaldusväärse tulemuse saamiseks nõutav testija kõrge kvalifikatsioon ja töökogemus.

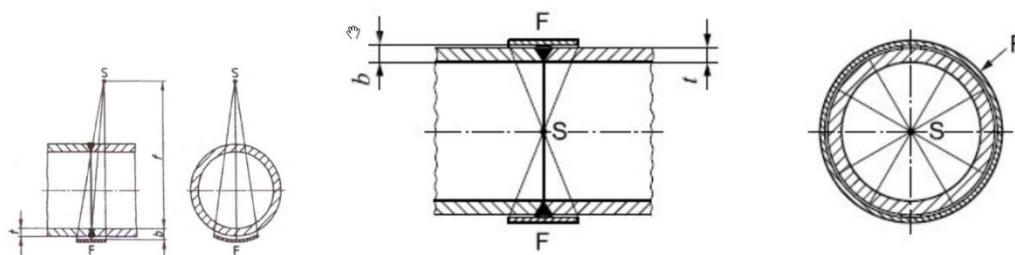
Radiograafia meetod (RT)

Radiograafia meetod põhineb kontrollitava toote läbivalgustusel röntgenkiirgusega või gammakiirgusega. Gammaradiograafia toimub radioaktiivsete isotoopidega: Co-60-terasplaadi korral läbivalgustuse paksus on kuni 50-230mm, Ir-92 korral 12-65 mm, Ce-137 korral 12-90 mm. Kasutatav lainepikkus on 0,1 nm ja footonite energia kuni 10^5 eV, mida iseloomustab suurem läbitungimisvõime kui röntgenkiirgusel. Radioaktiivsete isotoopide, nt Ir-92 tarnimiseks võib olla vajalik eriluba. Radioaktiivsete isotoopidega läbivalgustust kasutatakse paksema metalli korral, filmi kujutis ei ole nii kontrastne kui röntgenläbivalgustusel. Röntgenuuringutel kasutatakse elektromagnetkiirgust lainepikkusega 10nm ja väiksema kvantide energiaga kui gammakiirguse korral. Röntgenkiirguse lainepikkus ja läbitungimisvõime sõltuvad röntgentoru pingest, nt pingel 100 kV teraslehele paksusega kuni on see 8 mm, pingel 200kV paksusega kuni 25 mm. Röntgenuuringu eeliseks gammakiirguse ees on läbivalgustuse võimsuse reguleerimise võimalus, röntgenfilmid on kõrgema kontrastusega ja tundlikkusega, puuduseks seadmete kõrge hind ja suur mass. Kiirgus neeldub kontrollitavas tootes. Defektide kohal neeldub kiirgust vähem, mis on nähtav röntgenfilmidel (Joon. 6.4). Enim kasutatakse röntgenmeetodit terasplaadi paksustel kuni 50 mm, suurema paksuse korral gammaradiograafiat. Seoses kiirguse ohtlikkusega tuleb teostada katsetamist eemal töötavast personalist ja kasutades kaitsevahendeid. Eristatakse radiograafikatset filmi meetodil (RT-F) ja kaasaegsemat radioskoopia katset digitaalse pildi meetodil (RT-S) ja arvutuslikul radiograafia meetodil (RT-CR). Viimasel juhul kasutatakse röntgenfilmi asemel fosforplaatidel põhinevaid digitaalseid paneele DC (digital radiography).



Joon. 6.4 Röntgenkatsetamise põhimõte: 1- kiirgusallikas; 2- kiirguspiiraja; 3-filter; 4-indikaator; 5- katseobjekt; 6-defekt; 7-filter; 8- esiekraan (võimendusplaat); 9-röntgenfilm; 10-tagaekraan; 11- tagumine filter; 12-ilmutatud film

Torude keevisliidete läbivalgustamisel ühe filmiga ei saada usaldusväärset kujutist toru tsentrist kaugematelt aladelt, mistõttu tuleb teha mitu röntgenülesvõtet, millist tehnikat nimetatakse katsetamiseks läbi kahe seina (joon.6.5). Tulemused fikseeritakse röntgenfilmil või digitaalselt. Saab avastada sisemisi defekte mõõtetega kuni 1-2% materjali paksusest.



Joon.6.5 Toru röntgenkatsetamine läbi kahe seina ja gammakiirguskatse. S-kiirgusallikas, F- röntgenfilm.

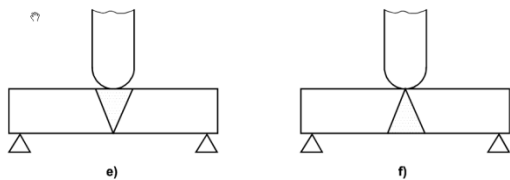
Radiograafia meetodi puudused on:

- raske avastada kokkusulamatuse defekti ja pragusid;
- seadmed küllaltki suured ja kallid;
- kiirgusohu tõttu saab teha kaugemal inimestest kui 20 m, sageli tehakse öösel;
- võib saada ebaselge kujutise (nt film kaugel objektist);
- katsetamine võrreldes teiste meetoditega kallis.

6.3 Purustuskatsed

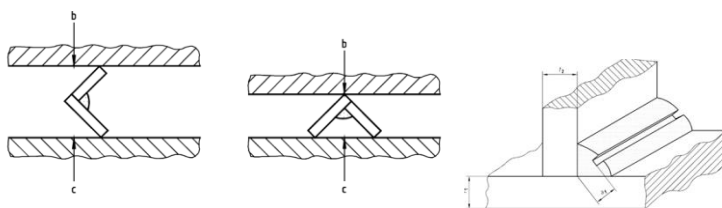
Purustuskatsed annavad kvalitatiivset infot keevistoote kasutusomaduste osas. Kuna ei ole võimalik otseselt katsetada tarnitavat keevistoodet, seetõttu katsetatakse sageli keeviskonstruktsiooniga identset proovikeha, mis on keevitatud tootmises kasutatavate keevitusparameetritega (**nn tootmiskatsed**), aga ka standardkatsekehasid. Viimaseid katsetatakse tavaliselt mitte ettevõttes, vaid tunnustatud laborites keevitusprotseduuride ehk WPS-de heakskiidul ehk kvalifitseerimisel. Standardkatsed hõlmavad **tõmbeteimi** (liite tõmbetugevus peab olema mitte väiksem kui kasutatava terase margi minimaalne spetsifitseeritud tõmbetugevus, tõmbeteimik peab katsel purunema mitte keevisõmblusest, vaid selle kõrvalt), löökpainde (löögisitkuse) ehk Charpi löökpainde katset, pökkõmbluse paindekatsed, nurkõmbluste, harvem, pökkõmbluste murdekatsed, liite mikrostruktuuri ja makrostruktuuri uuringut.

Pökkõmbluse paindekatsel painutatakse pötkliitest katsekeha nii pealispinna kui ka juurepinna poolt teatud nurgani ja uuritakse pragude tekkimist. Kui praod ületavad pikkuselt 3 mm, siis loetakse liide ebaõnnestunuks. Faasitud materjali MAG-keevitatud pötkliited võidakse rakises painutada kuni purunemiseni. Uuritakse murdepindu kokkusulamatuse defekti avastamiseks.



Joon. 6.6 Pötkliite painde- ja murdekatseskeem

Nurkõmbluste katsetamiseks, nt keevitajate ja WPS-de kvalifitseerimisel, võidakse kasutada murdekatsed. Saab avastada nii juure (õmbluse kaugeima punkti) kui ka servade kokkusulamatuse defekti, samuti räbupesasid ja poore murdepinnas. Purunemise hõlbustamiseks lõigatakse standardi järgi sügavusega ca 30% õmbluse paksusest soon. Nurkõmbluse murdekatses on sageli rakendatav keevitajate testimiseks tootmises. Murdekatsed võidakse kasutada ka paksemast plaadist pökkõmbluste hindamiseks.



Joon. 6.7 Nurkõmbluse murdekatseskeem

Keevisliite kõvaduse mõõtmine

Keevisliite makroliihvil mõõdetakse erinevate keevisliite alades nende kõvadust Vickersi meetodil ja sõltuvalt terase rühmast ei tohi nt 1 rühma terastel HV ületada 380 HV väärtust. Kui kõvaduse näit ületab standardis lubatud väärtusi, siis loetakse WPS-i kvalifitseerimise katse läbikukkunuks ja tuleb korrigeerida keevitusparameetreid või kasutada ettekuumutust. Tootestandardid või keevistoote tellijad võivad nõuda keevisliitele standardkatsetest madalamat kõvadust, mille saavutamiseks tuleb

toodet termotöödelda. Kõvadusarvu järgi võib kaudselt hinnata tekkivat mikrostruktuuri ja külmpirgude teket soodustava martensiidi hulka.

Metallograafilised uuringud

Reeglina nõutakse keevisõmblustelt täielikku läbikõõmitust ja defektide puudumist. Kõige lihtsam on võimalik seda teha keevisõmbluste ristlihvide valmistamisega ja uurimisega. Reeglina mikrolihvid poleeritakse ja söövitatakse ja nii saab määrata põhimaterjali, termomõju tsooni ja keevismetalli mikrostruktuuri ja keevitusprotseduuride tarvis mõõta nende erinevate alade kõvadust ja selle järgi hinnata martensiitstruktuuri teket. Makroliivi uuring on põhiline nurkõmbluste ja mittestandardsete õmbluste hindamise meetod, kus on näha juure läbikõõmitust, kokkusulamatust, poore, pragusid jt sisemisi defekte. Teostatakse tavaliselt suurendusega kuni 50X. Makroliivi uuring annab infot antud õmbluse ristlõike koha osas, mitte kogu õmbluse pikkuse ulatuses. Seetõttu täiendatakse seda uuringut kas magnetpulber-, ultraheli- või radiograafia uuringuga.

Keevistoote/komponendi katsetamine

Katsed viiakse läbi lõpetatud toote peal ja simuleeritakse toote kasutamistingimusi. Nii saadakse täielikku infot toote tegelike omaduste kohta. Tuleks ette näha mitte ainult katsed tavatingimustes tööks, vaid ka ekstreemseteks juhtudeks, nt autotööstuse korral autode kokkupõrgete-avariide tingimustes. Kasutatakse tootearenduse etapil ja ka seeriatootmises on sellised katsed rakendatavad mitte liiga keeruliste toodete korral. Toote purustuskatsete kasutamine on ka piiratud nende kõrge maksumuse tõttu.

Kokkuvõte

1. Kõigepealt uuritakse keevisliidet pärast keevitamist visuaalselt (VT) pinnadefektide osas. Edasi kontrollitakse keevisliidet pinnadefektide esinemisele (PT, MT) meetodil. Sisemisi defekte leitakse kas UT või RT meetoditega. Katsetamise meetodid ja ulatuse määrab kas tootestandard või tootearendaja. Iga katsetamise kohta koostatakse katsetaja poolt katseprotokoll või-raport.
2. Ultraheli-ja radiograafiakatsetused võimaldavad leida defekti mõõtmed. Röntgenkatsetusel saadakse kas film või digitaalne kujutis liitest seostatuna defekti esinemise kohaga.

7. Keevistoodete valmistamine ja kvaliteedi tagamine

7.1 Keevitus kui eriprotsess ja kvaliteedisüsteemi põhielemendid

Keevitamist loetakse standardite ISO 9000 ja EN 29001 järgi eriprotsessiks, mida tuleb teostada kirjalike juhendite ja protseduuride järgi. See on tingitud asjaolust, et tänapäevaste katsetusmeetoditega ei ole võimalik kontrollida või ohjata nn keevituse metallurgilisi tegureid nagu metalli tera kasv, erinevate struktuuride tekkimine, mikropragude tekkimist jm, aga samuti sisepingeid valmistatud keevistootes. Paljud tootestandardid näevad ette soovituslikult, et kvaliteedi tagamiseks on ettevõttel välja töötatud, evitatud ja tunnustatud (sertifitseeritud) kvaliteedisüsteem standardite ISO 3834 sarjast. Surveseadmete PED direktiiv näeb ette soovituslikku kvaliteedisüsteemi omamist või siis tema põhimõtete ja tegevuste järgimist. Keevituse kvaliteedisüsteemi väljatöötamine,

töõshoidmine ja parendamine nõuab teatavaid kulutusi ja ei taga veel automaatselt keevitustööde kvaliteeti, kuid loob selleks eeldused.

Euroopa keevitustööde kvaliteedisüsteem põhineb standardite sarjal EVS ISO 3834, kus tavatootmises kasutatakse standardi 2 osa (Standardsed kvaliteedinõuded) ja vastutusrikaste toodete korral 3 osa (Laialdased kvaliteedinõuded). Nende standardite järgi on kvaliteeditagamiseks tagada järgmiste nõue täitmist:

-kvalifitseeritud e sertifitseeritud keevitajad, kellel on vastavad kehtivad sertifikaadid, nt ISO 9606-1;

-kvalifitseeritud (heakskiidetud) keevitusprotseduuride WPS-de kasutamine, nt ISO 15614-1 katseliselt heakskiidetud protseduurid;

-keevituskoordinaatori (welding coordinator personnel) osalemine, kellel teoreetilised teadmised, kogemused ja ülesanded vastavad ISO 14731 nõuetele.

7.2 Keevituskoordinaatori ülesanded

Keevistooteid valmistava ettevõtte juht määrab oma käskkirjaga keevitustööde eest vastutava isiku, kellel on piisav keevitusala haridus ning töökogemus. Sellist isikut nimetatakse keevituskoordinaatoriks ja kui neid on mitu, siis üks neist on vastutav koordinaator. Tootestandardites, nt EN 1090-2 võivad olla esitatud nõuded keevituskoordinaatori haridustasemele ja täiendkoolitustele (vt tabel 8.1). Sõltuvalt töödest võib erandina koordinaator olla baasteadmistega, tõsisemate tööde korral kas rahvusvahelise keevitusinseneri IWE või –tehniku IWT kvalifikatsiooniga. Rahvusvahelise keevitusinseneri kvalifikatsiooni saab 446 tundi kestnud täiendkoolituse läbinu pärast edukat eksamite sooritamist. Keevituskoordinaatori, mõnes ettevõttes ka keevitusinseneri, ülesanded on toodud standardis ISO 14731, mis langevad paljuski kokku keevituse kvaliteedisüsteemi ISO3834 sarja standardi punktidega. Igal keevitusinseneril on ametijuhend kohustuste ja vastutuse osaga. Keevituskoordinaator vastutab projekti pakkumuse ehk tehnilise ülevaatusel etapil, veendumaks, et ettevõtte suudab antud materjalist tähtajaliselt kvaliteetselt keevistoodet valmistada. Keevituskoordinaator plaanib ettevõttes keevitusala tegevust: keevitajate määramine, keevitusprotseduuride koostamine, keevitusseadmete töökorras oleku tagamine ja vajadusel hankimine, keevitusmaterjalide tellimine, kontrolli ja katsetamise organiseerimine, katsetamise tulemuste hindamine ja tellijale toote kohta dokumentatsiooni koostamine ja arhiveerimine. Nt keevituskoordinaatori tegevused projekti ülevaatusel etapil on järgmised:

1. Projekti tehniline ülevaatus (materjalid-kas on vaja ettekuumutust, erinõudeid materjalidele, nõutavad materjalide spetsifikatsioonid), tellija nõuded keevitustööde koordineerija tasemele ja lõppdokumentatsioonile.

2. Ligipääsetavus keevisõmblustele ja vajadus jagada toode sõlmedeks, koostudeks ja nende keevitamise plaanimine.
3. Nõuded keevisliidete kvaliteedile defektide järgi või mõne muu standardi kasutamise nõue.
4. Keevitusprotsesside valik ja piirangud. Nõuded keevitusmaterjalide sertifikaatidele.
5. Keevitajate kvalifitseerimine. Kas on erinõudeid?
6. Keevitusprotseduuride (WPS) olemasolu ja heakskiidu meetodid.
7. Rakendatava kontrolli meetodid ja personal, protokollide vormid.
8. Korrosioonitõrje (värvimine, tsinkimine) küsimused

7.3 Keevitaja kvalifitseerimine (sertifitseerimine)

Enne keevitajate **kvalifitseerimise ehk sertifitseerimise katsed** analüüsib keevitusinsener e keevituskoordinaator paljusid aspekte, et saada ühe keevituskatsega soovitatavalt vajalik ja laiem sertifikaadi kehtivusvahemik. Enne eksamile saatmist kontrollitakse keevitaja kutsoskusi ettevõttes kindlate proovikehade keevitamisega, mida uuritakse visuaalselt. Nõutakse minimaalset defektide **taset B**, mida keevitustootmise praktikas kasutatakse vähe. Kulutused ühele sertifikaadile on Eestis kuni 120-200 eurot. Kvalifitseerimise põhimõtted on:

1. Kvalifitseeritakse ainult katsel kasutatud keevitusprotsessile, võimalik multiprotsessi katse, kus saadakse kaks kvalifitseeringut (nt torude keevitamisel).
1. Uue standardi järgi on kehtivuspiiride aluseks mitte enam põhimaterjali grupp (vana EN 287-1), vaid lisametalli grupp.
2. Arvestada liite tüübiga-kas pötkliide (BW) või nurkliide (FW).
3. Enam pötkliide ei atesteeri nurkliidet, kuid on võimalik keevitada ühe katse käigus mõlemad katsekehad.
4. Arvestada tuleb elektroodi katte tüübiga või traadi tüübiga (täistraat, täidistraat)
5. Arvestada materjali paksusega, nt pötkõmblustel, kui materjali paksus t ja pealesulatuspaksus on 3-12 mm, siis kehtivuspiirid on 3 mm kuni 2s (varem 2 t).
6. Arvestada keevitusasenditega. Keerulisem asend atesteerib lihtsama, nt asend PF plaadi korral enimlevinud.
7. Arvestada keevitusläbimite arvuga. Alati eelistada mitme kihiga e läbimiga keevitamist (parem struktuur), kuid mis tööjõu kulu osas kahjulikum. Sertifikaadil tuuakse kvalifikatsiooni tähistus ja all tabeli kujul kehtivuspiirid. Keevitaja kvalifitseeringu näide on toodud allpool.

EVS EN ISO 9606-1 : 135 P FW FM1 S t10 PB ml

Tähis	Selgitus		Kehtivus
135	Keevitusprotsess	135	135, 138
	Kaare tüüp ja siire	D (lühikaar)	D,G, S,P
P	Toote tüüp: plaat	P	P T
FW	Keevisõmbluse tüüp:	Nurkõmblus- FW	FW (nurkõmblus)
	Põhimaterjali grupp	Materjali grupp 1.2:	1-11
FM1	Lisamaterjali grupp	FM1	FM1, FM2
	Lisamaterjali tähistus	Täistraat-S	S, M
	Kaitsegaasi rühm	M21	-----
	Abimaterjalid	-	-----
	Keevitusvoolu tüüp, polaarsus	DC+	-----
t10	Materjali paksus(mm)	10	>=3 mm
	Keevismetalli paksus	-	-
	Toru välisläbimõõt	-	>=500 mm
PB	Keevitusasend	PB	PB, PA
	Keevisõmbluse üksikasja	-	-
ml	Keevituskihtide arv	mitmekihiline-ml	ml, sl

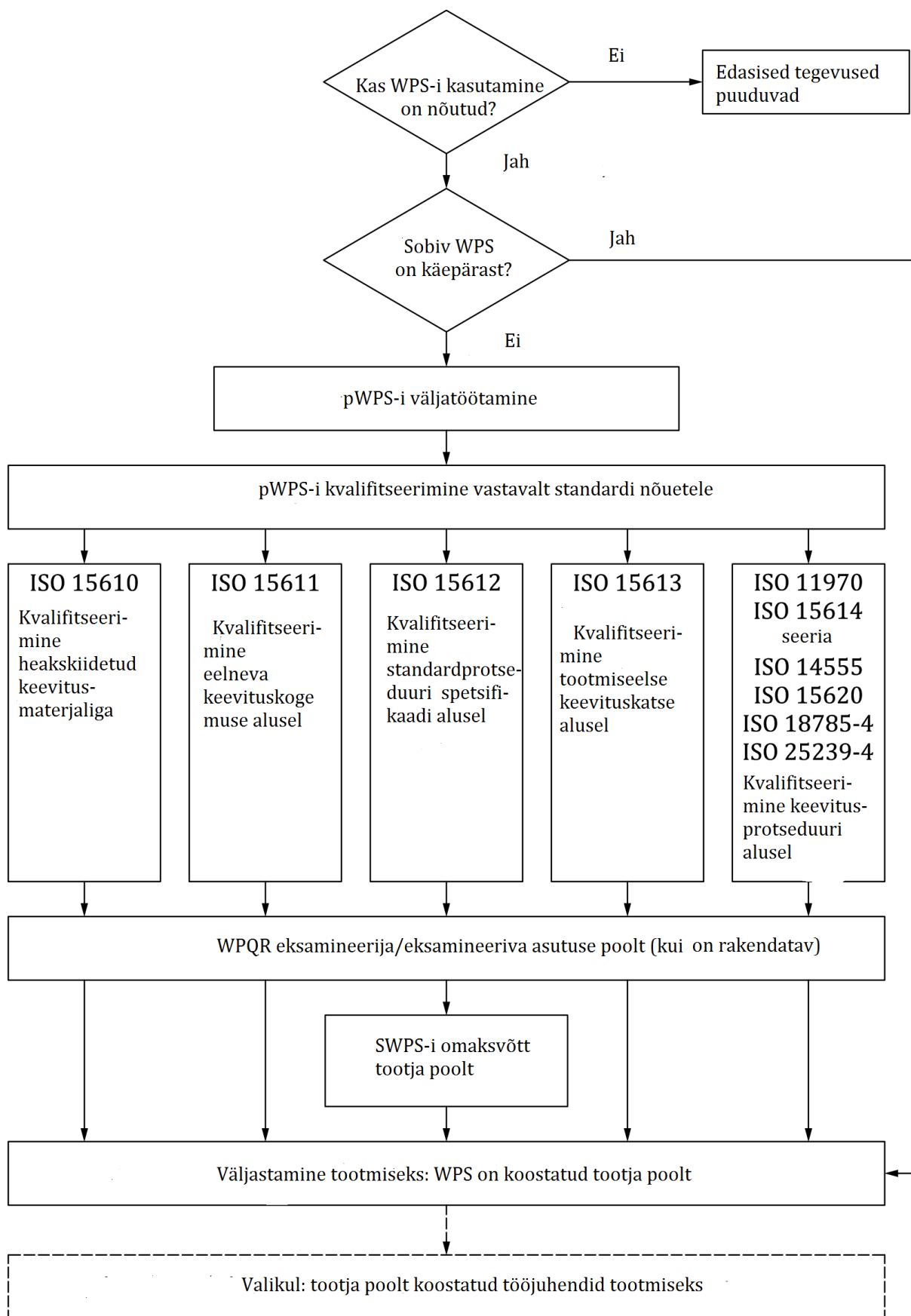
Sertifikaadil näidatakse keevitatud katseliite katsetuste meetodid. Sertifikaadi kehtivus algab katseliite eduka keevitamise kuupäevast ja kehtib reeglina 3 aastat (meetod 9.3a). Sertifikaadil kinnitab ettevõtte keevituskoordinaator tabelis iga 6 kuu järel oma allkirjaga, et keevitaja töötab edukalt oma sertifikaadi kehtivuspiirides. Viimase märkuse puudumisel kaotab sertifikaat kehtivuse. Euroopa direktiivid ja ehitusseadus peavad vajalikuks keevitajate sertifitseerimist Eesti Akrediteerimiskeskuse EAK poolt tunnustatud keevituseskustes, mida tõendab sertifikaadil näidatud EAK akrediteerimistunnus.

7.4 WPS-i koostamine ja kvalifitseerimise meetodid, WPQR-i roll

Keevitus tööde kvaliteedi tagamisel on tähtsal kohal keevitustehnoloogilise kaardi, tuntud kui **keevitusprotseduuri spetsifikaat** (welding procedure specification) välja töötamine ja heakskiit ehk kvalifitseerimine. Vajaliku info WPS-i koostamises saab keevituskoordinaator kirjandusest, terase

tarnijate soovist ning eelnevast keevituskogemusest. Järgneb WPS-i keevitusparameetrite täpsustamine koostöös kogenud keevitajaga katsetükkide keevitamisega. Tavaliselt piisab katsetüki visuaalsest uurimisest ehk kontrollist optimaalsete keevitusparameetrite leidmiseks. Keevitusparameetrid, nt kaarepinge MAG-keevitusel antakse tavaliselt tolerantsiga $\pm 1V$, keevitusvool tolerantsiga $\pm 10A$. Sellist koostatud, kuid laborikatsetega mitte tõendatud protseduuri nimetatakse eelspetsifikaadiks e **pWPS**. Eelspetsifikaadi koostamisel tuleb arvestada, et pärast positiivseid katseid võib koostada heakskiidetud WPQR-i põhjal uusi tootmise WPS-e etteantud kehtivuspiirides (vt joonis 7.2 ja 7.3). Neid kehtivuspiire tuleb arvestada juba eelspetsifikaadi koostamisel, et tagada tootmise nõudeid : pötkõmblused teatud materjali paksuse ulatuses, (nt kehtivusvahemik 3mm kuni 12mm, kui katsel kasutatud proovikeha paksus on 6 mm), keevitusasendid jm. Kui tegemist ei ole standardse pötkõmbluse või nurkõmblusega, siis keevitatakse reaalselt õmblust kirjeldav katsekeha ja teostatakse heakskiit standardi ISO 15613 järgi, mis ei sisalda kõiki mehaanilisi katseid võrreldes ISO15614-1-ga. Ülejäänud joonisel 7.2 toodud standardid võimaldavad vähendada teatud tingimuste korral kulutusi WPS-dele. Keevitusseadmete ja keevitusmaterjalide tootjad pakuvad oma klientidele nn standardprotseduure ISO 15612 järgi, mis sobiksid lihtsamatest konstruktsiooniterastest paksusega alla 30 mm detailide keevitamiseks ainult väljatöötaja seadmetel. Sellised protseduurid sobivad kaasa andmiseks keevitajale eurosertifikaadi keevituskatseks, kuid mitte kohe tootmises kasutamiseks.

Eelspetsifikaadi pWPS-i ametlikuks heakskiiduks pöördub ettevõtte taotlusega Eesti Akrediteerimiskeskuse (EAK) poolt tunnustatud eksamineeriva asutuse poole. Nimetatud asutuste loend on toodud EAK kodulehel. Enimlevinud protseduuri heakskiidu meetod on katseline meetod ISO 15614-1 järgi, mis seisneb kindlate mõõtmega katsekehade keevitamises tootmises kasutatavate seadmetega ja põhjalikus uurimises nii mittepurustava meetoditega kui ka purustuskatsetega. Kui katsetulemused on positiivsed, vormistatakse keevitusprotseduuri kvalifitseerimise aruanne (welding procedure qualification report- WPQR). WPS-de heakskiit on seotud kuludega ja sõltuvat keevitatavast materjalist ja selle paksusest, aga ka toote tüübist ja mõõtmest. Eestis võivad kulutused ühe WPS-i heakskiiduks ulatuda 450-800 euronit või isegi rohkem. Edasi võib tootja koostada tootmise WPS-ide ehk kirjalikke tööjuhendeid kehtivuspiirides, tavaliselt väljastatakse WPS keevitajale kasutamiseks. Nii lubatakse keevitada sama tüüpi teatud materjali paksuse ulatuses, keevitusasendites jm, kui jääda kindlatesse soojussisestuse piiridesse. Nt karastuvale terastele on lubatud soojussisestuse vähendamine kuni -25%, kulumiskindlatele terastele suurendamine + 25%, kuid praktikas näidatakse dokumentides sageli soojussisestusele tolerants $\pm 25\%$. Tavaliselt suurte kontsernide erinevates struktuurides, kus kasutatakse erinevaid keevitusseadmeid, koostatakse nende konkreetsete ettevõtete seostatud protseduurid. Uus standardi ISO 15614-1 versioon 2017. aastast lubab teoreetiliselt kasutada lihtsamate toodete korral WPS-e ka teistes ettevõtetes, kuid väljatöötaja vastutusel ja ilmselt kirjalikul nõusolekul. Igat projekti tuleb hinnata ülevaatuse etapis WPS-de olemasolu osas nii standardite kui ka tellija nõuete osas. Ei tuleks mitte ainult rahuldada tellijate või järelvalveorganite nõudmisi, vaid sisuliselt tagada õiged keevitusparameetrid ja toote kvaliteet.



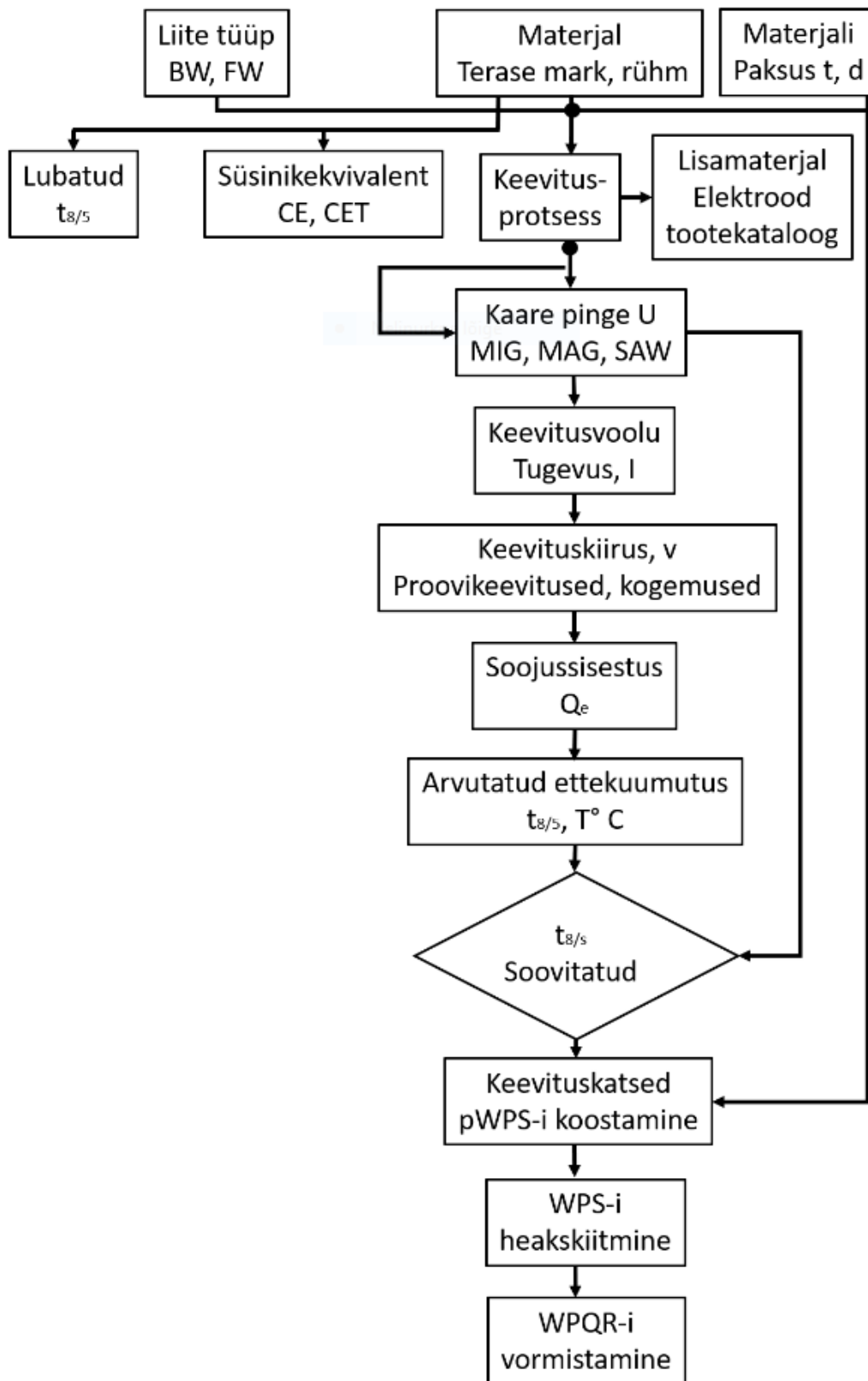
Joon. 7.2 Keevitusprotseduuri kvalifitseerimine (heakskiit) ja tootmise WPS-i koostamine

Keevitusseadmete tootjad hakkavad pakkuma uudseid infotehnoloogilisi lahendusi, kus standardsed keevitusparameetrid laaditakse alla keevituse poolautomaati toote joonisel toodud triipkoodi alusel.

Keevistoote valmistamisel kasutatud keevitusparameetrid salvestatakse arvutis ja neid on võimalik esitada tellijatele ja keevitusinsener saab analüüsida valmistusprotsessi. Selline lähenemine võimaldab teoreetiliselt ehituskonstruksioonide valmistamisel ettevõtte keevituskoordinaatori vastutusel vähendada mittepurustava katsetamise NDT ulatust tootmisprotsessis (punkt 12.4.2.3 standardis EN 1090-2).

Keevitusprotseduuride kehtivus.

Igale liitele ei ole vaja koostada eraldi WPS-i. Samatüübilistele liidetele saab pärast edukat keevitatud ja katsetatud proovikehasid välja antud WPQR-i alusel koostada ettevõtte siseseid protseduure WPS-e, mis on ka **kirjalikeks tööjuhenditeks** keevitajatele. Siit jäeldub, et WPQR võib olla olulisem dokument tootmise planeerimisel kui keevitusprotseduur WPS. Tuleb märkida, et kui neid kasutatakse samas ettevõttes, kus nad on välja töötatud, siis ajalised piirangud nende kehtivusele puuduvad.



Joon. 7.3 WPS-heakskiidu plokk-skeem

Keevitusprotseduuri spetsifikaat (WPS)

Keevitusprotseduur:

WPQR No. :

Ettevalmistus-ja puhastusmeetod:

Tootja :

Põhimaterjali tähistus:

Elektroodimetalli siirdeviis :

Materjali paksus (mm) :

Keevisliite ja-õmbluse tüüp:

Välisläbimõõt (mm) :

Õmbluse ettevalmistuse üksikasjad(eskiis)*

Keevitusasend :

Liite eskiis	Keevitusjärjestus

Keevitamise üksikasjad

Läbim	Keevitus protsess	Lisamater- jali mõõtmed	Voolu tugevus A	Kaare- pinge V	Voolu tüüp, polaarsus	Traadi etteande- kiirus	Läbimi pikkus/ keevituskiirus	Soojus sisestus*

Lisamaterjali tähistus ja tootja:

Eri kuumutamine või kuivatamine:

Tähistus: gaas/räbusti :- kaitsel :	Muu info*, nt.:
- :juure kaitsel:	võngutamine (läbimi maksimalne laius):
Gaasi kulu - kaitsel :	Ostsilleerimine : amplituud, sagedus, seisutusaeg:
- juure kaitsel :	Impulskeevituse üksikasjad:
Volframelektroodi tüüp/suurus :	voolukontakti/detailide kaugus:
Juure avamise/juuretoe üksikasjad:	Plasmakeevituse üksikasjad :
Ettekuumutuse temperatuur :	põleti kaldenurk :
Läbimitevaheline temperatuur :	
Jälkuumus:	
Ettekuumutuse hoidmistemperatuur:	
Järeltermotöötlus ja/või vanandamine:	
(aeg,temperatuur, meetod,kuumus- jahtumiskiirused*):	

* kui on nõutud

Tootja	Eksamineerija
(nimi, allkiri, kuupäev)	(nimi, allkiri, kuupäev)

8. Ehituslike keeviskonstruktsioonide valmistamine ja katsetamine

Keevistoodete nomenklatuur on lai ja paljudele tooterühmadele on toodud nõuded tootestandardites nii valmistamisele kui ka katsetamisele. Allpool on analüüsitud 2 tooterühma-ehituslike metallkonstruktsioonide ja leekkuumutusega surveanumate standardites toodud nõudeid. Kirjeldatud lähenemist sõltuvalt toote keerukusest võib kasutada uute toodete konstrueerimisel, valmistamisel ja katsetamisel. Tooted on tavaliselt jagatud alamrühmadesks tooterühmade sees. Nõuded keevisliidete kvaliteedile varieeruvad sama tooterühma sees sõltuvalt kasutustingimustest, koormustest, temperatuurist jm. Ehituslike kandvate metallkonstruktsioonide valmistamise kõik etapid on reglementeeritud standardites EN1090-1,2, kus kasutatakse selle kirjeldamiseks terminit „tehase tootmisohje“ ehk lühendit FPC (factory production control). Sõltuvalt ehitamisklassist esitatakse ehituskonstruktsioonide valmistamisel erinevaid nõudeid nii keevitustehnoloogiale, keevitajatele, katsetamisele (tabel 8.1). Katsetamise meetodid ja ulatus tuuakse tavaliselt dokumendis „Keevitusplaan“.

Ehituskonstruktsioonide valmistamisel tuleb juhendada konstruktsiooni ehitamisklassist.

Ehitamisklassid

Eristatakse madalamat klassil EXC1 (põllumajandusehitused), klassi EXC2 (staatiliselt ja väsimusele koormatud konstruktsioonid), klass EXC3 (sillad) ja klass EXC4 (eriotstarbelised konstruktsioonid). Nõuded keevituskoordinaatori haridusele sõltuvalt ehitamisklassist, terase margist ja paksusest on toodud tabelis 8.1.

Tabel 8.1 Nõuded keevitustöödele sõltuvalt ehitamisklassist

Nõuded	EXC1	EXC2	EXC3
Keevitajad(sertifikaadid)	ISO 9606-1	ISO 9606-1	ISO 9606-1
Keevitustööde koordinaator (tase)	Tagab piisava järelvalve	S355 t≤25 mm, B t=25-50mm, S (IWT) S420-S700 t≤25 mm, S(IWT) t>25mm, C(IWE)	S355 t≤25 mm, S(IWT) t=25-50mm, C (IWE) S420-S700 t≤25 mm, C (IWE) t>25mm, C(IWE)
Keevitusprotseduurid (WPS)		Katseline ISO15614-1, tootmiseelne katse ISO 15613, standardprotseduur (ISO 15612)	Katseline ISO15614-1, tootmiseelne ISO15613, standard (ISO 15612-kui lubatud projektis)
Keevitusdefektid ISO5817 järgi	Tase D , a-mõõde tase C	Tase C , a-mõõde tase B	Tase B
Rutiinne katsetamine NDT	Kõik liited uuritakse VT (ka a-mõõde) Kui avastatakse pinnadefektid, siis kas PT või MT		
Rutiinsed lisakatsed	Põiksuunas BW- 0% Põiksuunas FW-0%	Põiksuunas koormus BW- 10% Põiksuunas koormus FW-5%	Põiksuunas BW- 20% Põiksuunas FW-10%
Keevitamise tootmiskatsed		>S460	Sillad

Märkus: Keevitukoordinaatori haridustasemed. B-baastasemel; S-standardtasemel- IWT; C-laiendatud tasemel-IWE

WPQR-i alusel koostatud uute tootmise WPS-de sobivuse kontroll ehk tüübikatsed

Kui ettevõttele on käepärast pärast läbitud edukaid keevitusprotseduuri WPS katseid välja antud keevitusprotseduuri heakskiidu aruanne WPQR (welding procedure qualification record), siis on ettevõtte keevitusinseneril õigus koostada kehtivuspiirides uued tootmise WPS-id. Uute WPS-ide sobivuse demonstreerimiseks tööolukorras tuleb katsetada vähemalt esimest 5 tootmises valmistatavat keevisliidet pikkusega 900 mm ja kasutama kvaliteeditaset B defektide järgi. Viimane nõue on tunduvalt kõrgem kui tootmises kasutatav. Standard ei määra täpselt katsemeetodeid, kuid hõlmab ilmselt 1 pinnadefektide ja 1 sisemiste defektide määramise meetodit. Kui katsetamise tulemus on negatiivne, tuleb välja selgitada selle põhjused. **Sellist katsetamist nimetatakse tüübikatseteks.** Eesti ettevõtted ei ole dokumenteerinud tüübikatseid.

Keevisõmbuste rutiinsed katsetamised

Keeviskonstruktsioonide katsetamise meetodid ja ulatus protsentides õmbuste üldarvust sõltuvad nii õmbuse tüübist kui ka ehitamisklassist. **Kõiki** keevisõmbusi hinnatakse välistele defektidele visuaalselt **VT** meetodil. Selle uuringu käigus mõõdetakse nurkõmbuse kõige tähtsamat mõõtu-õmbuse paksust **a** ja hinnatakse pinnadefekte. Kui avastatakse pinnadefekte, siis uuritakse neid magnetpulbermeetodil **MT** või kapillaarmetodil **PT**. Standard EN1090 näeb ette lisaks eelpooltoodud katsetamisele veel täiendavad katsetused, nimetatud kui rutiinsed lisa-NDT katsed, mille all mõeldakse katsetamist sisemiste defektide avastamiseks. Võidakse kasutada nii radiograafia- (**RT**) või ultrahelikatsetamist (**UT**). Nimetatud katsed on rakendatavad pökkõmbustele **BW**, kuid on raskesti teostatavad nurkõmbustele. Nurkõmbuste sisemisi defekte on võimalik avastada ainult õmbusest makrolihvi tegemisega või murdekatsuga, mis ei ole tootmisprotsessis rakendatav. Tabelist 8.1 selgub, et kõige madalamal ehitamisklassil **EXC1** (põllumajandushooned) ei ole ette nähtud liidetele mittepurustavat katsetamist (**NDT**), kõrgematel ehitusklassidel, nt alates **EXC2** (staatiliselt koormatud ja väsimuskoormused) tehakse õmbuste rutiinne mittepurustav katsetamine, pökkõmblustest **BW** katsetatakse 10%, ehitusklassil **EXC3** 20% pökkõmblustest. Nurkõmbustele rutiinset kontrolli ehitusklassides **EXC2** ja **EX3** ette ei nähta ja võib piirduda visuaalse **VT** uuringuga. Standardis EN1090-2 nn tootmise rutiinse kontrolli käigus ei ole näidatud rakendatavad konkreetset lisa-**NDT** meetodid. Kuna **UT** sobib paremini tasapinnaliste defektide nagu õmbuse servade kokkusulamatus ja praod avastamiseks, siis on see meetod eelistatav **MAG**-keevitusel. Kuna käsikaarkeevitusel võib esneda mahulisi defekte räbupesade või pooride näol, siis on otstarbekohasem kasutada **RT** meetodit, tavaliselt röntgenmeetodit. Ehitamisklassidele **EXC3** ja **EXC4** tuleb kõrgtugevate teraste ($R_e > 460$ MPa) kasutamisel ette näha tootmiskatsed.

Katsetamise ulatuse võimalik vähendamine ehk keevitusklasside meetod

Standardis EN1090 toodud ehitusklasside **EXC** nõuded katsetamisele ei erista erineva tähtsusega ja kriitilisusega õmbuseid. Standardi EN1090-2 viimane versioon 2018. a pakub välja uue lähenemise keevisõmbuste katsetamise meetodite ja ulatuse osas, lähtudes keevisliite kriitilisusest ja koormuse liigist (staatiline või väike väsimuskoormus, suur väsimuskoormus). On toodud sisse uus termin-keevitusklassid. Kasutatakse keevitusklasse tähistusega **WIC** (welding inspection classes), neist **WIC1** on madalaim ja kõrgeim **WIC5**. Nimetatud lähenemine pakub huvi ka teiste keevistoodete projekteerimisel. Uus lähenemine võimaldab vältida ohtlikke olukordi ja suurendada vajadusel katsetamise ulatust (nn lisakatsed), kuid ka lubada lähtudes pikast positiivsest tootmiskogemusest vähendada katsetamise ulatust ja hoida nii kokku kulutusi katsetamisele. Saab arvesse võtta reaalseid valmistustingimusi, nt kui keevitatakse rasketes asendites (laeasend), ehitusplatsidel tehtavad keevitustööd, ajutiste kinituselementide keevitamine jm. Väljavõtte standardi lisast on toodud tabelis 8.2. Tabelist on näha, et koormust mittekandvaid õmbusi **WIC1** klassist ei ole vaja täiendavalt katsetada. Näiteks **nurkõmbusi** tuleks katsetada ainult pinnadefektide avastamiseks ulatuses **5-100% MT** või **PT** meetodil, kuid mitte **UT** või **RT** meetodil.

Tabel 8.2 Väsimusele mittetöötavate ja mitteolulise purunemisega keevisõmbuste katsetamine

Keevituskontrolli liite purunemise tingimus	Õmblus	RT	UT	MT/PT
WIC1, koormus puudub	Kõik õmbuste tüübid	0	0	0
WIC2 Staatiliselt koormatud	Läbikeevitatud pökkõmbused, T-liited pökkõmbustega	0	10	10
	Osaliselt läbikeevitatud	0	5	5
	Nurkõmbused	0	0	5
WIC3, koormatud piki pkkõmbuse telge, EXC2,3	Läbikeevitatud pökkõmbused, T-liited	0	20	20
	Nurkõmbused	0	0	20

Klassis WIC2 kõik koormust kandvaid pökkõmbusi ehitamisklassist EXC2 ei katsetata radiograafia meetodil, vaid 5-10% UT ja 5-10% MT/PT, mis on mõnevõrra vähem kui rutiinsetel katsetel. Näiteks nurkõmbusi katsetatakse WIC2 osas ainult 5% pinnameetodiga MT/PT. Suure väsimuskoormusega läbikeevitatud pökkliiteid WIC4 ja WIC5 kontrollitakse sõltuvalt liitest 0 kuni 10% RT, 20-100% UT ja 100% MT/PT

Keevistoodete katsetamine ja kontroll

Keevisliidetega toodete valmistamisel kasutatakse kvaliteedi hindamisel erinevaid tegevusi, mida nimetatakse kontrolliks (inspection) ja katsetamiseks (testing). Eestikeelses standardikirjanduses on kasutatud ka terminit „inspekteerimine“. Siia alla kuuluvad nii toote mõõtmete ja kuju hälvete mõõtmine, hüdraulilised katsed jm, mille käigus mõõtmiste tulemused protokollitakse ja neile antakse hinnang „aktsepteeritud/mitteaktsepteeritud“.

Projekteerija peab arvutustes ja katsetamise meetodite ja ulatuse määramisel alati arvestama keevisliite purunemisega kaasnevate riskidega.

Tootmiskatsed

Vastutusrikaste toodete ja kõrgemate mehaaniliste omadustega teraste, nt termomehaaniliselt töödeldud teraste keevitamisel (terased alates teatud voolavuspiirist) võidakse nõuda tootmise käigus purustuskatsete tegemist. Keevitatakse nt tootmisõmbuste külge jätkuna samade keevitusparameetritega plaadid, mida uuritakse ja katsetatakse põhjalikult. Nimetatud katseid nimetatakse **tootmiskatseteks**. Kuna tootmiskatsed on seotud teatud kuludega, tuleb nendega arvestada juba hinna kalkulatsioonide koostamisel projekti ülevaatusel etapil. Tuleb märkida, et keevitatud proovikehade arvu ja katsetamise ulatust on lubatud tunduvalt vähendada masinkeevituse (standardites nimetatud mehhaniseeritud keevitus) ja robotkeevituse kasutamisel.

Korrosioonikaitse

Metallkonstruktsioonide korrosioonikaitse põhineb nende värvimisel või kuumtsinkimisel.

Projekteerija määrab projekti spetsifikatsioonis (EN ISO 12944-1 2000) korrosioonikaitse oodatava **kestvuse** (durability) mis iseloomustab oodatavat eluiga kuni värvikihi parandamiseni.

Metallkonstruktsioonide korrosioonikaitse hõlmab pinna ettevalmistust, värvimist või kuumtsinkimist.

Projekteerija poolt koostatakse toimivusspetsifikatsioon, mis määrab kindlaks:

- a) korrosioonikaitse oodatava **kestvuse** s o värvikihi kestvuse;
- b) korrodeeruvusklassi e keskkonnatingimused.

Eristatakse 3 kestvusklassi: madal (**L**) kestvusega 2-5 aastat; keskmine (**M**) kestvusega 5-15 aastat; kõrge (**H**) kestvusega üle 15 aasta.

Värvikihi kestvus sõltub suurel määral, millises atmosfäärikeskonnas (maal, linnas, tööstuspiirkonnas, mereõhus, jm) ta töötab ehk korrodeeruvusklassist ja pinna ettevalmistusklassist e puhastamisest värvimise alla (vt tabel 8.3).

Põhilised **korrodeeruvusklassid** (atmosphere –corrosivity cathecopy)valitakse järgmisest rühmast ja tähistusega: **C1**- väga madal, nt köetavad hooned, kauplused, büroohooned, **C2**- madal, mitteköetavad hooned, nt spordihallid, laohooned jm; **C3**- keskmine, tootmishooned, kus kõrge niiskusesisaldus ja reostus; **C4**- keskmine;**C5-I** –väga kõrge (tööstusatmosfäär)jne.Tabel 8.3 Pinna ettevalmistusklassi valik sõltuvalt kestvusest ja korrodeeruvusklassist.

Kestvus, aastates	Korrodeeruvusklass	Pinna ettevalmistusklass
Üle 15 aasta	C1	P1
	C2 kuni C3	P2
	Üle C3	P2 või P3
5 aastat kuni 15 aastat	C1 kuni C3	P1
	Üle C3	P2
Kuni 5 aastat	C1 kuni C4	P1
	C5 kuni Im	P2

Eristatakse kolme **ettevalmistusklassi**: **P1**- pinda puhastatakse või tehakse kergelt, **P2**,- põhjalik puhastus, **P3**-väga põhjalik pinna puhastus, servad tuleb töödelda kumeraks jm.Pinna puhastamiseks kasutatakse jugatöötlust kas haavelpitsiga või liivapitsiga,tähistatud **Sa** mehaanilist puhastus harjade või lihvketastega-**St**, leekpuhastust **F**.

Kestvuse ja korrodeeruvusklassi alusel saab standardi ISO 129445 alusel määrata antud värvitüübile värvisüsteemi-**värvikihtide arvu ja ka paksuse**. Värvisüsteemide tähistus tähtede ja numbritega, nt nagu A2.02 on toodud standardites. Kui tehakse ise värvimistööd, tuleb

kontrolli all hoida värvikihtide paksust ja keskkonna temperatuuri ja õhu niiskust. Tuleb esitada vastav tööde teostamise protokoll.

Tellijale esitatav dokumentatsioon

Ehituskonstruksioonide valmistamisel esitatakse tellijale tema soovil tootekirjeldus ehk spetsifikatsioon, toimivus -(vastavus)deklaratsioon, materjalide sertifikaatide koopiad, keevitajate sertifikaatide koopiad, WPS-ide koopiad, mõõtmiste ja katseprotokollid, värvimistöde protokollid. Mõõdetakse ja protokollitakse konstruktsioonide mõõtmed ja kujuhälbed.

9. Leekkuumutuseta surveanumate valmistamine ja katsetamine

Surveanumate projekteerimist, valmistamist ja katsetamist reglementeerib standardite EN 1344

5 sari, kokku üle 1000 lk teksti. Selle rühma toodetele esitatakse kõrgeid nõudmisi, mis sõltuvad mahuti moodulist (mahu ja rõhu korrutis), aga samuti koormusest-staatiline, dünaamiline, väsimuskoormus, samuti materjali roomavuskindlusest, korrosioonikindlusest (korrosioonpragunemine), aga ka nende valmistamiseks kasutatavatest materjalidest. Surveanumate keevisõmbluste NDT ulatuse määrab katserühm ja selle alarühm, alates kõige kõrgemast rühmast 1 ja piirneb madalaima katserühmaga 4. Eristatakse koormust vastuvõtvaid nn **juhtivaid (governing)** ja mitteolulisi, nt tugielementide keevisõmblusi.

Tootmiskatsed tehakse surveanumate kesta juhtivate piki- ja ringõmblustele sõltuvalt kasutatavatest terase markidest, toote kasutustemperatuurist, katserühmast. Anuma pikiõmbluste katsetamiseks kinnitatakse võimalusel ühe silindrilise kesta otsa külge plaadid nii, et nad jätkaksid liite serva ja kopeeriks keevitatavat liidet, keevitamisel kasutatakse samu keevitusparameetreid kui põhiõmbluse keevitamisel. Ringõmbluste korral keevitatakse katseplaadid eraldi anumast.

Tabelis 9.1 on toodud näitena joonisel 9.1 toodud surveanuma katsetamise ulatus 2 katserühma lõikes.

Surveanumate valmistamine standardi nõuete järgi

1.Koostatakse kvaliteedipaan, kus vastutusrikkad keevisõmblused identifitseeritakse –antakse nt number, näidatakse kindlal vormil ettenähtud NDT ulatus, hinnang tulemustele „õmblus(ed) aktsepteeritud/mitteaktsepteeritud“ koos katseprotokollide numbritega. Õmblused seostatakse WPS-de ga.

2.Materjalide kontroll ja jälgitavus. Surveanuma tootja identifitseerimissüsteem peab tagama, et nii põhimaterjalid kui ka keevitusmaterjalid oleksid markeeritud. Enne valmistamist kontrollitakse põhimaterjali paksust.

Materjali jälgitavust kuni algmaterjali markeeringuni tehakse järgmiste meetoditega:

- a) algmaterjali markeeringu ülekandmine nähtavale kohale valmis anumal;
- b) kodeeritud markeerimisega igale detailile ja selle nätamisega toote eskiisil.

3.Materjalide sertifikaadid. Materjali kättesaamisel kontrollitakse kõiki sertifikaate. Survemahutite korral tuleb veenduda, et sertifikaadil toodud mehaanilised või keemilised omadused vastavad

nõuetele. Euroopa turule tootmisel peavad kõik teraste sertifikaadid kinnitama CE märgisega oma vastavust nõuetele.

Markeeringute ülekandmisel tema tükeldamisel ei tohi olla kahjustatud materjali omadused, nt survepressimisega kantud keevitaja märgised võivad olla pingekontsetraatoriteks ja olla keelatud.

4. Keevitajad

Keevitajad on kvalifitseeritud ISO 9606-järgi, sertifikaadid on kehtivad ja nendel on viide surveeadmete direktiivile PED.

5. Kvaliteedinõuded keevisliidetele

Keevisliidete kvaliteeditase defektide järgi ISO5817 on põhiliselt **C**, mida saab lugeda keskmiseks.

6. Keevitusprotseduurid

Kasutatakse tootja katseliselt heakskiidetud WPS-e või WPQR-de alusel koostatud tootmise WPS-e, millel on viide surveeadmete direktiivile PED. Mittesurvealuste õmbluste korral, nt kandmiktugede, tugijalgade keevitamiseks on lubatud kasutada standardseid jt keevitusprotseduure, ISO 15612 ja ISO 15611 järgi, mida pakuvad keevituseadmete ja –materjalide valmistajad.

7. Tootmiskatsed

Võidakse nõuda terasplaadi paksusel üle 20 mm lisaplaatide keevitamist ja katsetamist.

8. Keevitustööde kvaliteedisüsteem ISO 3834-2,3 järgi.

Standard ei nõua otseselt ettevõttel ISO 3834 sertifikaadi olemasolu, kuid vajalik on selle standardi nõuete järgimine. Tellijad võivad nõuda ettevõttelt ISO 3834, ISO 9001 jt sertifikaatide olemasolu.

9. Allhanketööd

Valmistamise eriprotsessidel, nt kesta valmistamine valtsidel, keevitustööd jt on vaja hinnata tööde tegijate võimekust ja tuleb vormistada eraldi dokument, mis tõendab, et allhanketöö on tehtud vastavalt standardi nõuetele, nt koostatakse surveanuma osade allhanke deklaratsioon.

10. Mõõtmete ja kuju hälvete kontroll

Mõõtevahendid (mõõtelindid) peavad olema kalibreeritud. Anuma läbimõõt leitakse kaudselt, mõõtes anuma ümberõõtu. Hälbed peavad olema lubatud piirides. Koostatakse mõõtmiste protokollid.

Surveanuma keevisliidete NDT

Väliste defektide avastamiseks kasutatakse ferriitterasel magnetpulberkatset MT, kuid mittemagneetiliste austeniitteraste korral kapillaarkatset (PT). Joonisel 9.1 on näidatud tüüpanuma eskiis ja tabelis standardi EN13445-5 toodud eri katserühmade (1 kõrgeim, 3-madalaim) katsetamise meetodid ja ulatus standardi põhjal teraste rühmale 1.1 (nt mark P235) ja 1.2 (nt mark P355) osas. Tabel 9.1 Surveanuma õmbluste NDT meetodid ja ulatus

Keevisõmblus, nr	Katsemeetod	Ulatus katserühma järgi	
		Rühm 1b	Rühm, 3b
Korpuse piki-põkk õmblus nr 1	RT või UT	100%	10%
	MT või PT	10%	0%
Korpuse ring-põkkõmblusõmblus,	RT või UT	10%	5%

ilma juuretoeta, nr 2a	MT või PT	10%	0%
Korpuse ringõmblus, juuretoega, nr 2b	RT või UT MT või PT	Ei rakendata 100%	Ei rakendata 100%
Tutside pökkõmblused, nr 3a	RT või UT MT või PT	10% 10%	5% 10%
Kahepoolne täieliku läbikõõvitusega tuts kesta külge, nr15	RT või UT MT või PT	10% 10%	5% 10%
Kahepoolne osalise läbikõõvitusega Hargmiku pökkõmblusega T-liide, nr 17, a>16 (erandlik)	RT või UT MT või PT	Ei rakendata 10%	Ei rakendata 10%
Ääriku nurkõmblus, nr11, a<16mm (erandlik, tegelikult Z-mõõde)	RT või UT MT või PT	Ei rakendata 100%	Ei rakendata 10%
Korpuse-põhja HV-pökkõmblus, nr5	RT või UT MT või PT	100% 10%	10% 0%

Tabelist järeldub, et kinnituva juuretoega (alusplaadiga) pökkõmblusi katsetatakse nagu nurkõmblusi, nurkõmblusi katsetatakse ainult pinnadefektidele MT või PT meetodil. Korpuse pikiõmblused võtavad vastu sisemist survejõudu ja katsetatakse suuremas mahus.

Kokkuvõte

Keevituse kvaliteedisüsteemi olemus

1. Keevituse kui eriprotsessi nõuab usaldusväärsete ja korratavate tulemuste saavutamiseks tegutsemist kirjalike protseduuride ja juhendite järgi. Ettevõtte evitab keevituse kvaliteedisüsteemi ISO3834 või selle tähtsamad elemendid.
2. Keevitustööde kvaliteedi tagamine põhineb kvalifitseeritud keevitajate ja keevitusprotseduuride WPS-de kasutamisel kompetentse keevitustööde koordinaatori (inseneri) juhtimisel.
3. Ettevõtte juhataja määrab oma käskkirjaga keevituskoordinaatori, kellel on vastav haridus ja töökogemus. Keevituskordinaator vastutab keevistoote valmistamise eest terve tootmistsükli jooksul. Standardid või tellijad võivad nõuda rahvusvahelise kvalifikatsiooniga keevitusspetsialistide (IWE, IWT) kaasamist.
4. Keevitajate vajalikud kutseoskused tõendatakse praktilise keevituseksami sooritamise ja tunnistatud eksamikeskustes. Keevitaja sertifikaat tõendab keevitaja kutseoskusi ajaliselt piiratud-3 aastase kehtivuse vahemikus konkreetsetel ja kitsastel tingimustel: eksamil kasutatud keevitusprotsess, materjal, materjali paksus, keevitusasendid jm.
4. Keevitustehnoloogia ja parameetrite sobivust antud töö tegemiseks tõendatakse kaudselt tehnoloogilise kaardi ehk keevitusprotseduuri WPS väljatöötamise ja tavaliselt katsekehade keevitamise ja laialdase katsetamisega (ISO15614-1). Kui katsetulemused on positiivsed, siis antakse välja keevitusprotseduuri kvalifitseerimise aruanne WPQR, mille põhjal võib ettevõtte keevitusinsener-koordinaator koostada uusi tootmise WPS-e standardites toodud kehtivuspiirides (materjali paksused, keevitusasendid jm). Lihtsustatud WPS on tööjuhendiks keevitajale kasutamiseks.

5. Ettevõtte keevituskoordinaator plaanib WPS-de alast tegevust. Põhimõtteliselt peaks kvalifitseeritud (sertifikaadiga) keevitaja suutma keevitada tootmistingimustes WPS-is toodud keevitusparameetritega kvaliteetseid keevisõmbusi.

6. Erinevate keevistoodete valmistamisnõuded on toodud standardites, sh nõuded keevitustöödele. Võetakse arvesse keevistoote purunemisega kaasnevat riski. Nende standardite põhimõtteid on võimalik kasutada originaaltoodete projekteerimisel ja valmistamisel.

7. Kandvate ehituskonstruksioonide valmistamist ja vastavushindamist käsitleb standard EN1090. Sõltuvalt rakendatava koormuse liigist ja konstruksiooni kasutusala on kasutusel ehitusklasside EXC liigitus. Toote ehitamisklass määrab nõuded keevitustöödele, mis on seotud terase voolavuspiiriga (terase mark), materjali paksusega, keevisõmbuste kvaliteedinõuetega, mittepurustava katsetamise (NDT) meetoditega ning ulatusega, keevituskoordinaatori kvalifikatsiooniga (vt tabel 8.1).

8. Reeglina nõutakse EN 1090 järgi keevitusprotseduuride WPS-de kvalifitseerimist katselisel meetodil, keevitajatel sertifikaatide olemasolu. Tavaliselt nõutakse keevisõmbustelt keskmist kvaliteeditaset C (ka surveanumate mittevastutusrikkad õmbused), kuid nurkõmbuse paksuselt a-mõõdu osas B taset-õmbuse tegelik paksus ei tohi olla väiksem arvutuslikust. Kõiki keevisliiteid kontrollitakse visuaalselt VT meetodil ja kui avastatakse pinnadefekte, siis täiendaval pinnadefektide meetodil nagu PT ja MT meetod. Sisemiste defektide katsetamise ulatus sõltub ehitusklassist ja õmbuse koormamise suunast, tavaliselt teostatakse 10 % ulatuses. Ei anta ette konkreetset katsetamise meetodit, kuid selleks võib olla kas UT või RT.

9. Ehituskonstruksioonide valmistamisel terasest kõrgema kui 420 MPA voolavuspiiriga, aga ka mõnede surveanuma keevisõmbustelt võidakse nõuda nn **tootmiskatsete** läbiviimist. Toote valmistamisel kinnitatakse õmbuse otsa samast materjalist plaadid, mida keevitatakse samade parameetritega kui tootmisõmbust. Saadud õmbust uuritakse täiendavalt.

10. Keevistoodete valmistamisel tuleb kõik kasutatavad detailid markeerida ja siduda kasutatud materjalide sertifikaatidega ja tagada nii valmistusportsessis hilisem jälgitavus.

11. Metallkonstruksioonide valmistamisel lubatakse teoreetiliselt uue lähenemisena kas vähendada või suurendada katsetamise ulatust (vt tabel 8.2). Staatilist koormatud konstruksioone ei katsetata sisemistele defektidele röntgenmeetodil (RT) ja sõltuvalt ehitamisklassist ja koormamise skeemist katsetatakse 10-20% õmbustest UT meetodil. Väliste defektide leidmiseks katsetatakse 5-20 % MT või PT meetodil ulatuses-mahus 5-20 % nende üldarvust.

12. Surveanumate põkkõmbuste katsetamise ulatus on diferentseeritud (vt tabel 9.3) ja põkkõmbusi katsetatakse 10-100 % UT või RT meetodil. Nurkõmbusi katsetatakse ainult kas MT või PT meetodil 10-100 % ulatuses. Tuleb märkida, et kiirusohuga seotud kallist röntgenkatsetust RT nõutakse kasutada ainult piiratud ulatuses.

13. Surveanumate valmistamisel kõik keevisõmbused identifitseeritakse, nt numbriga tähistamisega, seotakse WPS-dega ja keevitajatega. Keevitamise plaanis tuuakse lisaks eelpootodule veel katsetamise tulemused koos viidetega katsetamise protokollidele.

Kirjandus

1. Laansoo, A. Keevitustehnoloogia. TTÜ, Tallinn, 2011, 172 lk.
2. Laansoo, A. Keevitamine. MIG/MAG-keevitus. Argo, Tallinn, 2010, 87 lk.
3. Laansoo, A., Pihl T. Keevitustööd, Innove. Tln, 2014, 215 lk. Vt. www.innove.ee/et/kutseharidus/oppematerjalid-mehaanika-ja-metallitootustus
4. Althouse, A.D jt Modern welding, 2013
5. Killing, R. Welding processes and thermal cutting. Berlin, DVS, 2001
6. Weman, K. Welding processes handbook. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2003, 193 lk.
7. Cary, H.B. Modern welding technology. New Jersey, Prentice Hall, 1989, 1994, 2012, 786 lk.
8. Stein, R. Fundamentals of joining technology, DVS Media, Düsseldorf, 2016
9. Kreindl, J. Keevituskursus. Welding Business Academy. Spetsselektroodi As, Tallinn, 2020
10. www.twi.co.uk
11. www.gowelding.com
12. www.ssab.com, otsida WeldCalc 3.0, töötab online. www.esab.com, lincoln electric, avesta, outokumpu jt kodulehed, äpp Froniuse kodulehelt: www.fronius.com, vt weld wizard, WeldContact

