

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Materjalitehnika instituut

**Andres Laansoo**

# **KEEVITUSTEHNOLOGIA**

Kaane kujundanud Tiia Eikholm

Autoriõigus, Andres Laansoo, 2011

ISBN 978-9949-23-205-5

# Sisukord

Sissejuhatus .....	5
1. Keevitamise põhimõisted ja parameetrid .....	7
1.1. Keevitamise määratlus.....	7
1.2. Keevisõmbluse ja keevisliite osad.....	9
1.3. Keevisliite kvaliteeti mõjutavad tegurid.....	11
1.4. Keevitamise põhimõisteid .....	13
1.5. Keevisõmbluse asendid .....	15
1.6. Kaarkeevituse parameetrid .....	16
1.7. Keevituse soojussisestus.....	19
2. Keevisliidete tähistamine joonistel ja kvaliteedinõuded .....	23
2.1. Keevisõmbluste ja liidete põhitüübid .....	23
2.2. Keevisliidete tähistamine joonistel standardi EN 22553 järgi .....	27
2.3. Keevitusdefektid ja nende liigitus .....	32
2.4. Keevituse kvaliteeditasemed defektide järgi ja nende määramine .....	34
2.5. Väsimusele töötavate keevisliidete kvaliteedinõuded .....	37
3. Kaarkeevituse kaasnähtused.....	40
3.1. Keevitusvann ja metallurgiaprotsessid .....	40
3.2. Keevituselektroodile mõjuvad jõud.....	41
3.3. Voolamisnähtused keevitusvannis.....	43
3.4. Soojuslevi keevitamisel .....	45
4. Keevisliite struktuur ja omadused .....	50
4.1. Keevismetalli struktuur ja keemiline koostis.....	50
4.2. Keevismetalli struktuur ja selle juhtimine .....	52
4.3. Termomõjutsooni struktuur ja omadused.....	54
4.4. Keevituse termotsükkel ja jahtumisaja mõju.....	57
5. Metallide keevitatavus.....	59
5.1. Keevitatavuse mõiste ja kriteeriumid .....	59
5.2. Vesinikpraod ja nende vältimine .....	60
5.3. Kuumpraod keevitamisel.....	65
5.4. Lamell-praod ja korduvkuumutuse praod .....	67
5.5. Süsinikteraste keevitatavuse hindamine .....	68
5.6. Ettekuumutustemperatuuri määramine .....	69
5.7. Ettekuumutuse ja järeftermotöötuse praktika .....	71
6. Keevituse jääkpinged ja kujumuutused.....	75
6.1. Keevituse jääkpinged ja nende tekkimise põhjused .....	75
6.2. Keevistoodete kõverdumine ja mõõtmete muutus .....	80
6.3. Keevituse jääkpingete ja kõverdumise vähendamine .....	82
7. Käsikaarkeevituse elektroodid .....	87
7.1. Keevituselektroodide omadusi mõjutavad tegurid .....	87

7.2. Keevituselektroodide katete tüübid .....	88
7.3. Keevituselektroodide ja keevitusparameetrite valik.....	91
8. MIG/MAG-keevitus .....	93
8.1. Kaaretüübid ja elektroodi siirdeviisid .....	93
8.2. MAG-keevituse olemus ja keevitusparameetrite mõju .....	97
8.3. MIG/MAG-keevituse kaitsegaasid.....	106
8.4. MAG-keevituse keevitustraadid.....	112
9. Uueaegsed kaarkeevituse vooluallikad ja täiustatud keevitusprotsessid.....	116
9.1. Digitaalsed keevituse vooluallikad .....	116
9.2. Täiustatud MAG-keevitusmeetodid .....	118
9.3. Kõrgtootlikud keevitusprotsessid .....	127
10. Laserlõikamine ja laserkeevitus .....	133
10.1. Lasertöötlemise põhimõte .....	133
10.2. Tööstuslaserite liigitus.....	134
10.3. Laserikiire kvaliteet ja laserikiire-materjali koosmõju.....	136
10.4. Tööstusliku laserseadme põhiosad .....	137
10.5. Laserkeevituse parameetrid .....	138
10.6. Laserlõikamine .....	141
11. Keevitustööde kvaliteeditagamise süsteem .....	144
11.1. Keevituse kvaliteedisüsteemi osad .....	144
11.2. Kvaliteedisüsteemi põhiohused.....	146
11.3. Keevitusprotseduri spetsifikaadi koostamine ja atesteerimine.....	149
11.4. Keevitusprotseduuri katseline atesteerimine standardi ISO 15614-1 järgi .....	152
11.5. Mittepurustava ja purustava kontrolli kasutamine .....	154
12. Keevitustööde ökonoomika.....	158
12.1. Keevituskulude elemendid .....	159
12.2. Lisametalli kulu ja keevismetalli mass.....	160
12.3. Kaare põlemisaja tegur .....	161
12.4. Pealesulatustegur .....	162
12.5. Kuluelementide määramine .....	163
13. Ohutushoid keevitustöödel.....	166
Kirjandus .....	171

## Sissejuhatus

Keevitamine kui levinuim materjalide liitmismeetod on laialdaselt kasutusel nii masinatööstus-, energeetika- kui ka ehitusettevõtetes. Kõige enam on levinud kaarkeevitus, kuid viimastel aastatel on huvi kasvanud ka laserlõikamise ja -keevituse vastu. Uute vooluallikate ja arvutite kasutuselevõttuga on täiustatud MAG-keevitusprotsesse, mis avavad uusi tehnoloogilisi võimalusi. Seoses kasutatavate materjalide nomenklatuuri laienemisega, näiteks kõrgtugevate ja ultrapeenteerateraste, Al-sulamite kasutuselevõttuga, tuleb välja töötada ja järgida rangemalt keevitusprotseduure ja kasutada uusi keevitusprotsesse, mis nõuavad alusteadmisi nähtustest keevitamisel.

Põhjamaades ja USAs loetakse keevitustootmist strateegiliseks ja kõrgtehnoloogiliseks tööstusharuks, kust tuleb olukorrast "state of art" liikuda teadusliku lähenemise suunas. Ameerika Keevitusühing (AWS) näeb oma tulevikuvisionis 2002.–2020. aastani keevitustootmise kasvu kuni 25%, seejuures peaksid kulud vähenema 1/3 ja energiamahukus 50% võrra [1]. Tootlikkus saavutatakse parema integreerituse, konstrueerimise ning kvaliteedi parandamise kaudu, kusjuures automaat- ja robotkeevituse kasutamisel väheneb keevitusdefektide risk ja kulutused kontrollile ning vigade parandamiseks. Keevitustootmise kvaliteedi tagamisel on nõutav või soovitatav rahvusvaheliste standardite järgimine, mida selles trükises kirjeldatakse. Kvaliteedi tagamisel üleilmastumise tingimustes on tähtis roll kvaliteedisüsteemide rakendamisel, mõistlikus mahus mittepurustava kontrolli meetodite kasutamises ja ökonoomika küsimustel, mis kuuluvad keevitusinseneri ülesannete hulka. Keevitustööde kvaliteedi tagamisel on keevitusinseneril vaja koostada dokumentatsiooni, juhendeid, protokolle, protseduure, mis esmapilgul tunduvad bürookraatlike ettevõtmistena. Keevitustehnoloogia kui terviku käsitlemine võimaldab hinnata üldist tegevuste ideoloogiat ja samuti täita tellija ootusi toote kvaliteedile.

Seetõttu nõuab keevitustehnoloogia omandamine ka lisaks alusteadmistele keevitusprotsessidest teadmisi metalliõpetusest, elektrotehnikast, füüsikast, tugevusõpetusest, kvaliteedijuhtimisest ja soojustehnikast.

Tööstuses kasutatavate põhiliste keevitusprotsesside olemust ja võimalusi on käsitletud konstruktsioonimaterjalide tehnoloogia õpikus [2], MIG/MAG-keevitust, keevitusprotseduuri spetsifikaadi (WPS) koostamist kui ka keevitaja atesteerimist tehniku tasemel põhjalikumalt õpikus [3]. Käesolevas õppematerjal on mõeldud keevitustehnoloogia ja keeviskonstruktsioonide alaste ainete õpetamiseks kõrgkoolides. Trükist saab kasutada rahvusvaheliste ja Euroopa keevitusinseneride (IWE, EWE) koolitamiseks ja täiendusõppeks ja see võib olla huvitav teatmematerjal keevitamisega seotud tööstusinseneride jaoks.

Autor on tänulik Soome keevitusala asjatundjale diplomeeritud insenerile Juha Lukkarile loa eest kasutada oma publikatsioone.



# 1. KEEVITAMISE PÕHIMÕISTED JA PARAMEETRID

## 1.1. Keesvitamise määratlus

**Keesvitus** (*welding*) on kahele või enamale osale jätkuva kuju andmine, rakendades kuumutamist või survet, mille tulemusena liidetavate materjalide vahel tekib pidev sisestruktuur. Võidakse kasutada lisamaterjali (*filler metal*), mille sulamistemperatuur on samas suurusjärgus kui liidetavatel materjalidel. Keesvitamise tulemuseks on **keemisõmblus** ehk **keemis**. Keesvitust kasutatakse püsiliidete ehk mittelahtivõetavate liidete valmistamiseks. Kirjanduses eristatakse sulakeevitust ja survekeevitust.

Standard EN12345:1998 määratleb sulakeevitust järgmiselt: keevitamine on materjalide liitmine lokaalse liitepindade sulatamisega ilma välisjõudu rakendamata, kusjuures võidakse kasutada või mitte lisametalli.

Liidetavate pindade aatomid *aktiveeritakse energeetiliselt* ja lähendatakse tugeva aatomitevahelise sideme tekkimiseni.

Terminit “keevitamine” kasutatakse tegevuse e operatsiooni tähenduses ja terminit “keevitus” kui protsessi laiemas tähenduses.

*Keesvitustehnoloogia* (*welding technology*) on tehnikaala, mis käsitleb keevitusprotsesse kui toodete valmistamist detailidest või pooltoodetest. Eristatakse ka terminit *keevituse sooritustehnika* e. *keevitustehnika* (*welding technique*), mis on seotud keevitaja käelise tegevusega konkreetse keemisõmbluse keevitamisel.

Eristatakse:

- a) liitmiskeevitust, mille käigus liidetakse osad;
- b) pealekeevitust, mille käigus saadakse osade peal etteantud omadustega kiht või taastatakse esialgsed mõõtmed;
- c) tootmiskeevitust – mingi toote valmistamiseks vajalik keevitus enne selle tarnimist tellijale;
- d) remontkeevitust – keevitusvigade või kahjustatud toote parandamine keevitamise teel;
- e) montaažkeevitus – toote lõplikul koostamiskohal tehtud keevitus.

Keesvitamise liigitus mehhaniseerimise taseme järgi [4] on toodud tabelis 1.1.

**Käsikeevitus** – täielikult inimese käe manipuleerimisel tehtud keevitus.

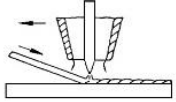
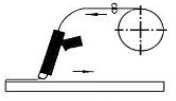
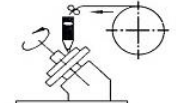
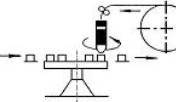
**Poolautomaatkeevitus** – osaliselt mehhaniseeritud keevitus: käsikeevitus, kus lisametalli etteandmine on mehhaniseeritud.

**Täielikult mehhaniseeritud keevitus** – masinkeevitus: keevitus, kus kõik liikumised keevitusprotsessis teevad seadmed, kuid keevitusoperaatori kontrolli ja vaatluse all. Seade võib ise paigaldada detaile või seda mitte teha.

**Automaatkeevitus** – keevitamise teevad seadmed, kusjuures keevitusparameetreid ei saa keevitamise ajal käsitsi juhtimisega muuta.

**Robotkeevitus** – eri robotiga tehtud automaatkeevitus.

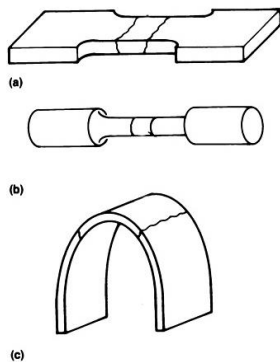
Keevituse liigitus mehhaniseerimise taseme järgi

Nimetus	Skeem	Liikumised keevitamisel		
		põleti/detaili liikumine	lisametalli etteandeliikumine	detaili manipuleerimine
käsikeevitus		käsitsi	käsitsi	käsitsi
osaliselt mehhaniseeritud keevitus, poolautomaatkeevitus		käsitsi	mehhaniseeritult	käsitsi
täielikult mehhaniseeritud keevitus, masinkeevitus		mehhaniseeritult	mehhaniseeritult	käsitsi
automaatkeevitus		mehhaniseeritult	mehhaniseeritult	mehhaniseeritult

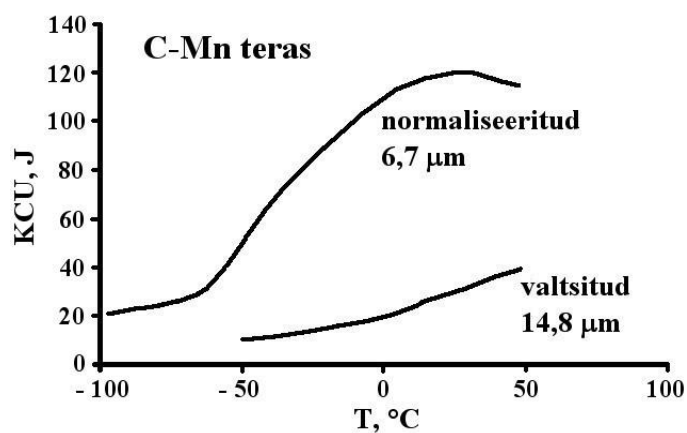
Keevisliite all mõeldakse üldiselt keevismetalli ja tema kõrvalala e termomõjutsooni (TMT), mis määravad liite mehaanilised omadused. Keevitatavat toodet nimetatakse **põhismetalliks**. Keevitamise tulemusena tekib keevisõmblus e keevis, mille tõmbetugevus  $R_m$  ja voolavuspiir  $R_e$ , löögisiskus e purustustöö löökpaindele KV miinustemperatuuridel (*Charpy V-toughness*), plastuse näitaja e katkevenivus  $A_s$  ei tohi olla madalamad kui põhismetallil. Tootestandardid nõuavad sageli, näiteks surveadmete valmistamisel keevisõmblustelt katkevenivust tõmbeteimil kuni 14 või 20%. Teatud juhtudel võidakse garanteerida keevisõmblusele põhismetalliga samaväärne kõvadus, näiteks Hardox-tüüpi terastel. Kui tagatakse keevisõmblusele põhismetalliga võrdväärne mehaaniline tugevus, siis peaks tõmbeteimil keevisõmblus reeglina purunema keevismetalli kõrvalt.

Praktikas on sageli tegemist vastuoluliste nõuetega, kuna tõmbetugevuse kasvades võib löögisiskus väheneda. Tuleb tagada põhismetallile vastav külmhapruse piir – (*impact transition temperature*), kas purustustöö 27 J või 40 J miinustemperatuuridel kuni  $-50$  °C. Nõutava löögisikuse saavutamine võib olla probleemne ja sõltub suurel määral keevitamise termotsüklist ning ferriidi tera suuruselt (joonis 1.2). Pärast tera peenendavat normaliseerimist kasvab tunduvalt löögisiskus. Keevisõmbluste purustaval katsetamisel kasutatakse lisaks sageli ka paindekatset (joonis 1.1), mille käigus tekkivad praod annavad tunnistust kas pragude või väga hapra mikrostruktuuri tekkest TMTs, tera kasvust selles alas.





Joonis 1.1. Keevisõmbluste tõmbeteimikud ja paindekatskeha

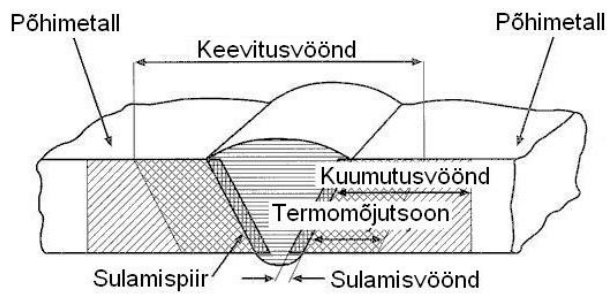


Joonis 1.2. Katsetustemperatuuri mõju külmhapruse piirile e purustustööle löökpaindel, näidatud on ferriidi tera suurus pärast valtsimist ja normaliseerimist

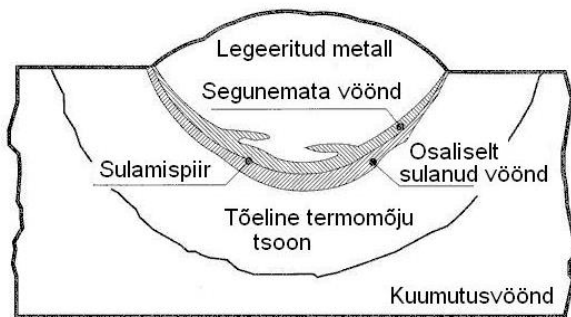
## 1.2. Keevisõmbluste ja keeviliite osad

Keevisõmbustus koosneb juurelääbimist, täitelääbimist ja pinnalääbimist ning juurest. Eriti tähtsad on üleminekupiir ja ülemineknurk õmblustelt põhismetallile (*toe, toe angle*), mida võib lühidalt nimetada üleminekuks, mis liite väsimustugevuse saavutamiseks peab olema võimalikult suure raadiusega ja sujuv.

Keeviliite tsoonid ja alad on näidatud joonisel 1.3.



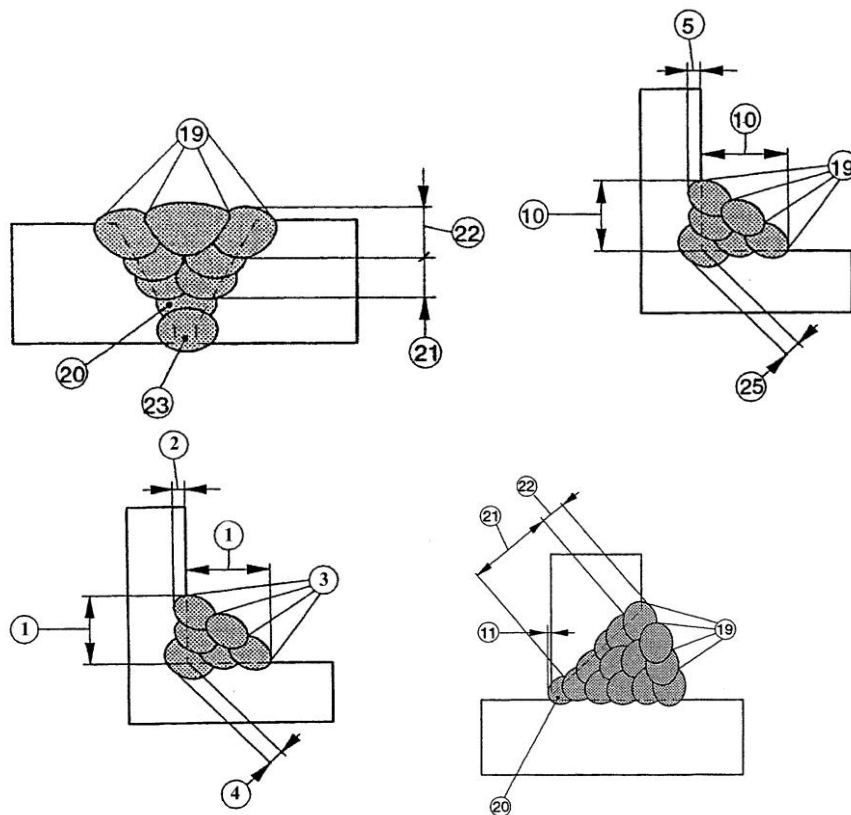
A



B

Joonis 1.3. Keevisliite tsoonid (vööndid). B kasutatakse kõrglegeerterasest õmbluste korral

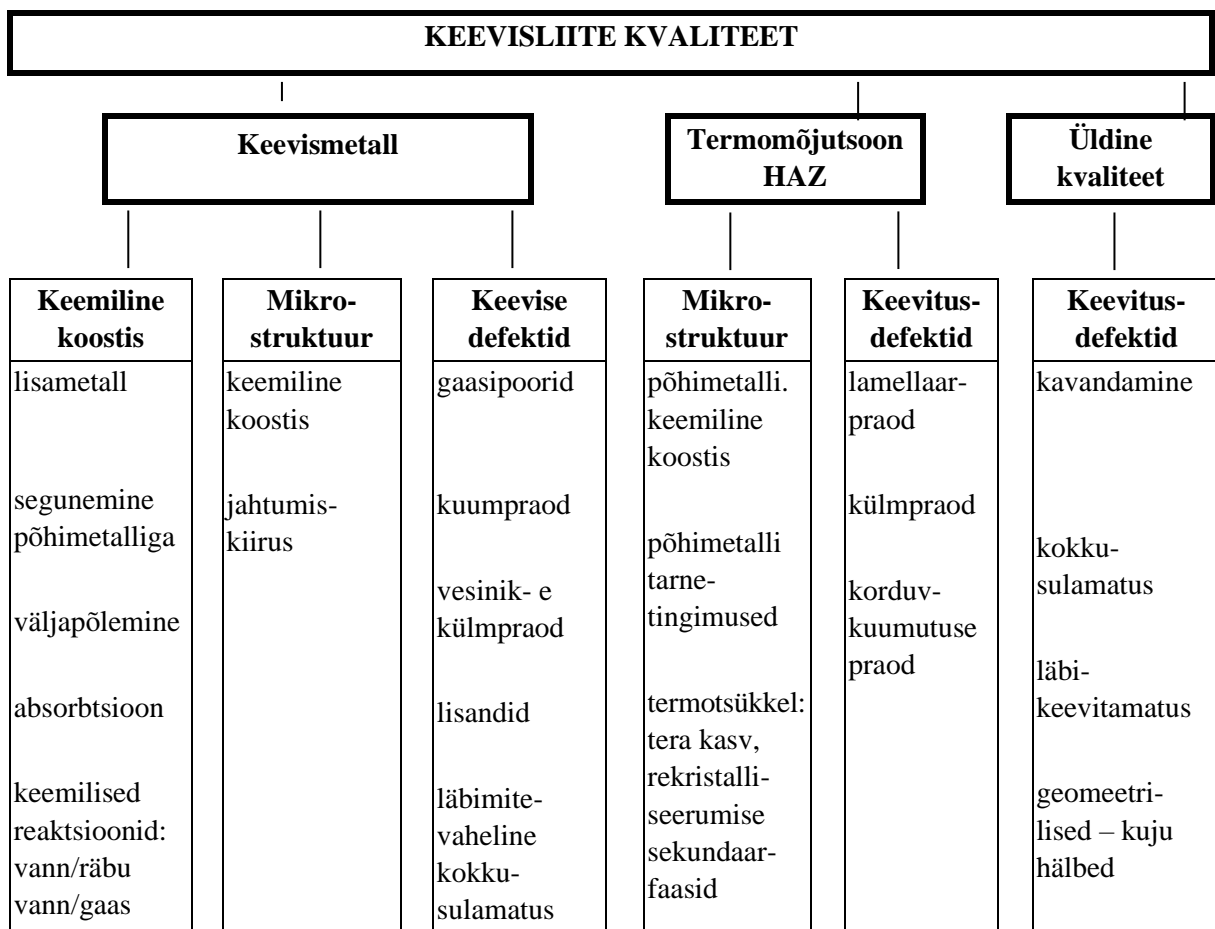
Keevisõmbluse geometrias eristatavad põhilised elemendid on toodud mitme läbimiga õmbluste jaoks joonisel 1.4.



Joonis 1.4. Mitme läbimiga keevisõmblus (väljavõte standardist EN 12345): 1 ja 10 – nurkõmbluse kaadet e z-mõõde; 2 ja 5 – läbisulatuse suurus; 19 – piirjoon, üleminek; 4 ja 25 – juure läbikeevituse suurus; 11 – juurelábimi tugevdus; 23 – juurelábim; 21 – täitelábimi kihid; 22 – pinnalábimi kihid.

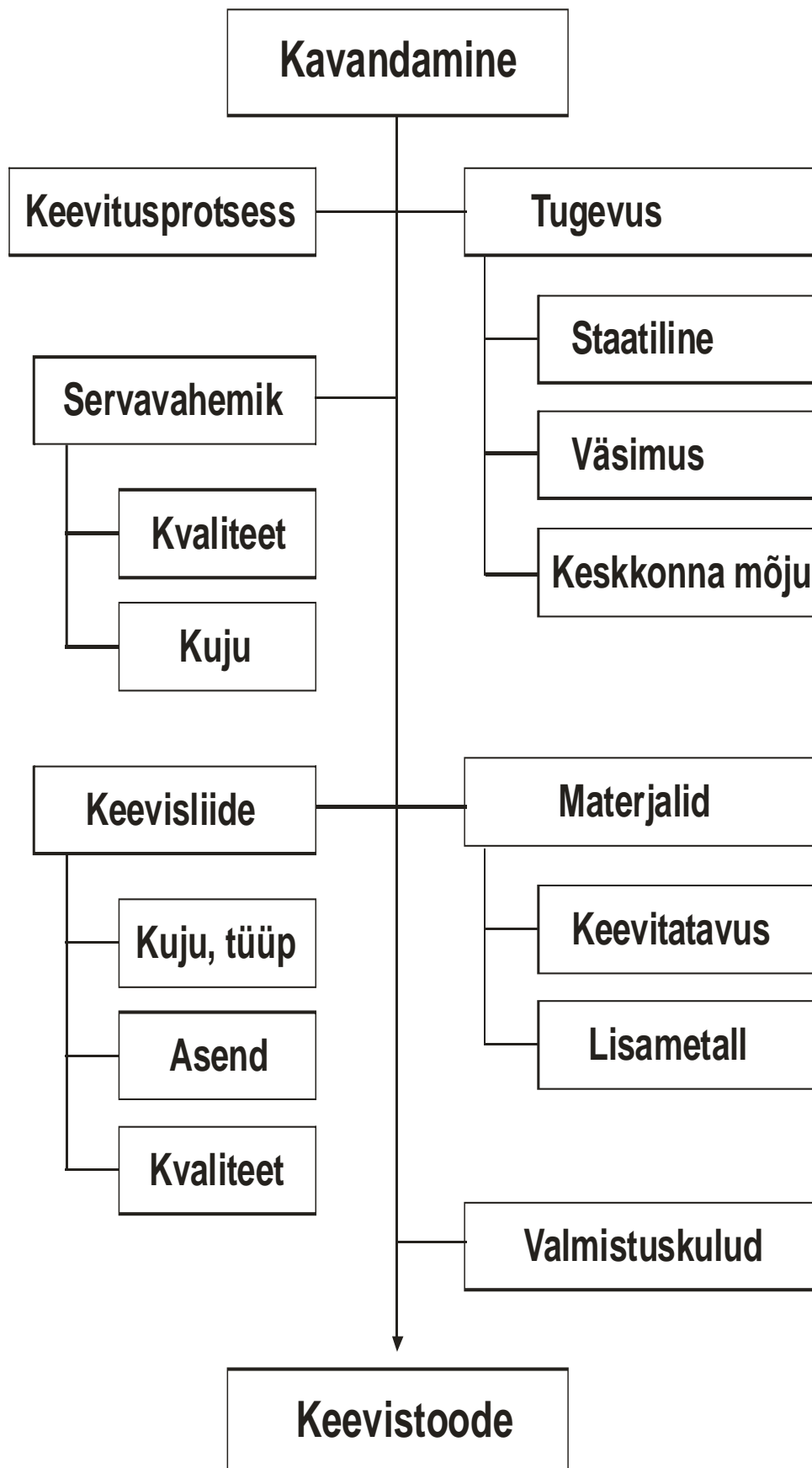
### 1.3. Keevisliite kvaliteeti mõjutavad tegurid

Keevitustehnoloogia väljatöötamisel tuleb peatähelepanu pöörata **tootlikkusele** (keevituskiirus cm/min, pealesulatustegur kg/h) ja **keevitusdefektide minimeerimisele**. Kvaliteedispetsialistid loevad keevitamist **eriprotsessiks**, kuna ei ole võimalik liite kvaliteeti vahetult pärast valmistamist määrata ilma liidet purustamata. Keevitamise kvaliteet väljendub toote ekspluatatsioonis e etteantud tööeas. Keevisliite kvaliteeti mõjutavate defektide mõju tuleks vaadelda, lähtudes keevisliite üksikutest aladest (joonis 1.5). Tegemist on justkui keti üksikute lülidega, mille iga nõrgima lüli tugevus määrab ära terve keti tugevuse. Üksikute alade kvaliteeti mõjutavaid tegureid vaadeldakse üksikasjalikumalt selle töö järgnevat peatükkides.



Joonis. 1.5. Keevisliite kvaliteeti mõjutavad tegurid

Keeviskonstruktsioonide ja toodete valmistamine nõuab ka konstruktorilt e kavandajalt laialdasi teadmisi (joonis. 1.6).



Joonis 1.6. Konstruktorile vajalikud teadmised keevistoodete kavandamisel

## 1.4. Keevitamise põhimõisteid

Keevitamise standardites kasutatakse spetsiifilisi termineid määratlusi ja lühendeid, millest väljavõtte tuuakse edaspidi (standardid EN 1011-1, EN 287-1, ISO 6520, ISO 5817, EN 1418 ja DIN).

Keevitusvool (*arc welding current*): elektroodi läbiva voolu tugevus.

Kaarepinge (*arc voltage*) – pinge elektroodi otsa või elektroodihoidiku ja detaili vahel.

Soojussisestus (*heat input*) – keevisõmbluse piirkonda sisestatud energiahulk õmbluse pikkusühiku kohta.

Keevitusprotsessi termiline kasutegur –  $k$ : (*thermal efficiency*): keevisõmblusesse sisestatud soojusenergia suhe keevituskaares eralduvasse energiahulka.

Keevituskiirus  $V$  (*welding speed*): keevitusvanni liikumiskiirus.

Lõpetusplaat (*run-off plate*): metallplaat, mis on asetatud õmbluse lõppu ja võimaldab täita täies mahus servavahemiku keevisõmbluse lõpus.

Alustusplaat (*run-on plate*): metallplaat, mis on asetatud keevisõmbluse algusesse ja mis võimaldab täita õmbluse servavahemiku.

Traadi etteandekiirus (*wire feed rate*): ajaühikus tarbitud traadi pikkus.

Keevitamaterjalid (*welding consumables*): keevisõmbluse valmistamiseks kulunud lisametallid, räbustid ja gaasid.

Ettekuumutuse temperatuur  $T_p$  (*preheat temperature*): detaili temperatuur keevitustsoonis vahetult enne keevitamise alustamist.

Läbimitevaheline temperatuur  $T_i$  (*interpass temperature*): mitme läbimiga keevitatud õmbluses keevismetalli ja lähiala põhimetalli temperatuur enne järgmise läbimi keevitamise alustamist.

Elektroodi läbimipikkus –  $ROL$  (*run out length*): kattega elektroodi pealekeevitamise saadud läbimi pikkus. Leiab kasutamist soojussisestuse määramisel.

Jahtumisaeg  $t_{8/5}$  (*cooling time  $t_{8/5}$* ): keevitusläbimi ja termomõjutsooni jahtumisaeg 800 °C kuni 500 °C sekundites.

Elektroodi läbimipikkuse suhe  $R_r$  (*run out ratio*): elektroodiga pealekeevitatud keevitusläbimi pikkuse suhe kasutatud elektroodi pikkusesse. Kasutatakse soojussisestuse määramiseks.

Kriitiline materjali paksus  $d_{t(\text{transition thickness})}$ : plaadi paksus, mille ületamisel kolmemõõtmeline soojuslevi läheb üle kahemõõtmeliseks.

Ühekihiline keevitus (*single run welding*): kui keevisõmblus või pealekeevitus tehakse ühe kihina, kuid see võib koosneda mitmest pealekeevitatud läbimist e vallikust.

Mitmekihiline keevitus (*multi run welding*): kui keevisõmblus või pealekeevitus koosneb kahest või enamast kihist.

Ühepoolne keevitus (*one side welding*): kui toodet keevitatakse ühelt poolt .

Kahepoolne keevitus (*both side welding*): kui toodet keevitatakse mõlemalt poolt.

Traagelõmbluste keevitus e sildamine (*tacking*): liidetavate detailide või koostude fikseerimine lühikeste õmblustega.

Automaatkeevitus: keevitus, kus kõik operatsioonid toimuvad automaatselt. Keevituse parameetrite käsitsiseadistus keevituse ajal ei ole võimalik.

Täismehhaniseeritud keevitus: keevitus, kus kõik põhioperatsioonid (v.a detaili käsitlemine) toimuvad automaatselt. Keevituseparameetrite käsitsiseadistus keevituse ajal on võimalik.

Robotkeevitus: automaatkeevitus manipulaatori kasutusega, mis on eelnevalt programmeeritud erinevatele liikumiste ja toote geomeetria jaoks.

Keevitusoperaator: sulakeevituse puhul isik, kes teeb täismehhaniseeritud ja automaatkeevitust.

Keevitusseade: komplektne seade, mis on ette nähtud keevitamiseks. Keevitusseade võib sisaldada rakiseid, üht või mitut manipulaatorit, etteande seadet või muud lisavarustust. Seade võib detaile peale ja maha laadida.

Juuretugi (*backing*): sula keevismetalli toetamiseks keevisõmbelse vastaspoolele asetatud materjal.

Juurelähim (*root run*): mitmekihilise keevisõmbelse esimene keevitatud lähim.

Täitelähim (*filling run*): mitmekihilise keevisõmbelse lähim(id), mis on keevitatud juurelähimi(te)le enne pinnalähimi(te) keevitamist.

Pinnalähim (*capping run*): mitmekihilise keevisõmbelse keevitamise lõpetamisel pinnalt nähtav lähim.

Keevismetalli paksus (*weld metal thickness*): sulatatud keevismetalli paksus ilma õmbelse tugevduseta.

Keevitustingimused (*welding conditions*): tingimused, millistes valmistatakse keevisliidet (keskonna temperatuur, kitsad tingimused, müra, kuumus), samuti töödeldava tootega seotud tingimused (põhimetall, servavahemiku kuju, keevitusasend).

Keevituseparameetrid (*welding parameters*): keevitusprotsessi kvalifitseeritud tegemiseks vajalik andmestik, nagu kasutatavad lisametallid, mehaanilised ja elektrilised reguleeritavad parameetrid, ettekuumutuse temperatuur, hoidmisaeg kuumutustemperatuuril.

Keevituse inspekteerimine (*welding inspection*): keevitusega seotud asjaolude vastavushindamine, kus kasutatakse vaatlust ja otsuse tegemine toimub sobivate mõõtmiste või katsetamistega.

Kvaliteedi tase (*quality level*): keevisõmbelse kvaliteedi kirjeldus valitud keevitusdefektide tüübi, mõõtmete ja defektide hulga järgi.

Eesmärgivastavus (*fitness-for-purpose*): toote, protsessi või teenindamise kasutamine kindlaksmääratud eesmärkidel ja eritingimustel.

Lühikesed keevitusdefektid (*short imperfection*): keevitusdefektid summaarse pikkusega alla 25 mm keevisliite 100 mm pikkusel lõigul.

Süsteemilised keevitusdefektid (*systematic imperfections*): keevitusdefektid, mis on korduvalt jaotunud kontrollitava õmbelse pikkuse ulatuses, kuid üksiku keevitusdefekti mõõtmed on lubatud piires.

Tootja, valmistaja (*manufacturer*): isik või organisatsioon, kes vastutab keevitustootmise eest.

Keevitustööde koordineerimine (*welding coordination*): ettevalmistusoperatsioonide tarvis keevitusega ja sellega seotud tegevuste koordineerimine.

Keevituskordinaator (*welding coordinator*): isik, kes on vastutav ja pädev tegema keevitustööde koordineerimist.

Keevitaja (*welder*): isik, kes hoiab ja käsitseb elektroodihoidikut, keevituspüstolit või gaasipõletit.

Atesteerija (*examining body*): isik või asutus, kes tõendab keevitaja, protseduuri vastavust kohaldatavale standardile.

Lisaks kasutatakse kirjanduses järgmisi põhimõisteid:

Põhimetall, põhimaterjal (*parent metal, base metal*): keevitav metall või materjal.

Keevitusvann (*weld pool, molten pool*): keevitamise ajal sulas olekus olev põhi- ja lisametall, millest tardumisel moodustub õmblus.

Servavahemik (*joint preparation, groove*): keevitamiseks ettevalmistatud osade vaheline ruum.

Õhupilu laius, pilu suurus (*gap, root gap, gap width*): õmbluse juurepindade või servade vahekaugus.

Keevislähim, lähim (*run, bead, pass*): keevismetall, mis kantakse servavahemiku peale ühekordse elektroodi või põleti liikumisega. Üks või mitu kõrvuti asetsevat läbimit moodustavad õmbluse e. keevisekihi.

Keevitusjärjestus (*run, weld, pass sequence*): keevituslähimite keevitamise järjekord.

Keevise laius (*weld width of a butt weld*): keeviseõmbluse ja põhimetalli lõikejoonte vahekaugus toote esipinnal.

Läbikleepitus, läbikleepitussügavus (*joint penetration*): õmbluse paksus servavahemiku kohal mõõdetud risti põhimetalli pinnaga.

Termomõjutsoon (*heat affected zone-HAZ*): põhimetalli sulamata osa, kus esinesid mikrostruktuuri muutused.

Sulamistsoon (*fusion zone*): osa põhimetallist, mis on sulanud keevitamise ajal.

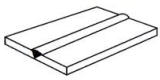
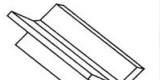
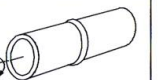



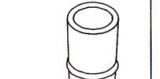


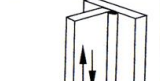
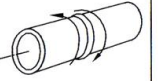

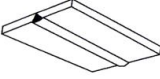
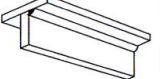


Sulamislaius, läbisulatuse laius (*penetration, fusion penetration*): sulamistsooni laius mõõdetuna risti servavahemikuga.

Segunemistsoon, legerimistsoon (*dilution zone*): keevisliite tsoon, mis koosneb segunenud põhi- ja lisametallist.

Keevitustsoon (*weld zone*): Keevisõmblusest ja termomõjutsoonist moodustunud ala.

## 1.5. Keevisõmbluse asendid

Keevisõmblus võib olla erinevates ruumiasendites. Euroopa keevituspraktikas kasutatakse eurostandardite kohaselt tähttähisteid ja USAs Ameerika Keevitusühingu (AWS) loodud number-tähttähisteid (joonis 1.7), mis leiavad kasutamist keevituselektroodide tähistamisel ja keevitusprotseduuride koostamisel. Keevitamisel kehtib põhimõte, et alati tuleb eelistada keevitamist allasendis PA ja teisi ülejäänud asendeid nimetatakse **ruumiasenditeks**. Praktikas kasutatakse laialdaselt samas tähenduses mõistet keevitusasend.

 AWS: 1G EN: PA	 AWS: 1F EN: PA	 AWS: 1G EN: PA	 AWS: 2F EN: PA
 AWS: 2G EN: PC	 AWS: 2F EN: PB	 AWS: 2G EN: PC	 AWS: 2F EN: PB
 AWS: 3G EN: PG, PF	 AWS: 3F EN: PG, PF	 AWS: 5G EN: PG, PF	 AWS: 5F EN: PG, PF
 AWS: 4G EN: PE	 AWS: 4F EN: PD	 AWS: 6G EN: H-L045	 AWS: 4F EN: PD

Joonis 1.7. Keevisõmbluste asendite e keevitusasendite tähistamine

## 1.6. Kaarkeevituse parameetrid

Kaarkeevitusel mõjutavad läbikõõrituse sügavust ja keevisliite ristlõike kuju järgmised keevitusparameetrid:

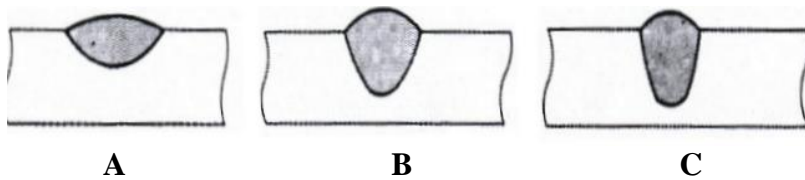
- keevitusvool,
- kaarepinge,
- keevitusvoolu polaarsus,
- keevituselektroodi või elektroodi läbimõõt,
- keevituskiirus,
- keevituse soojussisestus.

### Keevitusvoolu liik ja polaarsus

Kaarkeevitusel kasutatakse eelistatult alalisvoolu tähistusega (DC), kuid alumiiniumi ja magneesiumi TIG-keevitusel ja elektroodkeevitusel võidakse kasutada vahelduvvoolu tähistusega (AC).

Elektroodkeevitusel on levinud keevitamine päripolaarse vooluga, kus elektrood ühendatakse vooluallika miinusklemmiga. Saadakse alt laienev keevituskaar (joonis 1.8), kus suurem osa soojusest eraldub detailil e anoodtäpil. TIG-keevitusel näiteks eraldub kuni 70% soojusest detailis. Päripolaarset keevitusvoolu tähistatakse Euroopas tehnoloogiadokumentatsioonis lühendiga DC<sup>-</sup>, kusjuures indeksiga "-" on näidatud elektroodi polaarsus. Vastupolaarset voolu tähistatakse lühendiga DC<sup>+</sup>.

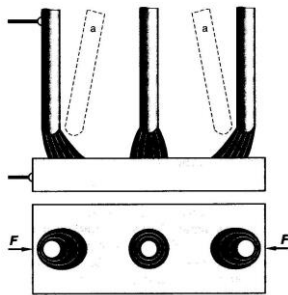




Joonis 1.8. Keevitusvoolu polaarsuse mõju keevitusvanni kujule: A – vastupolaarne, B – päripolaarne alalisvool, C – vahelduvvool

### Keevituskaare magnetvool e magnetkõrvalekalle

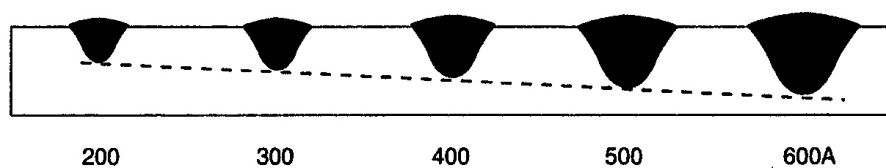
Alalisvooluga keevitades tekitab detaili läbiv keevitusvool magnetvälja, mille toimeel keevituskaar kaldub esialgsest asukohast kõrvale, mida kutsutakse magnetvooluks või magnetkõrvalekaldeks (*arc blow*). Esineb olukorras, kus maanduskoht asetseb kaugel keevituskohast. Nähtuse vältimiseks tuleb elektroodi kallutada või kasutada vahelduvvoolu. Keevituskaare kõrvalekalle võib esineda suurte ferromagnetiliste toodete läheduses keevitamisel.



Joonis 1.9. Keevituskaare kõrvalekalle magnetvoolu mõjul

### Keevitusvoolu mõju

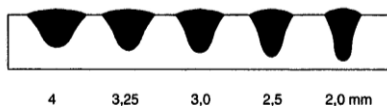
Voolu kasvades suureneb läbikeevituse sügavus ja keevitustootlikkus. Liiga suur keevitusvool võib põhjustada sisselõike defekti, läbipõletust.



Joonis 1.10. Keevitusvoolu mõju keevisõmbluse kujule

### Elektroodi läbimõõt

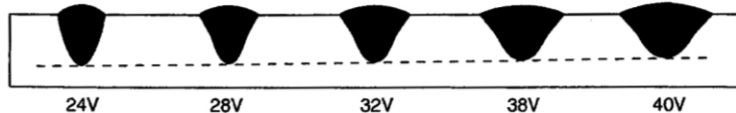
Kui keevitusvoolu tugevus on konstantne, siis elektroodi läbimõõdu kasvades läheb õmbluse ristlõige laiemaks ja madalamaks. Väiksema läbimõõduga elektroodi kasutamisel on voolutihedus suurem ja keevituskaar stabiilsem.



Joonis 1.11. Elektroodi läbimõõdu mõju keevisõmbuse kujule

### Kaarepinge mõju

Sama keevitusvoolu ja keevituskiiruse juures kaarepinge kasvades toimub väga väikene läbiskeevituse vähenemine, kuid oluliselt suureneb õmbuse laius. Pinge kasvades muutub kaar liikuvamaks. Kõrgem pinge sobib paremini suurema õhupilu korral detailide vahel. Madal pinge võib põhjustada õmbuse liigkumerust (MIG/MAG), liiga kõrge pinge nurkõmbuse läbiskeevitamatus ja sisselõiget.

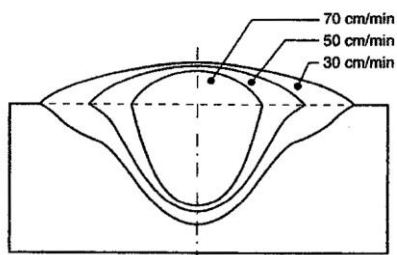


Joonis 1.12. Kaarepinge mõju keevisõmbuse kujule

### Keevituskiiruse mõju

Keevituskiiruse mõju keevisõmbuse ristlõikele ja kvaliteedile on keeruline.

Keevituskiirus mõjutab keevisõmbuse läbiskeevituse sügavust ja kuju (joonis 1.13). Kiiruse kasvades õmbuse laius väheneb tunduvalt intensiivsemalt kui läbiskeevituse sügavus. Suurema keevituskiiruse korral saadakse kitsam õmbus väiksema läbiskeevitusega. Liiga suur keevituskiirus võib põhjustada teatud defektide teket, nagu sisselõiked, poorid, läbiskeevitamatus jm. Liiga väikese keevituskiiruse korral võib sula keevismetall valguda keevitaskaare ette või õmbuse servadele. Keevituskiirus sõltub paljuski keevitaja sooritustehikast.



Joonis 1.13. Keevituskiiruse mõju keevisõmbuse ristlõikele

## 1.7. Keevituse soojussisestus

Keevitamisel on üheks tähtsamaks parameetriks keevisõmbuse pikkusühiku kohta sisestatud energiahulk, mida mõõdetakse ühikutes kJ/mm või kJ/cm. Keevituse soojussisestus mõjutab keevituse termotsükli ja deformatsioone ning on seotud paljuski keevituse sooritustehnikaga, näiteks kas toimub elektroodi sirgjooneline või võngutamise liikumine. Keevituse soojussisestust (heat input) määratakse järgmise valemiga (standard EN 1011-1):

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

kus  $U$  – kaare pingeline V;

$I$  – keevituse vool A;

$V$  – keevituskiirus mm/s;

$k$  – keevitusprotsessi termiline kasutegur, erinevatel keevitusprotsessidel kasutatakse järgmisi väärtusi:

MMA – 111;  $k = 0,85$

MIG/MAG – 131/135;  $k = 0,85$

TIG – 141,  $k = 0,6$

keevitus räubustis – 121,  $k = 1,0$

Rootsis ja Soomes [7,21] on levinud parameeter „keevitusenergia – welding energy“, mis väljendatakse kJ/mm, valemiga

$$E = \frac{60 \cdot U \cdot I}{1000 \cdot V}$$

kus  $U$  – keevituskaare pingeline V

$I$  – keevitusvool A

$V$  – keevituskiirus mm/min

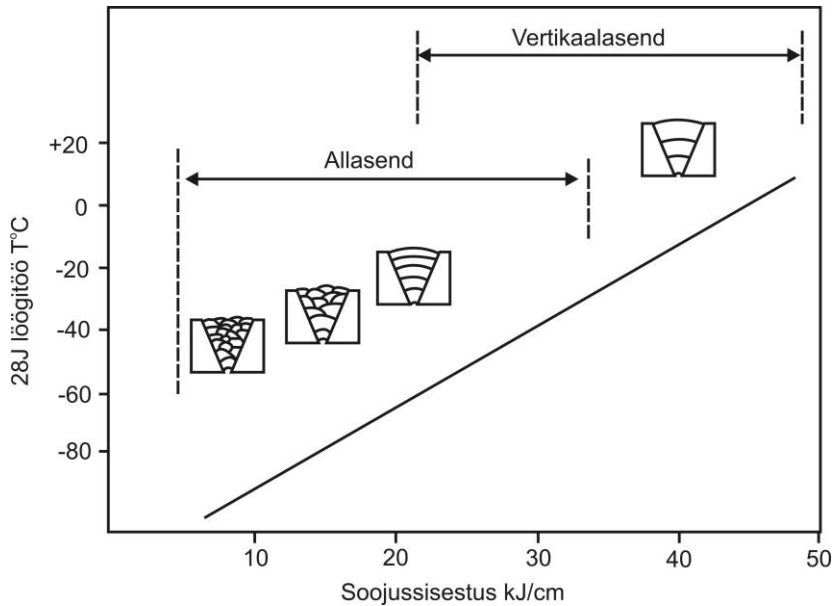
Keevituse soojussisestust saab määrata otseste mõõtmistega, kus mõõdetakse keevitatud läbimi pikkus ja selleks kulunud aeg, keevitusvool ja kaarepinge.

Soojussisestuse ligikaudseks määramiseks elektroodkeevitusel on soovitatav kasutada standardis EN 1011-2 toodud meetodikaid, mis põhinevad nurkõmbuse kaateti või ühe elektroodiga pealekeevitatud keevitusläbimi pikkuse mõõtmistel. Eeldatakse, et energiahulk  $U \cdot I \cdot t$  on ühe elektroodi sulatamisel konstantne ja soojussisestust saab määrata keevitatud läbimi pikkusega (*ROL-run off length*) või nurkõmbuse kaateti järgi standardis toodud tabelitest. Pealekeevitamisel eeldatakse, et elektroodist jääb järgi 40 mm jääk, ja kui elektroodi pikkus erineb 450 mm, siis korrutatakse tulemus vastava teguri abil.

Keevituse soojussisestus on üks **tähtsamaid kontrollitavaid** parameetreid keevisliidete kvaliteedi tagamisel ja eriti just tugevate ja kõrgtugevate teraste, dupleksteraste keevitamisel. Soojussisestuse suurus mõjutab keevitusdeformatsioone, liite struktuuri. Soojussisestuse suurendamisega saab vältida vesinikpragude teket ja sageli ka ettekuumutuse vajadust. Soojussisestuse suurendamisega saab keevitada paksemaid keevitusläbimeid ja suurendada tootlikkust, kuid halveneb oluliselt liite löögisiskus miinustemperatuuridel. Roostevabade teraste keevitamisel tuleb seda parameetrit hoida kontrolli all ja vältida selle ületamist. Standardites soovitatakse, et kui keevitatavale terasele ja keevisõmbusele esitatakse nõuded

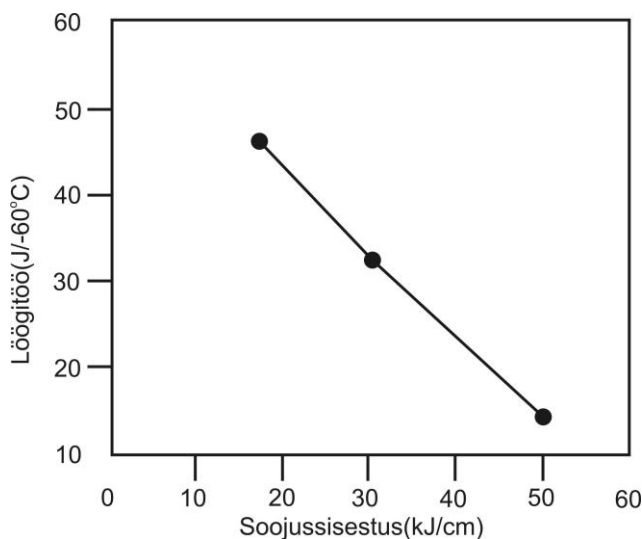
löögisitkuse osas, siis lubatakse praktikas kasutada kuni 25% suuremat soojussisestust. Nii tagatakse sobiv termotsüklil ja välditakse keevisliite liiga kiiret jahtumist.

Praktikas määrab soojussisestuse suurel määral keevituskiirus, mis on seotud keevituse sooritustehnikaga (sirge elektroodi liikumine, elektroodiotsa võngutamine ja keerulisemad liikumised) ja keevituslähimite paksuse ja arvuga (joonis 1. 13)

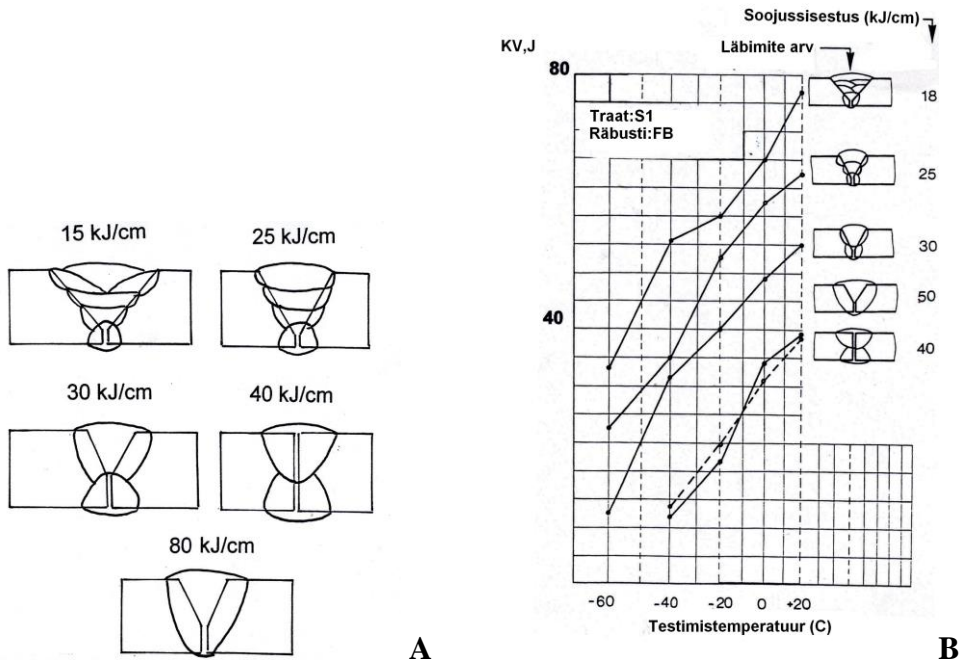


Joonis 1.13. Kevituslähimite arvu mõju keevismetalli löögisitkusele. Terasplaat  $t = 16$  mm, elektrood OK 48.00. Kevitatud on minimaalselt 3 lähimiga ja maksimaalselt 10 lähimiga [5]

Graafikult on näha, et suure soojussisestuse kasutamine vähesel arvul lähimite keevitamisega ei võimalda saavutada piisavat löögisitkust miinustemperatuuridel.

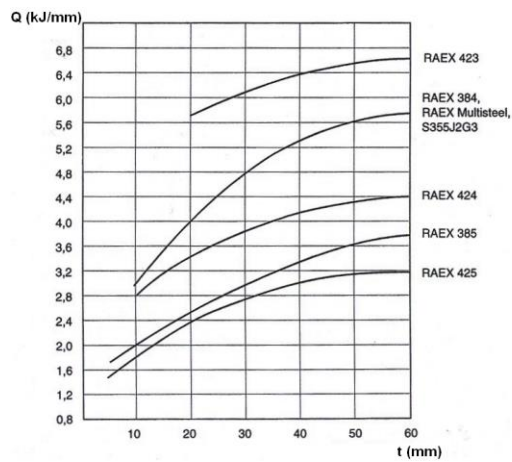


Joonis 1.14. Soojussisestuse mõju põkkõmbluse keevismetalli löögisitkusele Teras RAEX 385 Arctic,  $t = 40$  mm, keevitamine rübustis [6]



Joonis 1.15. Soojussisestuse seos keevituslähimitega(A) ja mõju löögisitkusele (B). Keevitus rübustis

Soojussisestuse liigne suurendamine halvendab keevisliite löögisitkust. Seetõttu on paljud tootjad pakkunud välja soojussisestuse ülemise piiri keevitamisel (joonis 1.16).



Joonis 1.16. Maksimaalsed lubatud soojussisestuse piirid Ruukki terastele [7]

## Kokkuvõte

1. Keevitamise tulemusena tuleb tagada keevisliitele põhimetallist mitte madalam tõmbetugevus, katkevenivus ja löögisitkus. Reeglina puruneb tõmbeteimil proovikeha keevisõmbluse kõrvalt.

2. Keevisliite mehaanilisi omadusi mõjutab termomõjutsooni (TMT-HAZ) struktuur ja omadused, mida on võimalik juhtida jahtumiskiiruse abil, samal ajal vältides keevitusdefekte.

3. Keevisliite mehaanilisi omadusi ja kvaliteeti mõjutavad negatiivselt keevitusdefektid liite erinevates osades, millest katastroofiliseks loetakse kokkusulamatust e liiteviga õmblusmetalli ja põhimetalli vahel.

4. Kaarkeevituse parameetritel (vool, pinge, keevituskiirus, soojussisestus) on erinev mõju läbikeevitusele ja keevisõmbluse ristlõike kujule.

5. Keevituse soojussisestus on tähtis keevitusparameeter, mis mõjutab nii keevisliite struktuuri ja omadusi kui ka keevituse kujumuutusi.

6. Keevituspunktis sõltub keevituse soojussisestus keevituslähimite paksusest ja kasutatud keevitustehnikast.

## 2. KEEVISÕMBLUSTE TÄHISTAMINE JOONISTEL JA KVALITEEDINÕUDED

### 2.1. Keevisõmbluste ja -liidete põhitüübid

Keevisõmbluste põhitüübid ristlõike kuju järgi on sulakeevitusel järgmised:

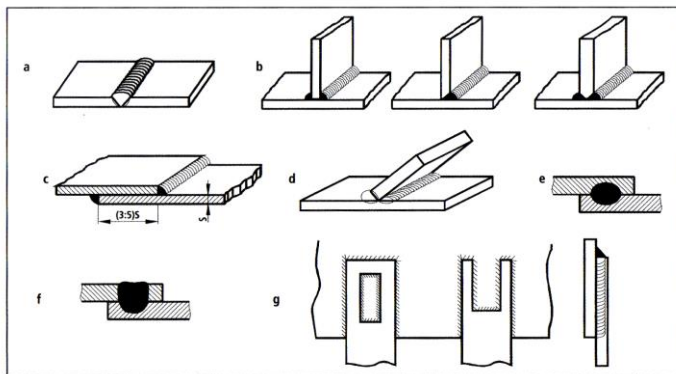
- 1) põkkõmblus, detailide servade vahel, tähistatakse lühendiga BW,
- 2) nurkõmblus, kolmnurkse ristlõikega, tähistatakse lühendiga FW,
- 3) punktõmbused, korkõmbused.

**Märkus.** Õmbluste lühendite tähistus on tulnud inglise keelest: põkkõmblus – *butt weld*; nurkõmblus – *fillet weld*

Erinevaid keevisõmbluste kasutatakse erinevat tüüpi keevisliidetes.

Olenevalt ühendatavate detailide vastastikusest asendist jaotatakse keevisliited järgnevalt (joonis 2.1):

- põkkliide (a),
- nurkliide,
- katteliide (c,g)
- punktliide (e,f),
- servliide,
- T-liide ehk vastakliide.(d)



Joonis 2.1. Keevisliidete põhitüübid

Keevisliiteid võib tinglikult jagada rakendatava koormuse järgi järgmistesse rühmadesse:

- 1) jõuliited;
- 2) kinnitusliited;
- 3) sideliited;
- 4) armatuurliited.

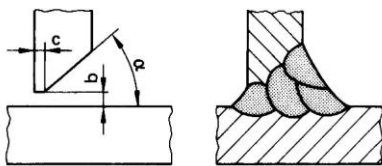
Jõuliited võtavad vastu nii teljesuunalisi kui ka paindemomendist tingitud koormusi. Keevisliite tugevusomadused loetakse võrdtugevaks põhimetalli tugevusega. Tehakse läbi-keevitatud õmbused faasitud detailide servadega: V, X-õmbused.

Kinnitusliited ühendavad enamasti nurkõmblustega detaile, näiteks staatiliselt koormatud talades. Lubatakse katkendõmbluste kasutamist. Liidete kvaliteedinõuded defektide järgi ei ole kõrged.

Sideliited annavad konstruktsioonile jäikuse ja väldivad osade liikumist. Näiteks on side- ja jäikuslapid.

Armatuurliited hoiavad üleval kaableid, torusid, abielemente. Mõjuvad koormused on väikesed. Tegemist on abiliidetega, mis võidakse pärast keevitamise lõpetamist ka eemaldada, seejuures põhimetalli kahjustamata. Eeltoodud liigitust on otstarbekohane kasutada liidete kvaliteedinõuete kehtestamisel erinevatel rakendustel.

Eraldi rühma moodustavad ühelt või mõlemalt poolt faasitud püstplaadiga sügava lähi-keevitusega T-liited, mida loetakse keevitatuks kas põkkõmblusega (*T-joint with butt weld*, *T-joint with full penetration*) või 2 õmblusega (põkkõmblus + nurkõmblus).

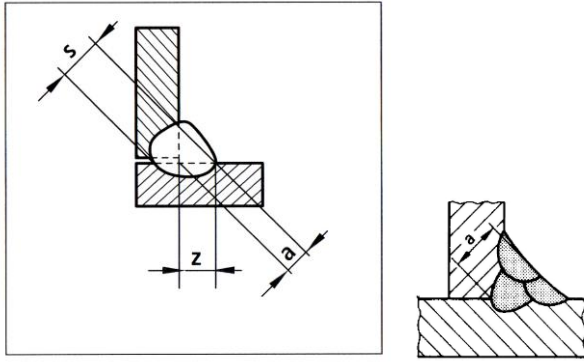


Joonis 2.2. Faasitud T-liite servakuju, juure avamisega ja ühepoolne T-liide HV- õmbluse ja nurkõmblusega

Põkkõmblused sulatatakse läbi terve materjali paksuse ulatuses, mida tõendab vastaspoolele ehk juurepinnale moodustunud väike vallike ehk tugevdus. Kuna keevitades ühelt poolt suudab keevituskaar sulatada kuni 4 mm paksust terast, siis suurematel paksustel tuleb detailide servi faasida. Nii sulatab keevituskaar piisava õhupilu juures detailide vahel õmbluse juure. Teraslehe paksusel 3–10 mm võib kasutada V-tähe kujulist servakuju, paksema materjali korral võib servakuju olla keerulisem. Faasimata servadega õmblust nimetatakse I-õmbluseks ja V-servadega V-õmbluseks jne. Tabelis 2.1 on toodud standardi EVS EN ISO 9692-1:2000 järgsed levinuimad servakujud ja õhupilud MAG-keevitusel. Kui V-õmblustele esitatakse rangemaid nõudeid mehaaniliste omaduste ja hermeetilises osas, siis võidakse keevitada liide ühelt poolt, mille järel puhastatakse vastaspoole servavahe käiadega ja keevitatakse sellelt poolelt kitsama läbimiga. Sellist tegevust nimetatakse juure avamisega keevitamiseks ja keevisõmbluse tähistusele kantakse poolring. Joonisel võib olla õmbluse tähistuse juures märkus „juur avada“. Tänapäeval tähistatakse keevitatava materjali paksust reeglina  $t$  tähega (erandiks standard EN1011, kus kasutatakse  $d$  tähte) ja läbikeevituse suurust  $s$  tähega. Teatud juhtudel, kui ei ole tegemist vastutusrikaste õmblustega, ei keevitata õmblust läbi terve paksuse ulatuses. Neid õmblusi nimetatakse osaliselt läbikeevitatud õmblusteks (*partially penetrated weld*)

Nurkõmblust iseloomustab tema kõrgus või paksus, mis tähistatakse  $a$  tähega. Sageli võidakse anda ka nurkõmbluse kaateti  $z$  väärtus, mille vahel on seosed:  $a = 0,7z$ ,  $z = 1,4a$ .





Joonis 2.3. Nurkõmbuse mõõtmestamine ühe ja mitme läbimiga: a – õmbuse kõrgus, s – läbikeevituse suurus

Levinuimaid servakujude ja liidete näiteid MAG-keevitusel on toodud tabelis 2.1.

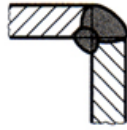
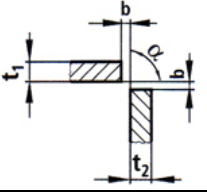
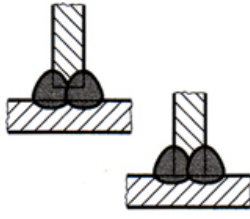
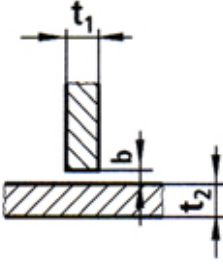
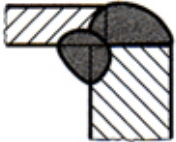
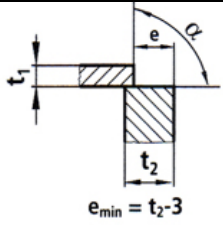
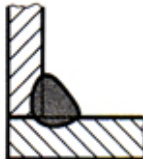
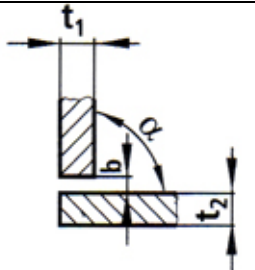

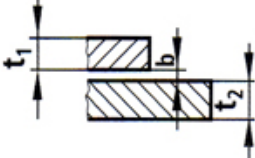
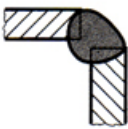
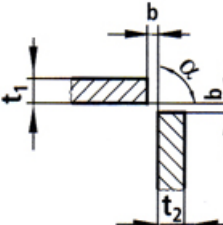
Tabel 2.1

Servakujud ja õhupilud terase keevitamisel. Väljavõte standardist

A. Pökkõmbused ja pökkliited

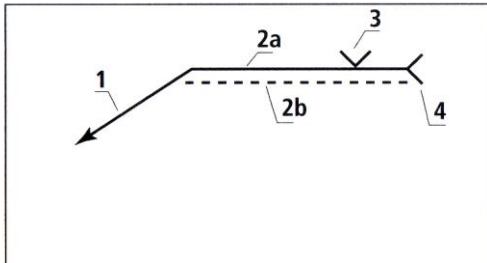
Paksus t, mm	Õmbuse tüüp	Eskiis	Servakuju	$\alpha, \beta,$	b	c
$t \leq 4$	I-õmbus			–	$b = t$	–
$3 > t \leq 8$				–	$6 \leq b \leq 8$	–
$3 < t \leq 10$	V-õmbus			$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$b \leq 4$	$c \leq 2$
$5 > t \leq 40$	Y-õmbus			$\alpha \approx 60^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$2 \leq c \leq 4$
$t > 10$	Juure-läbimiga V-õmbus			$\alpha \approx 60^\circ$ $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$2 \leq c \leq 4$
$t > 10$	Juure-läbimiga X-õmbus			$\alpha \approx 60^\circ$ $40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$2 \leq c \leq 6$

## B. Nurkõmbused ja nurkliited

Paksus $t$ , mm	Õmbuse, liite tüüp	Eskiis	Servakuju	$\alpha, \beta$	b
$t_1 > 3$ $t_2 > 3$	Nurkliide kahe nurkõmbusega			$70^\circ \leq \alpha \leq 110^\circ$	$b \leq 2$
$2 \leq t_1 \leq 4$ $2 \leq t_2 \leq 4$	Läbikõõritatud T-liide			-	$b \leq 2$
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$				-	-
$t_1 > 2$ $t_2 > 5$	Nihutatud nurkliide kahe nurkõmbusega			$60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$	-
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	Ühepoolne T-liide nurkõmbusega			$70^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$	$b \leq 2$
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	Katteliide			-	$b \leq 2$
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	Nurkliide			$60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$	$b \leq 2$

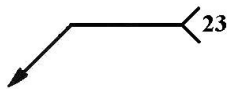
## 2.2. Keevisliidete tähistamine joonistel standardi EN 22553 järgi

Keevisõmbuse tähistus standardi EVS EN 22553:2000 järgi (joonis 2.4) koosneb õmbuse asukohta suunatud viitenooldest (1), laudist (2a), identifitseerimisjoonest (2b), õmbuse põhimärgist (3), sabaosast (4), kus vajadusel on näidatud keevitusprotsessi numbertähis ja kvaliteedinõue defektide järgi.



Joonis 2.4. Keevisõmbuste tähistamine

Juhul, kui liite detaile ei määrata ja tahetakse näidata, et liide ainult keevitatakse või joodetakse, võidakse kasutada joonisel 2.5 toodud tähistust, kusjuures ka keevitusprotsessi tunnusnumbrit näitamata.



Joonis 2.5. Keevisõmbuse lihtsustatud tähistus

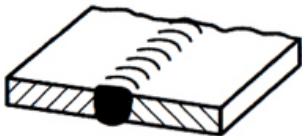



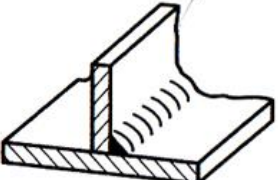



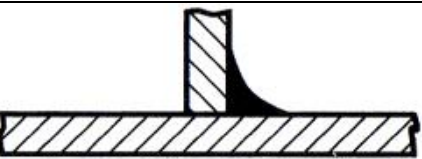
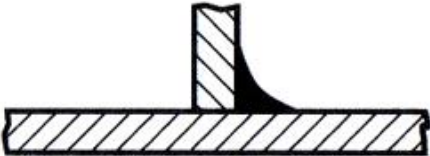
### Keevitusmärgid e sümbolid

Keevisõmbuste tähistus sisaldab põhimärke e sümboleid, mida võib täiendada:

- lisamärkidega,
- mõõtmetega,
- lisaviidetega.

Üldjuhul kajastavad põhimärgid servavahemikku või keevisõmbuse kuju. Võib kasutada mitme põhimärgi kombinatsiooni. Põhimärkide ja lisamärkide näiteid on toodud tabelites 2.2 ja 2.3.

Valik keevisõmbeluste tähistamise põhi- ja lisamärke







Õmbeluse tüüp	Eskiis	Keevitusemärk
I-õmbelus		
V-õmbelus		∇
Y-õmbelus		Y
Juureavamisega V-õmbelus, juurelääbimiga V-õmbelus		⤵
Nurkõmbelus		△
Tasane V-õmbelus		▷
Tasane töödeldud V-õmbelus		▷△
Juurelääbimiga Y-õmbelus		▷Y▷
Nõgus nurkõmbelus		△↷
Sujuva üleminekuga nurkõmbelus		△↷

Põhimärke võib täiendada õmbluse välispinda või õmbluse kuju kirjeldavate lisamärkidega.

Tabelis 2.3 on valik keevisliidete tähistamise lisamärke.

Tabel 2.3

Keevisõmbluste tähistamise lisamärgid

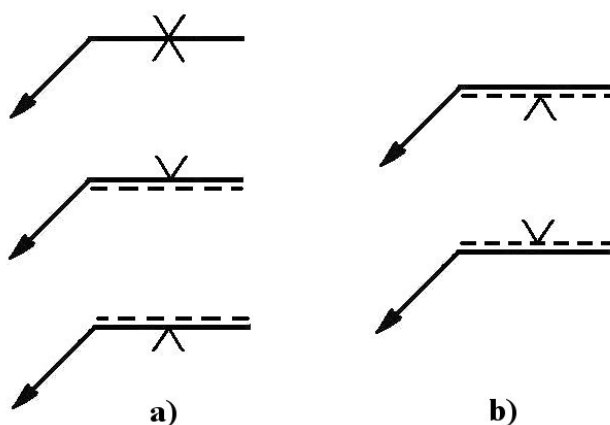
Lisamärgi nimetus	Keevitusmärk
Tasane õmblus	
Kumer õmblus	
Nõgus õmblus	
Sujuva üleminekuga õmblus	
Kinnitava juuretoega õmblus	
Eemaldatava juuretoega õmblus	

Keevitusmärkide kandmine joonistele

Keevisõmbluse tähistuse näiteid on toodud joonis 2.6, mis koosnevad lisaks keevitusmärgile õmbluse asukohta või keevituspunkti suunatud viitenoolest, viitenooli laudist ja katkendjoonena näidatud identifitseerimisjoonest. Identifitseerimisjoon võib olla näidatud pidevjoone all või peal. Sümmeetriliste õmbluste korral on katkendjoon tarbetu ja seda ei näidata.

Viitenool ja laudi koos moodustavad viitemärgi. Kui tahetakse näidata keevitusprotsessi, keevituse kvaliteeditaset, keevitusasendit, lisa- ja abimaterjale, lisatakse need laudi lõppu hargnevasse sabaosasse.

Vajadusel võidakse kasutada mitut põhimärki üheskoos, näiteks juureõmblusega V-liide, faasitud servadega T-liide e T-liide HV- põkkõmblus koos nurkõmblusega. Sümmeetriliste õmbluse korral kasutatakse kahte põhimärki koos ja ei kasutata katkendjoonega identifitseerimisjoont (joonis 2.6).



Joonis 2.6. Põhimärkide näitamine koos viitejoonega ja sümmeetrilistel õmblustel ilma viitejooneta

## Keevitusmärkide asend laudi identifitseerimisjoone suhtes

Keevisõmbuste täpse asukoha määravad:

- viitenooleotsa asukoht;
- laudi katkendjoone ehk identifitseerimisjoone asukoht;
- keevitusmärkide asukoht.

Keevitusemärgid näidatakse kas laudi viitejoone peal või all järgmiste reeglite järgi:

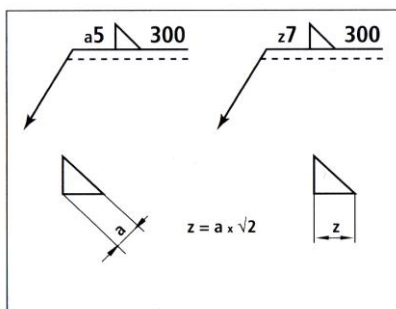
- keevitusmärgid näidatakse viitejoone (pidevjoone) poolel, kui õmblus asub viitenoole poolel (esiküljel);
- keevitusmärgid näidatakse laudi katkendjoone poolel, kui õmblus asub viitenoole vastaspoolel.

Standard lubab kasutada variante, kus identifitseerimisjoon on laudi all või ka laudi peal. Identifitseerimisjoone abil saab näidata, kas õmblus on “noole poolel” e seal, kus lõpeb nooleots või vastaspoolel.



Joonis 2.7. Õmblus on noole poolel (vasakpoolne skeem) ja õmblus on noole vastaspoolel (parempoolne skeem)

Nurkõmbuste mõõtmeid võib näidata kahel viisil (joonis 2.8).



Joonis 2.8. Nurkõmbuse tähistamine joonistel

Täiendavad märgid (joonis 2.9)

Täiendavad märgid võivad olla vajalikud õmbuste teiste iseloomulike tunnuste näitamiseks.

Näiteks:

Kontuurõmbused

Juhul kui õmblus on valmistatud ringi ümber detaili (mööda kinnist kontuuri), siis näidatakse viitenoole ja laudi lõikepunkti ring.



Joonis 2.9. Kontuurõmbused ja montaažiõmbused

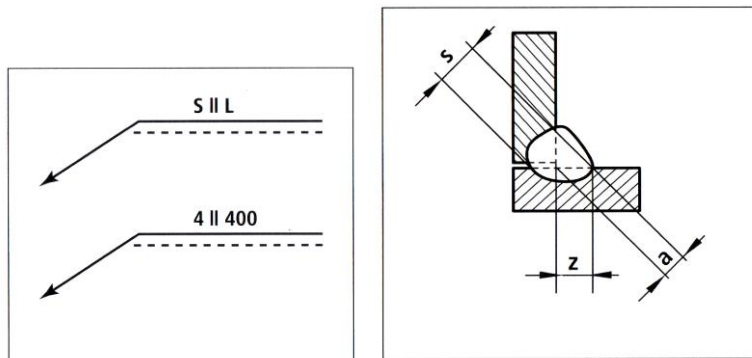
### Koosteõmbused e montaažiõmbused

Koostekohal või montaažikeevitusel tehtud õmbused tähistatakse lipukesega laudi ja viite-noole löikepunktis.

### Keevisõmbuse mõõtmete näitamine

Õmbuse pikkusmõõdu puudumine keevitusmärgist paremal (järel) tähendab, et õmbus on kogu detaili pikkune. Tingmärgist paremale kantakse õmbuse pikkus juhul, kui õmbus ei ole detailipikkune või tähistus on raskest tõlgendatav.

Põkkõmbused on täielikult läbi keevitatud, kui ei ole teisiti näidatud. Kui põkkõmbus ei ole läbi keevitatud, siis seda näidatakse põhimärgi ees tähega  $s$  ja numbriga läbikeevituse suurus (joonis 2.10). Suure läbikeevitusega nurkõmbustel tähistatakse läbikeevituse suurus  $s$  tähe ja numbriga, näiteks  $s8a6$ . Punktõmbuste tähis sisaldab keevispunkti läbimõõtu, ringiga põhimärki ja punktide arvu (vahekaugus). Näide:  $d \circ n (e)$ .



Joonis 2.10. Läbikeevituse märkimine joonisel

Nurkõmbuste mõõtmeid võib tähistada kahel viisil (vt joonis 2.8). Tähed  $a$  või  $z$  kirjutatakse enne arväärtust.

### Keevitusprotsessi märkimine

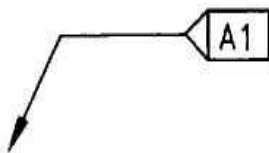
Vajaduse korral näidatakse keevitusprotsess ehk keevitusviis viitejoone laudi hargnevas sabaosas tunnusnumbriga. Keevitusprotsesside loetelu koos tunnusnumbriga on toodud standardis ISO 4063.

Info esitamine järjestus laudi sabaosas

Õmblust iseloomustavat infot ja mõõtmeid võib täiendada laudi sabaosas andmetega allpool toodud järjestuses:

- keevitusprotsessi tunnusnumbriga (näiteks ISO 4063 järgi);
- õmbluse kvaliteeditaseme tähise tähega (nt. ISO 5817, EN 25817 ja ISO 10042 järgi);
- keevisõmbluse asendi tähisega (nt. ISO 6947 järgi);
- lisamaterjalide tähisega (nt. ISO 544, ISO 2560 ja ISO 3581 järgi).

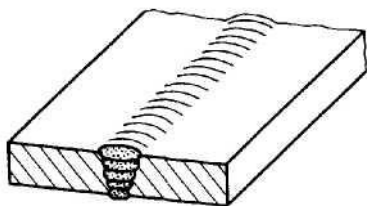
Üksikud andmed eristatakse üksteisest kaldjoonega. Lisaks võib laudi sabaosas spetsiifiliste juhiste (nt tehnoloogiajuhiste) näitamiseks hargmiku järel tuua tabelikese viitega sellele infole.



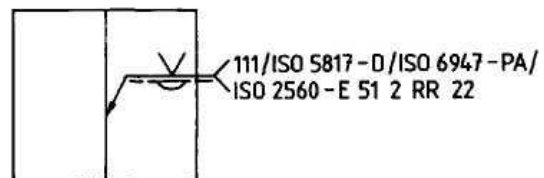
Joonis 2.11. Infoviide tabeli kujul

Näide

A1: V-õmblus/ 135 / ISO 5817 C/



Pealtvaade



Joonis 2.12. Info näitamine tähistuse sabaosas

Näite kirjeldus: juurelääbimiga keevitatud V-õmblus, mille valmistamiseks on kasutatud elektroodkeevitust e keevitusprotsessi tunnusnumbriga 111, nõutav õmbluse kvaliteeditase defektide järgi on D, keevitatakse allasendis tähistusega PA, kasutatakse elektroodi klassifikatsiooniga ISO 2560 järgi: E512 RR 22.

### 2.3. Kevitusdefektid ja nende liigitus

Ükski traditsioonilise keevitusprotsessiga valmistatud keevisõmblus ei ole ideaalne. Esinevad kõrvalekalded õmbluse pidevuses, mehaanilistes omadustes, õmbluste mõõtmetes või ristlõike kujus. Tuleb märkida erinevat terminoloogiat nende kõrvalekallete liigitamisel eri maades.

USAs kasutatakse nende kõrvalekallete tähistamiseks termineid *discontinuity*, aga ka *flaw*, millele Euroopas vastab mõiste *imperfection*. Need on sellised kõrvalekalded, mis ei mõjuta keevistoote tööga ja on teatud piirides lubatud. Paremini sobiks siin kasutada TTÜ MTI katselaboris pakutud terminit “keevitushälving”. Mõiste ”defekt” (*defect*) all USAs ja Euroopas mõeldakse ebapidevust, mille olemasolu tõttu nimetatud toode või tema osa ei vasta



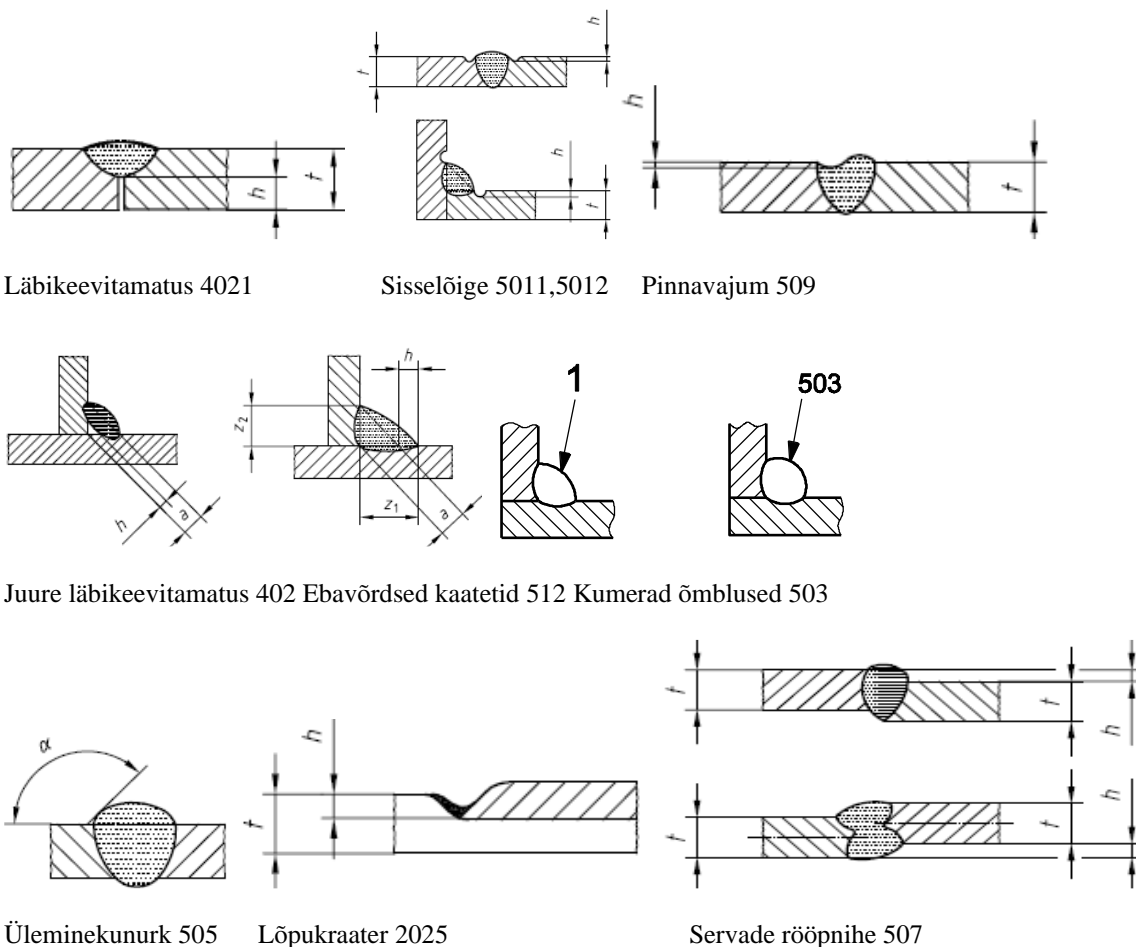
minimaalsetele rakendusstandardite või spetsifikatsioonide nõuetele. Nõutav on selle kõrvalekalde parandamine. Euroopa standardite ISO 6520 ja ISO 5817 eestikeelsete tõlgete viimastes versioonides nimetakse neid **mitteaktsepteeritavaid hälvinguid keevitusvigadeks**.

### Keevitusdefektide ja -vigade liigitus ja tähistamine

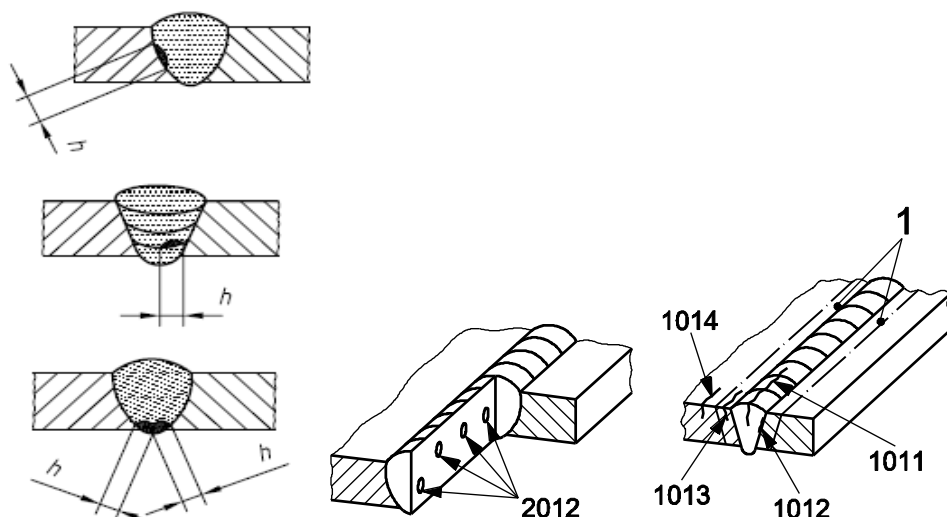
Keevitusdefekte võib liigitada välisteks, sisemisteks ja kujudefektideks. Keevitusdefektid on rühmitatud ja nende kirjeldamiseks kasutatakse kas numbertunnustega või tähttunnustega tähistust. Tänapäeval kasutatakse keevitusdefektide liigitamiseks koodnumbrite e tunnusunumbritega tähistamise süsteemi standardi ISO 6520 järgi. Defektid on rühmitatud, kusjuures esimene tunnusnumber näitab defekti tüübi rühma numbrit ja järgnevad numbrid täpsustavad defekti. Samuti on piiratud kasutusel numbertähttähistusega tähistussüsteem ISO/TS 17845:2004. Näiteks sisselõike defekti tähistatakse ISO 6520 järgi tunnusnumbriga 501 ja ISO 17845 järgi tunnusega 4EAAA. Standardis ISO 6520 eristatakse ja tähistatakse numbertähisega järgmisi defekte: praod (tähistuse esimene number 1), tühikud ja poorid ( numbertähis algab 2-ga), võõrlisandid keevismetallis (nr 3), kokkusulamatus ja läbikeevitamatus (nr 4), kuju ja mõõtmehälbed (nr 5) ja muud defektid, mis ei mahtunud eelmiste alla (nr 6).

**Välisteks defektideks** loetakse neid, mis avanevad toote pinnale või asuvad vahetult selle all.

**Sisemised defektid** asetsevad liite sees. Näiteid keevitusdefektidest on toodud joonisel 2.13 ja joonisel 2.14.



Joonis 2.13. Näiteid keevisliidete välistest defektidest koos tunnusnumbritega



Kokkusulamatus 401

Joonis 2.14. Näiteid keevisliite sisemistest defektidest

Olulisemaks loetakse defektide liigitust nende kuju järgi:

– **tasapindsed** e 2-mõõtmelised (*linear type*) – siia kuuluvad praod, servade kokkusulamatus jt.

– **ruumilised** e 3-mõõtmelised (*volumetric type*) – siia kuuluvad poorid, räbupesad, uuris-poorid, võõrlisandid.

Märgitakse, et tasapindsed defektid kui suuremad pingekontsentratsioonid on ruumilistest ohtlikumad. Sageli loetakse oluliseks defekti kõrgust, pikkus on vähemtähtis. Mingi defekti mõju hindamisel liite tööele tuleb arvestada liite koormamise iseloomuga, kas on tegemist jõu-, kinnitus-, side- või abiliitega. Eriti tundlikud on tasapindsetele defektide suhtes väsimusele töötavad liited. Pindmised tasapinnalised defektid võivad jääkpingete ja rakendatud koormuste mõjul (nt paindel) oluliselt vähendada vastupanu väsimusele ning põhjustada ka korrosioonpurunemist.

Pinnadefektide ohtlikkus suureneb toote kasutamisel miinustemperatuuridel, näiteks külmhapruse piiri lähedal, kus võib esineda liite habras purunemine.

Igat keevitusprotsessi iseloomustavad teatud keevitusdefektid. Nii võib terase MAG-keevitusel liiteviga e servade kokkusulamatus moodustada kuni 70%, poorid ja läbi-keevitamatus kuni 26% summaarsest defektide arvust [9].

## 2.4. Keevituse kvaliteeditasemed defektide järgi ja nende määramine

Arvestades erinevate defektide ohtlikkust ja toodete kasutamise tulemusi, samuti mitte-purustava kontrolli NDT-teostajate kogemusi, jagatakse terasest kaarkeevitusliited keevitusdefektide mõõtmete järgi 3 tasemele e klassi standardi EVS EN 5817:2008 järgi. Alumiiniumi keevitusdefektid on liigitatud samuti 3 taseme järgi standardi EN 30042 järgi.

Kvaliteeditasemed, mõnel maal, nagu Saksamaa, Soome, Rootsi kutsutakse ka klassideks, on välja pakutud järgmised:

- D – mõõdukas (rahuldav),
- C – keskmine,
- B – range, kõrge.

Varasem standard sisaldas ka taset WA, millest on loobutud, kuid eriti vastutusrikaste metallkonstruktsioonide tootmisel on võetud kasutusele rangem tase B+(vt EN 1090-2:2008).

Standardis ISO 5817 tuuakse erinevate defektide piirväärtused tasemete kaupa tabelite kujul. Kontrollil kehtib reegel, et juhul kui kas või üks defekt ületab etteantud piirväärtust ja kvalifitseerub keevitusveaks, siis õmblust ei aktsepteerita ja nõutakse keevitusvea parandamist. Keevituse kvaliteeditaset defektide järgi saab seostada staatiliselt koormatud konstruktsioonide korral nende tegelike tugevusomadustega. G. Schulze [10] on näidanud, et kui õmbluse kvaliteeditase on B, siis liite tegelikud tugevusnäitajad vastavad teoreetilistele. Kui antakse ette C-tase, siis võib liite tugevus olla 75% teoreetilisest, ja kui D-tase, siis ainult 50%. Keevisõmbluste tugevusarvutustes võetakse arvesse varuteguri määramisel erinevaid kvaliteeditasemeid [12]. Näiteks kui keevisõmbluse kvaliteeditasemeks on määratud B, siis lubatud pinge määramisel kasutatakse tegurit 1,0, kui on määratud C-tase, siis teguri väärtus on 0,9.

### Kvaliteeditaseme määramise põhimõtted

Keevisliited peavad omama nõutavat töökindlust kogu ettenähtud tööea jooksul, nad peavad olema piisavalt kvaliteetsed ja olema seotud kasutamise eesmärgivastavusega (*fitness for service, fitness for purpose–FPP*).

Keevisõmbluste kvaliteedi tagamisel on tähtis mõista keevitusdefektide tekkimise põhjusi ja nende mõju, avastamise võimalikkust ja määramismeetodeid. Keevisliidete kvaliteeti tuleks vaadelda laiemalt, mitte ainult kui kontrollijate avastatud defektid, vaid ka nn “metallurgilised hälved”, mis hõlmavad vähenenud tugevust, kõvadust, katkevenivust ja löögisitkust nii keevismetallis kui ka termomõjutsoonis. Keevisõmbluste kvaliteet kui laiem mõiste sisaldab endas konstrueerimise e kavandamise kaalutlusi ja arvutamist etteantud tööea tagamiseks, kindlaksmääratud materjalidest valmistamist, monteerimist, kasutamist ja hooldust etteantud tingimustes.

Keevistoodete ja keevisõmbluste konstrueerimisel on oluline nõutava kvaliteeditaseme määramine. Erinevate tootegruppide nõuded on toodud vastavates standardites ja koodides. Keevisliite kvaliteedi peavad määrama konstruktorid. Enamik keevitustootmise standarditest määratleb minimaalsed kvaliteedinõuded keevitusdefektide osas nii, et tagada toote ohutus etteantud kasutusaja jooksul. Kõrgemate kui standardites määratud kvaliteedinõuete kasutamine ei ole mitte ainult tehniliselt mittevajalik, vaid ka majanduslikult mõttetu. Kui nähakse ette liiga kõrged kvaliteedinõuded, siis toote hind läheb liiga kõrgeks ja toode pole maailmaturgudel konkurentsivõimeline. Madal kvaliteet võib viia suurte hoolduskuludeni ja purunemistele, mis võivad olla seotud suure materiaalse kahjuga või isegi inimkaotustega. Keevitustööde kulutuste kasv üleminekul C-kvaliteeditasemelt B-tasemele võib tõusta kuni 50–60% [11].

Tabel 2.4

Erinevate tegurite mõju keevituskuludele üleminekul C-kvaliteeditasemelt B-tasemele

Jrk. nr	Mõjutav tegur	Tase C	Tase B kulude kasv
1	Torude keevitus üldiselt	100%	5–40%
2	Keevitusasend	100%	5–60%
3	Elektroodkeevitus	100%	5–10%
4	MAG-keevitus traadiga	100%	5–30%
5	MAG-keevitus täidistraadiga	100%	3–15%
6	Räbustis keevitus	100%	0–5%
7	TIG-keevitus	100%	5–10%
8	Robotkeevitus	100%	5–40%
9	Õmbluse a-mööde	100%	10–30%
10	Keevitaja kutseoskused	100%	5–50%
11	Seadmete seisukord	100%	0–50%
12	Toorikute täpsus ja koostamine	100%	5–30%

Tabelist nähtub, et parema kvaliteedi saavutamiseks tuleb keevitada eelistatult allasendis, nõutav on keevitaja parem treenitus ja keevitusparameetrite väiksem tolerants.

Kui valida kõrgem kvaliteeditase, siis eeldatakse, et:

- kasutatakse kvaliteetsemaid ja heas seisukorras seadmeid ja rakiseid;
- keevitajate tööoskused peavad olema õigel tasemel;
- töötingimused peavad olema sobivad, näiteks valgustus, ergonoomilised tingimused;
- toorikute ettevalmistus on piisavalt kvaliteetne.

Eraldi lähenemist on pakutud teatud vastutusrikaste toodete – tuumaenergeetika seadmed, survemahutid, *offshore*-tooted, sillad ja surveseadmete kavandamine ning valmistamine, kus kasutatakse purunemismehaanika lähenemist. Alates 1980ndatest on välja töötatud terve rida purunemismehaanikal e prao leviku kiirusel põhinevaid keevitusdefektide hindamiskriteeriume tasapindse pingelukorra tingimustes, kus keevistootes võivad defektid viia hapra purunemisele ka elastsete pingete olukorras. Kasutades nn eesmärgivastavuse lähenemist, mis tuntud ingliskeelse termini *fitness for purpose* – *FFP* nimetuse all kavandamiseks ja tootmiseks, mis on kirjeldatud [13] IIW dokumendis. Arvestatakse nii koormuse suunda kui ka defektide suurust. Toote eesmärgivastavus tähendab seda, et defektid on sellised, et toodet saab eksploateerida etteantud tööea jooksul. Briti standardis ja [14] on toodud kolm hälvingute hindamise tasandit, mis paljude defektide osas ei erine oluliselt ISO 5817 toodud piirhälvetest.

Kes määrab kvaliteeditaseme?

Reeglina määrab keevisliite kvaliteeditaseme toote konstruktor, kes teab rakendatud koormusi ja kasutustingimusi. Aluseks on vastavad standardid, koodid, määrused, eeskirjad. Kui neid ei ole, siis tuleb arvestada ohutusnõudeid, ökonoomikat, inimohvrite võimalust ja eelnevaid kogemusi. Kvaliteeditaseme määramine peab toimuma enne tootmise alustamist, soovitatavalt pakkumise või tellimuse esitamise etapil. Konstruktori huvides on üldiselt nõuda võimalikult kvaliteetset toodet. Tootja huvides on hoida kvaliteeti majanduslikult õigustatud tasemel.

Edasi kasutavad sama standardit mittepurustavat kontrolli (NDT) teostavad laborid, kelle huvides võib olla võimalikult suure kontrolli ulatuse saavutamine. Seetõttu võib öelda, et standard on siduv kolme valdkonna spetsialistide jaoks: konstruktor – tehnoloog – mittepurustava kontrolli e NDT kontrolör.

Praktikas on kujunenud nii, et üldiselt kasutatakse ehituskonstruksioonide ja mittevastustusrikaste staatiliselt koormatud konstruksioonide valmistamisel C-kvaliteeditaset. Lubatud defektid võivad sõltuvalt liite koormamise iseloomust olla erineva kvaliteeditasemega. Näiteks teraskonstruksioonide valmistamisel standardi EN 1090-2:2008 järgi kasutatakse üldiselt C-taset, kuid osale defektidele nagu sisselõige, pealevalgumine, lõpukraater, lubatakse D-taset. Katelde, surveadmete, kõrgsurvetorustike valmistamisel ja remondil kasutatakse reeglina B-taset. Kui lepingus, tehnilises spetsifikatsioonis või muus dokumentatsioonis ei ole keevituse kvaliteeditaset määratud, siis ei saa see olla madalam kui D-tase. Halvema kvaliteediga kui D-tase toodetud keeviskonstruksioone ei aktsepteerita. Standardid ei sunni ühesuguseid kvaliteeditasemeid määrama kogu konstruksiooni ulatuses. Nii võib standardite järgi mõningatel juhtudel ühele keevisõmblusele määrata osale keevitusdefektidele B-kvaliteeditase, osale C-kvaliteeditase.

Mida teha, kui kvaliteeditaset ei ole määratud. Siin võib kasutada E. Toivaneni soovitusi [11]. **D-kvaliteeditase** määratakse järgmistel tingimustel:

- teraskonstruksiooni kasutatakse plusstemperatuuril (+5...+80 °C);
- põhimetalli seinapaksused on suhteliselt väikesed (üle 2 mm, kuid alla 30 mm);
- korrosioonikaitsele ega keevisõmbluste väljanägemisele ei ole nõudmisi;
- koormused on staatilised (koormustsüklite arv alla 500), deformatsiooniohtu ei ole;
- keevisõmblus ei ole koormust vastuvõttev õmblus (sideliide, kinnitusliide);
- konstruksiooni stabiilsuse kaotusest ei teki ohtu kasutaja ega muu ümbritseva keskkonna jaoks.

Millal võib kasutada **B-kvaliteeditaset**?

Järgneva kolme tingimuse samaaegne esinemine järgmises koosluses võib olla aluseks, et määratakse B-tase (kui ei ole teisiti kokku lepitud):

- keevisliide on koormust vastuvõttev e jõuliide;
- keevisliidet koormatakse dünaamiliselt;
- keevisliite stabiilsuse kaotus võib põhjustada kahju või vigastusi seadme kasutaja või ümbritseva keskkonna jaoks;
- kui seadet kasutatakse madalatel temperatuuridel, kus hapra murdumise tõenäosus kasvab (alla –30 °C),
- kui terase tõmbetugevuse-voolavuspiiri suhe on alla 1,18 ja materjali paksus on üle 20–25 mm.

## 2.5. Väsimusele töötavate keevisliidete kvaliteedinõuded

Kui liidet koormatakse enama kui 10 000, mõnede autorite poolt ka 500 või 1000 tsükliga vahelduva koormusega, siis tuleb keevisliite kvaliteedi määramisel arvestada kriitiliste kohtade väsimuspurunemisega.

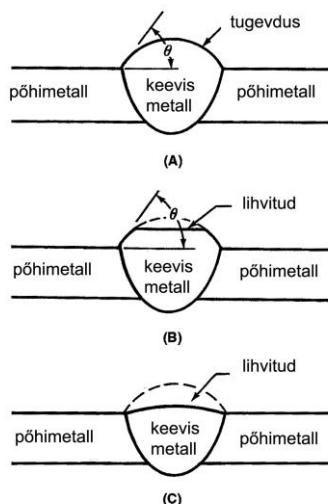
Kui keevisliide töötab väsimusele, siis on purunemine seotud suurel määral pingete kontsentratoritega, eriti just toote pinnakihis või selle lähedal. Sellest seisukohast lähtudes on vaja väsimusele töötavatel liidetel arvestada õmbluse tugevduse ja sisselõike koosmõju, e

üleminekunurka õmbusel põhimetallile, samuti detailide koostamishälbeid-detailide nihkumist e rööphälvet. Keevisliite väsimustugevus väheneb märgatavalt, kui koostamisel on detailid nihkunud. Nihe suurusega 1 mm lehtede paksusega 10 mm e 10% vähendab väsimustugevust kuni poole võrra. Suhteliselt väike mõju on väsimustugevusele õmbuse poorsusel ja võõrmetalli lisanditel (nt W-suletised), kui nad asetsevad materjali sügavuses. Suur mõju väsimustugevusele on sellistel ohtlikel defektidel, nagu läbikõõritatus, praod ja servade kokkusulamatus. Eriti suur koormõju väsimustugevusele on suurel õmbuse tugevdusel ja sisselõikel (vt tabel 2.5). Väsimustugevuse seisukohast on tähtis üleminekunurk põhimetallilt keevisõmbusele (toe), mitte alati õmbuse tugevduse kõrgus. Kui käiata maha tugevdus ja mitte muuta seejuures üleminekunurka, siis väsimustugevuse paranemist ei saavutata.

Tabel 2.5

Pökkõmbuse tugevduse üleminekunurga ja sisselõike mõju väsimustugevusele [11]

Puutenurk ja tase	Sisselõige 0,2 mm	Sisselõige 0,4 mm
180 kraadi, tugevdus eemaldatud – B-tase	5 mln tsüklit	4 mln tsüklit
165 kraadi – B-tase	2,9 mln tsüklit	1 mln tsüklit
150 kraadi – B-tase	0,95 mln tsüklit	0,45 mln tsüklit
135 kraadi – C-tase	0,42 mln tsüklit	0,23 mln tsüklit



Joonis 2.15. Keevisõmbuse piirjoone üleminekunurga suurendamine keevisõmbuse töötlemisega

Osaline tugevduse eemaldamine ei muuda üleminekunurka ja ei paranda väsimustugevust. Väsimusele töötavates liidetes saab vähendada prao levimise kiirust sisepingete vähendamise ja nende kontsentratsiooni vähendamise. Õmbuse väsimustugevust saab parandada:

- vähendades tõmbepingeid õmbuses ja kõrvalalal või tekitades seal survepingeid,
- lokaalse keevisõmbuse kuju ja ülemineku parandamisega õmbusel põhimetallile,
- õmbuse kõrvalalala läbitagumisega (*peening*), mis tekitab õmbuse kõrval tõmbepingeid elimineerivaid survepingeid, kasutades piikvasaraid sagedusega 20–100 lööki minutis;
- TIG-keevitusega (*TIG-dressing*) üleminekunurga parandamisega;

- õmbluse ülemineku töötlemine sõrmkäiadega ja vesijugalõikusega, mille tulemusena saadakse suurema üleminekuraadiusega üleminek;
- õmbluse ultrahelitöötusega. Lisaks tõmbepingete kompenseerimisele muutub sisselõige üleminekul sujuvamaks ja väheneb pingete kontsentratsioon.

NSVLis kasutati ultrahelitöötlust (*ultrasonic impact treatment*) laevade ja allveelaevade kerede valmistamisel. Vähendati esialgset pingete kontsentratsiooni üleminekualas põhi-metallilt õmblusele, deformeerides materjali ja tekitades seal surve-jääkpingeid. Kirjanduses [12] on märgitud, et ultrahelitöötlus parandab väsimustugevust 50–200% ja väsimuspiiri 5–10 korda. Lappeenrannas tehtud ultrahelitöötlemise katsetel [13] sagedusega 27 kHz amplituudiga 35–40 µm kiirusega 0,3–1,5 m/min deformeeriti terast kuni 1,5 mm sügavuses lehe pinnast ja saavutati liite suur väsimustugevuse tõus.

## Kokkuvõte

1. Keevisõmbluste tähistamisel joonistel kasutatakse põhi- ja lisamärke või nende kombinatsioone, kusjuures keevitusmärgist vasakul näidatakse läbikeevituse suurus või nurkõmbluse mõõde, paremal pool vajadusel õmbluse pikkusmõõde.
2. Keevisõmbluse tähistuses võidakse näidata täiendavat infot keevitusprotsessi, keevisõmbluse kvaliteeditaseme, keevitusasendi jm kohta.
3. Konstruktoril tuleb lisaks liite geomeetria le määrata veel kvaliteeditase defektide järgi, kusjuures tuleb arvestada majanduslike teguritega.
4. Arvestada tuleb keevitusdefektide iseloomuga, kusjuures ohtlikumaks loetakse nn tasapindseid, mitte ruumilisi defekte.
5. Väsimusele töötavatele keevisliidetele tuleb kehtestada erilised piirangud teatud defektide mõõtmetele ja nende asukohale.
6. Keevisliidete kvaliteeditasemete standard on siduv lüli konstruktori, tehnoloogi ja kontrollija vahel, mida tuleb kõigil osalistel jälgida.
7. Keevitusdefekt on lubatud kõrvalekalle õmbluse pidevuses või kujus ja ei vaja parandamist. Keevitusviga nõuab defektse koha lahtilõikamist ja uuesti keevitamist (remontkeevitust).

### 3. KAARKEEVITUSE KAASNÄHTUSED

#### 3.1. Keevitusvann ja metallurgiaprotsessid

Keevitamisel kasutatav soojusallikas kuumutab ja sulatab nii liidetavate detailide servi kui ka lisametalli elektroodi kujul. Sulametall koguneb õmbluse ossa, mida nimetatakse keevitusvanniks (*welding pool, puddle, molten pool*) oma iseloomuliku kaju tõttu. Keevitusvanni tardumisel saadakse keevismetall e keevisõmbluse metall (*weld metal*).

Keevismetalli omadused sõltuvad suurel määral keevitusvannis toimuvatest metallurgia-protsessidest, mis on sulakeevitusel sarnased klassikaliste metallurgiliste protsessidega valu-plokis, kuid märksa keerukamad järgmistel põhjustel:

- a) keevituse soojusallika (elektroodi) ja sulametalli kõrge temperatuur (terastel kuni 1800 °C);
- b) väiksemahuline sula keevisvann, mis on ümbritsetud külma metalliga,
- c) sula keevisvanni lühike kestus, terastel 4...40 s,
- d) sulanud elektroodivarda metalli siirdega keevisvanni kaasnevad nähtused.

Sulametalli vanni kõrge temperatuuri tõttu aktiveeruvad paljud füüsikalise-keemilised protsessid tavametallurgiaga võrreldes, nagu gaaside ja metalli vahelised reaktsioonid, gaaside lahustumine keevitusvannis, mis tavaliselt halvendavad keevismetalli omadusi.

Keevisvanni ümbritsev külm põhimetall põhjustab sulametalli kiiret jahtumist, mistõttu paljud keemilised reaktsioonid ei kulge lõpuni ja lühikese kestuse tõttu ei jõua lahustunud gaasid ja räbu alati tõusta õmbluse pinnale enne metalli tardumist, põhjustades nõnda poorsust ja räbupesasid.

Vaatleme metallurgiaprotsesside mõju ühte tüüpi keevitusdefektide – pooride tekkele. Tänapäeval moodustavad poorid kõikidest keevitusdefektidest 10–26% [9]. Varem on Inglismaal täheldatud, et kuni 85% keevisõmblustest välja käiatud defektidest moodustasid poorid ja tühikud [17]. N. E. Hannerz märgib, et väikese arvu ja mõödult väikeste pooride korral ei ole alati vaja neid välja lihvida ja detaile uuesti keevitada. Defektse koha remont-keevitus võib viia uute defektide tekkeni.

Pooride tekke kohta on levinud erinevad teooriad. On kokku lepitud, et pooride tekkel domineerivad kaks mehhanismi:

- sula keevismetalli tardumisel tekivad mikroskoopilised kahanemistühikud. On takistatud sulametalli juurdeandmine nendesse tühikutesse;
- sulas keevismetallis lahustunud gaasid põhjustavad gaasitühikuid, mis on sulas olekus kordades suuremad kui tahkes olekus. Toimub gaaside difusioon mikropragudesse.

Keevismetalli võib vaadelda kui valandit, mis ei ole kunagi vaba väikestest pooridest. Pooride vältimiseks peab keevitusvann olema täielikult desoksüdeeritud Mn-i ja Si-ga. Keevitusvannist sadestuvad välja tardumistemperatuuril mangaansilikaadid. Ränil on suurem afiinsus hapniku suhtes kui süsinikul ja nii ei jõua toimuda reaktsioon  $C + O_2 \rightarrow CO_2$  ning võib esineda intensiivne pooride teke. MAG-keevitusel süsihappegaasis kasutatakse sageli kõrgendatud (kuni 0,9%) Si sisaldusega keevitustraati, et vähendada pooride tekke tõenäosust. Eriti vajalik võib see olla rahulike teraste keevitamisel, mis sisaldavad kuni 0,2% Si. Tekkinud ränioksiidid eemalduvad keevitusaerosoolidena. Kui keevitatakse ainult argoonis, võib kasutada madalama Si sisaldusega traati.



## Lämmastiku mõju

Lämmastik on tähtis pooride tekitaja keevisõmblustes. Atomaarne lämmastik esineb rauas nitriidide  $\text{Fe}_2\text{N}$  ja  $\text{FeN}$  kujul kontsentratsiooniga kuni 0,065%. Kõrgel temperatuuril tekivad räni- ja mangaannitriidid. Olenevalt jahtumiskiirusest võib lämmastik osaliselt või täielikult eralduda. Dissotsieerunud lämmastik reageerib hapnikuga  $\text{N} + \text{O} \rightarrow \text{NO}$ . Viimane võib lahustuda sulametallis, kusjuures jahtumisel moodustuvad nitriidid ja oksiidid.

Elektroodimetalli siirdeprotsessis lahustub lämmastik sulametalli tilkades ja satub keevitusvanni. Aluseliste elektroodidega keevitades keevituskaare pikenedes võib õmblusmetalli sattunud lämmastik põhjustada poorsust. Lämmastik halvendab üldiselt terase löögisitkust, kuid väikestes kogustes (0,001–0,008% N) võib tõsta tugevust ja kõvadust.

MIG/MAG-keevitusel võib lämmastik sattuda keevismetalli juhtudel, kui kaare gaasikaitse on ebapiisav. Loetakse, et keevismetallis ei tohiks olla üle 0,024% lämmastikku. Poorid võivad tekkida samuti suurendatud lämmastikusisaldusega teraste keevitamisel. Pooride teket on täheldatud plasmalõigatud teraste keevitamisel, kui plasmagaasina on kasutatud lämmastikku.

## Vesiniku mõju

Vesinik satub keevitusvanni reeglina elektroodikattesse või rübustisse imatud niiskusest, aga ka keevitustraadile või detailidele sattunud veest. Sulas olekus lahustub rauas kuni 0,0007% atomaarset vesinikku ehk 12 ml/100 g keevismetalli kohta. Vesiniku aatomid satuvad difusiooni tagajärjel dendriitide ja mittemetalsete lisandite vahele õmblusmetallis, ühinedes seal molekulideks ning moodustades tühikuid. Kiirel jahtumisel võivad tekkida õmbluses poorid. Vesinikupooride kogum õmbluse metallis on spetsiifilise kujuga ning tuntud murdepinnas nn kalasilma nime all. Töös [15] on märgitud, et kõige suurem pooride tekke tõenäosus on vesiniku kontsentratsioonil 15–20 ml /100 g keevismetallis.

## Süsihappegaasi mõju

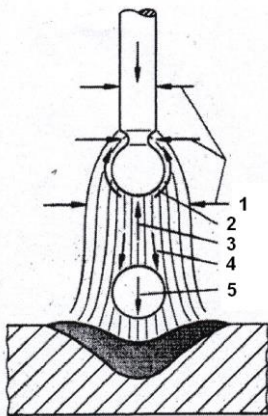
Süsihappegaasil on aktiivne mõju MAG-keevitusel. Süsihappegaas ei lahustu sulas keevitusvannis. Esimesena oksüdeerub Si, siis Mn, mille väljapõlemise vältimiseks tuleb keevitustraati legerida täiendavalt Si ja Mn. Väheneb raua oksüdeerumine ja ( $\text{FeO}$ ) ning CO tekkimine ning nendevahelisel reaktsioonil eralduvate tekkivate gaasipooride oht desoksüdeerimisprotsessi tulemusena metalli tardumise faasis. Keevitustraati legeritakse 0,5...1,1 % Mn ja 0,3...0,4% Si.

## 3.2. Keevituselektroodile mõjuvad jõud

Keevituselektroodi või keevitustraadi otsale mõjuvad erinevad jõud (joonis 3.1), mis mõjutavad sula metallitilkade moodustumist, siirdeprotsessi kaarevahemikus, sulametalli voolamist keevitusvannis, õmbluse ristlõike ja pealispinna kuju, defektide teket.

Algselt sulab keevituskaare soojuse toimel elektroodivarda õhuke otsakiht. Järgnevalt omandab see kiht raskusjõudude ja pindpinevusjõudude toimel tilga kuju ja moodustub väiksema ristlõikega kael. Kaela ristlõige aheneb, kasvab voolutihedus ja kaela pikenedes sulametalli tilk puudutab keevitusvanni ja lühistab kaarevahemiku. Kaasneb järsk voolu tõus, mis viib metallikaela purunemisele ja metallitilga eraldumiseni. Järgmisel hetkel taastub keevituskaar uuesti. Sulametalli tilk liigub suure kiirendusega sulas keevitusvanni, pritsides sealt osa metalli välja. Nimetatud mehhanism esineb MIG/MAG-lühikaarkeevitusel ja käsi-

kaarkeevitusel aluseliste elektrodidega. Ülejäänud juhtudel võib siirdemehhanism olla keerulisem.



Joonis 3.1. Elektrodile mõjuvad jõud MIG/MAG-keevitusel. 1 – Pinchi e elektrodünaamiline jõud, 2 – pindpinevusjõud, 3 – reaktiivjõud + metalliaurude survejõud, 4 – plasmavoolu jõud, 5 – raskusjõud + elektrostaatiline jõud

Vaatleme elektrodimetalli tilgale mõjuvaid jõude MIG/MAG-keevituse näite põhjal. Pindpinevusjõud ja sula metalli viskoossus takistavad metallitilga eraldumist ja vähenevad metallitilga temperatuuri ning hapnikusisalduse tõustes. Pindpinevusjõud mõjutavad metallitilkade suurust siirdeprotsessis. Piisavalt väikeste pindpinevusjõudude korral võivad elektromagnetjõud eraldada elektroodi otsast sulametalli peenikeste tilkadena. Tuleb märkida, et pindpinevusjõudude vähendamine on eelduseks sujuva ülemineku (toe) saavutamisel õmblusmetallilt põhimetallile.

Pindpinevusjõududel on suurim mõju laeasendis keevitamisel, kus keevitusvanni puudutamisel elektroodiotsaga põhiliselt pindpinevusjõudude toimel sulametall justkui imetakse raskusjõudu ületades keevitusvanni. Metallitilga raskusjõud allasendis soodustab ja laeasendis takistab siirdeprotsessi.

Siirdemehhanismi mõjutavad suurel määral risti elektrodiga mõjuvad ka Pinchi või Lorentzi jõudude nime all tuntud elektrodünaamilised jõud, mis püüavad magnetvälja toimel sula metallitilga elektrodist eraldada. Elektrodünaamilised jõud on võrdelised keevitusvoolu ruuduga, mistõttu elektrodimetalli väikese pindpinevuse ja suure keevitusvoolu tiheduse korral saadakse peentilksiire e pihustussiire (vt MAG-pihustuskeevitus, keevitus happeliste elektrodidega).

Metallitilkade eraldamist soodustavad elektrostaatilised ja plasmavoolust tingitud jõud. Keevituskaar on alt laienev, seega voolutihedus on suurem kaare ülasosas, mistõttu tekib magnetvälja toimel kaare teljesuunaline elektrostaatiline jõud ja plasmavool. Keevituskaare sisemuses olevad gaasid paisuvad ja nende ruumala kasvab mitmekordselt. Plasmavoog tekitab imeva jõu, mis kergendab metallitilkade eraldumist, näiteks raskusjõule vastassuunas laeõmbluste keevitamisel.

Metallitilkade eraldumist takistavad jõud: metalliaurude survejõud on tingitud metallis lahustunud gaasidest (O, H, N, CO<sub>2</sub>), mis metallitilga kiirel jahtumisel püüavad plahvatuslikult välja pääseda ja tõugata metallitilkasid ülespoole ning kõrvale (MAG-pikk-kaarkeevitus).

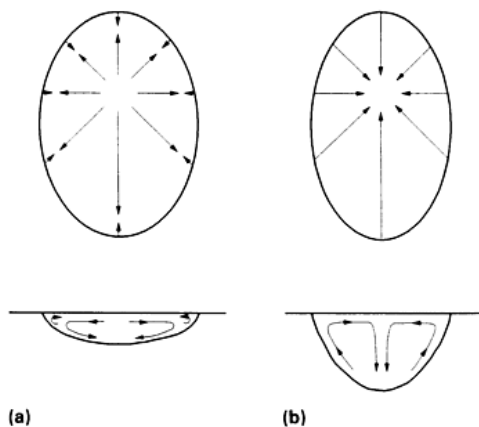
### 3.3. Voolamisnähtused keevitusvannis

Sulametalile keevitusvannis mõjuvad erinevad dünaamilised jõud, mis panevad selle liikuma. Liikuv sulametal edastab soojust ja domineerib soojust ülekandel keevitusvannis. Soojuse ülekande sõltub nii sulametalli voolamissuunast kui ka kiirusest, mistõttu keevitusvanni ristlõige võib olla väga erinev. Eriti tuntavad on voolamisnähtused TIG-keevitusel, kus ei esine elektroodimetalli siiret keevitusvanni ja voolamisnähtused võivad põhjustada selliseid keevitusdefekte, nagu puudulik läbikeevitus, sisselõiked, õmbluse pinna vajum ja suur karedus.

Keevitustootmisel on kvaliteedi tagamiseks vaja tagada keevisõmbluse ristlõike stabiilsus ehk korratavus, eriti automaatkeevituse korral. On vaja saavutada optimaalne keevise sügavuse  $D$  ja laiuse  $W$  suhe  $D/W$ , mis on eriti tähtis austeniitsete roostevabade teraste keevitamisel. Keevitustootmisel mõjuvad jõud ja voolamisnähtused mõjutavad keevitamise tulemusi.

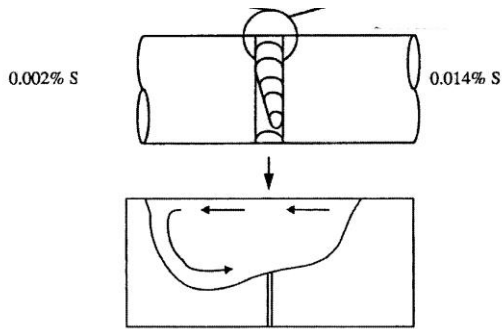
Keevitustootmisel mõjuvad järgmised jõud:

1. Pindpinevuse gradientjõud ehk Marangoni jõud (*Marangoni convection, surface tension gradient*). Keevitustootmisel on maksimaalne temperatuur õmbluse tsesentris ja minimaalne äärel. Tavaliselt sulametalli pindpinevus väheneb temperatuuri tõustes ehk pindpinevuse temperatuuritegur on negatiivne. Tekib pindpinevuse erinevus, mille tulemusel hakkab metall voolama ja kannab soojust tsesentrist äärtele ning saadakse väiksema läbisulatusega ja laiem keevisõmblus (joonis 3.2a). Teatud keemilised elemendid, mis segreeruvad sula metalli pinnale, võivad kindlas temperatuurivahemikus muuta pindpinevustegurit positiivseks ja pindpinevuse gradienti toimel hakkab metall voolama tsesentrist õmbluse sügavusse (skeem b). Soojust kantakse keevitusvanni põhja ja saadakse sügav, kitsam õmblus. Teoreetilised arvutused mudelitel näitavad, et võrreldes teiste keevitusvannile mõjuvate jõududega, on pindpinevusjõududel kõige suurem mõju, ja voolamiskiirus ulatub kuni 1 m/s. [19]



Joonis 3.2. Pindpinevusjõudude mõju voolamisele keevitusvannis ja keevitusvanni ristlõikele

On kindlaks tehtud, et juba väga väikesed kogused S, O, Se, Te parandavad läbikeevituse suurust. Käsiraamatus [19] on näidatud keevisõmbluse ristlõiked roostevabade teraste erineva väävlisisalduse puhul. Kui roostevaba teras sisaldas vähe väävlit, näiteks  $S = 3\%$ , siis oli suhe  $D/W = 0,2$  ja saadi madal ja lai keevisõmblus. Kui teras sisaldas rohkem väävlit, näiteks  $S = 160\%$ , siis suhe oli parem,  $D/W = 0,4$ . Seetõttu võidakse erinevate roostevaba terase partiide keevitamisel saada väga erinevaid tulemusi, vaatamata sellele, et terase elementide sisaldus on standardi järgi ettenähtud piires.

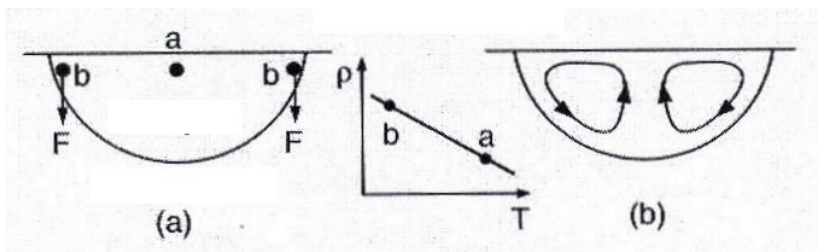


Joonis 3.3. Erineva S sisaldusega – 0,002% ja 0,014% torude läbikõrvituse kuju.

Joonisel 3.3 on näidatud erinevatest terase partiidest torude keevismetalli voolamine keevitusvannis ja keevisõmbeluse ristlõige. On näha, et keevitusvann nihkub väiksema S sisaldusega ala poole ja ei saavutata täielikku läbikõrvitust. Probleem võib esineda roostevaba austeniit-terase (mark AISI 316L), nn kõrghuhaskeevitamisel (*high purity welding*) farmaatsia- ja biotehnoloogiliste seadmete valmistamisel. Nimetatud terase standardiga lubatud väävlisisaldus on küllaltki laias vahemikus ( $S = 0,05\text{--}0,017\%$ ). Hea tulemuse saamiseks tuleb jälgida, et erinevatest partiidest teraste kokkukeevitamisel ei oleks S sisalduse erinevus torudes suurem kui 0,03%.

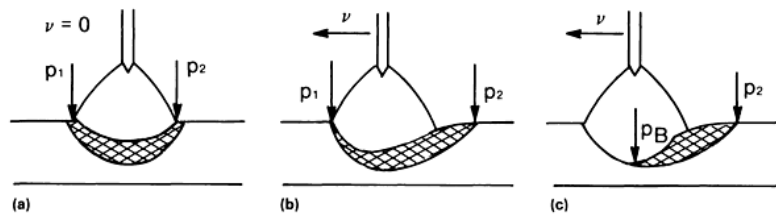
Järgmised keemilised elemendid roostevaba terase koostises, nagu Ca, Al, Ce, La, mis on sageli viidud teraste koostisesse lõiketöödeldavuse parandamiseks, võivad vähendada läbikõrvituse suurust. Al ja Ce reageerivad  $O_2$ , Ce reageerib väävliga ja tulemuseks saadakse madal ja lai keevisõmbelus. Keevitatava metalli pinnal, aga ka kaitsegaasis oleval väikesed hapniku kogused (500–700%) parandavad keevisõmbeluse ristlõiget, kuid optimaalsest suuremad kogused võivad tulemust halvendada. Hapnikusisaldust roostevaba terase pinnal võib suurendada pinna oksüdeerimisega, aga ka pinna liivapritstõotlusega või töötlemisega traatharjadega. Liiga intensiivne liivapritstõotlus suurendab pinnakihi hapnikusisaldust üle optimaalse ja nii võidakse saavutada negatiivne keevitustulemus.

2. Üleslükkejõud (*buoyancy force*) on tingitud temperatuuri gradiendist tekitatud erinevast metalli tihedusest. Metall voolab madalama temperatuuri alalt kõrgema temperatuuri alale. Sulametalli voolamiskiiruseks on kuni 3 cm/s ja selle jõu mõju ei ole märkimisväärne.



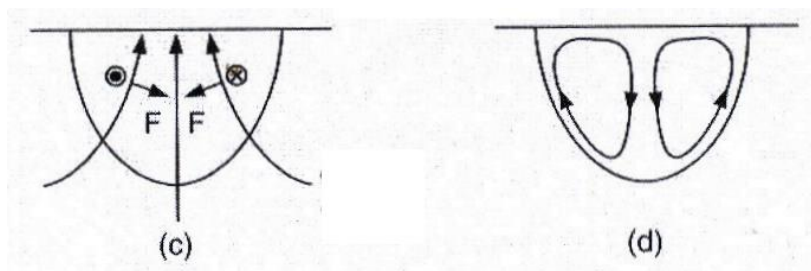
Joonis 3.3. Üleslükkejõud keevitusvannis

3. Plasmakaare surve jõud (*plasma jet force*) surub keevitusvanni allapoole ja võimaldab MAG-keevitusel pihustusrežiimil saada nn sõrmekujulise ristlõikega keevisõmbeluse (*finger penetration*). Seda liikumist takistavad pindpinevusjõud. Kui vooluallikas on paigal, siis radiaalsurve plasmajoast jaguneb võrdselt mõlemale poole kaart. Kui nüüd kaar liigub, siis radiaalsurve gradiendi toimel voolab metall kaare taha ja kaar süvistub ning kasvab läbikõrvituse sügavus. Sama mehhanism võib olla ka sisselõike defekti põhjuseks.

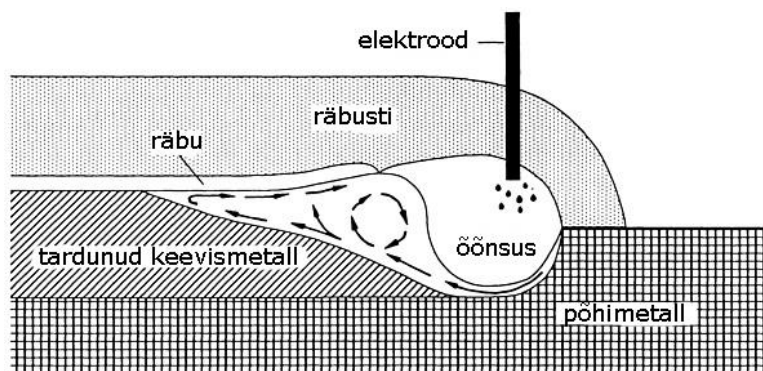


Joonis 3.4. Plasmakaare jõu mõju keevitusvanni voolamisele

4. Elektromagnetjõud ehk Lorentzi jõud (*Lorentz force*) mõjutavad keevitusvanni suurematel voolutugevustel (keevitus rübustis) ja annavad keevismetallile liikumise keevituskaare taha kiirusega 2–20 cm. Võib tekitada metallis pööriseid ja metalli voolumist keevitus-suunale vastassuunas ning tõenäoliselt defekte rübupesade näol (joonis 3.6).



Joonis 3.5. Lorentzi jõud keevitusvannis



Joonis 3.6. Rübupesade tekkimine keevitamisel rübustis

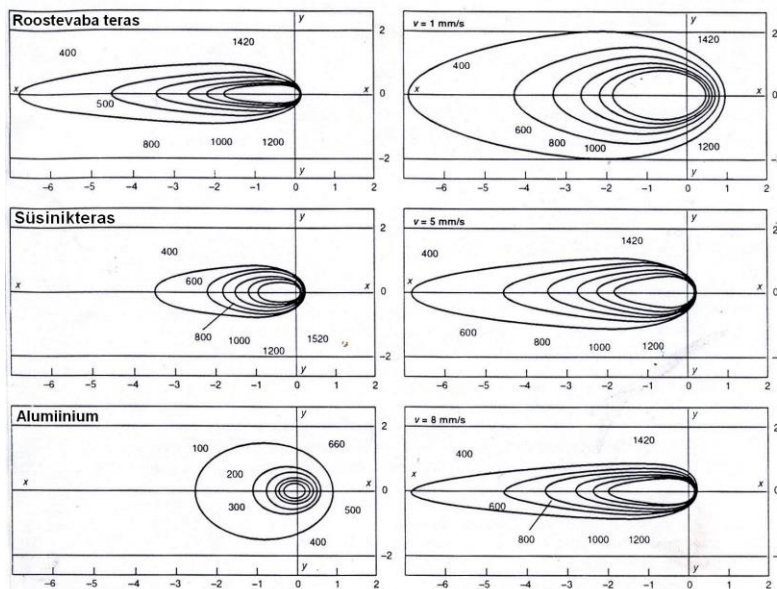
### 3.4. Soojuslevi keevitamisel

Sulakeevitusel juhitakse keeviseõmbluse pinnale kontsentreeritud soojusvoog, mille pindala on väike võrreldes detaili pindalaga. Osa vooluallika soojusvoost neeldub detailides, osa kulub metalli sulatamiseks, osa muutub soojuskadudeks kiirguse ja konvektsiooni kaudu. Keevituse energiaallika vahetu soojusülekanne ja vedela sulametalli ringvooluga edasikantud soojuse toime mõjutavad temperatuuri jaotust ehk temperatuurivälja, keevitusvanni suurust ja kuju, sula keevismetalli tardumisnähtusi.

Keevitamisel ühe läbimiga liigub soojusallikas piki keeviseõmblust ja koos sellega allikat ümbritsev temperatuuriväli. Temperatuur keevistoote erinevates punktides muutub pidevalt, mida praktikas iseloomustatakse samatemperatuuri joontega või isothermidega. Praktikale

pakub huvi keevisõmbuse ja tema lähiala temperatuuri sõltuvus ajast, mida tuntakse keevituse termotsükli nime all. Keevisliite mehaanilisi omadusi mõjutavad põhiliselt maksimaalne tsükli temperatuur ja jahtumiskiirus. Temperatuuri jaotus sulas keevitusvannis mõjutab legerivate elementide väljapõlemist sellest, aga ka vesiniku ja teiste gaaside neeldumist ja hilisemat eraldumist. Sula keevitusvanni sees olevad mittemetalsed lisandid võivad kasvada oma mõõtmel e koaguleeruda või lahustuda sõltuvalt kohttemperatuurist.

Keevitusvanni suurus ja isothermidde kuju sõltuvad keevituskiirusest ja keevitatava metalli soojusjuhtivusest (joonis 3.7). On näha, et väikestel keevituskiirustel on keevitusvann ellipsikujuline ja isothermid on välja venitatud keevituskiiruse vastassuunas. Keevituskiiruse kasvades venitatakse isothermid rohkem välja ja nii termoväli kui ka termomõjutsoon muutuvad kitsamaks. Suurematel keevituskiirustel omandab keevitusvann tilga või pisarakuju profiili ja võib olla edasisel metalli tardumisel kuumpragude algallikaks. Graafikutelt järeldub, et keevitades suurema keevituskiirusega on vaja sama suurusega õmbuse ristlõike või keevitusvanni saavutamiseks suurendada soojussisestust.



Joonis 3.7. Keevituskiiruse ja erineva soojusjuhtivusega põhimetallide mõju isothermiddele keevitamisel. Keevitati ühesuguse soojussisestusega [18]

Väiksema soojusjuhtivuse korral (roostevaba teras vs süsinikteras) muutub keevitusvann kitsamaks ja väljavenitatumaks. Hea soojusjuhtivusega Al keevitamisel on keevitusvann elliptiline ja väiksem. Metall kuumutatakse rohkem laiuse ulatuses ja võib olla vajalik lisa-soojuse andmine.

Soojuslevi detailides kaarkeevitusel kirjeldatakse erinevate teoreetiliste mudelite abil. Levinuimad on mudelid, kus punktikujuline soojusallikas liigub piisava kiirusega sirgjooneliselt.

Keevitamise algperioodil eraldab soojusallikas rohkem soojust, kui põhimetall on võimeline eemaldama. Mõnede autorite arvates [18] tekivad sellel perioodil kuumpraod, mis levivad piki õmblust. Keevitusvann tardub mitu korda suurema kiirusega kui püsiva protsessi korral. Selline olukord võib olla ka keevisõmbuste alustuskohtades läbikeevitamatus defekti põhjuseks. Mõningase aja möödudes saabub püsiv soojusolukord, kus soojusallika sisestatud soojushulk võrdsustub detailis neeldunud soojushulgaga. Keevituse jääkpingeid ja kahanemist

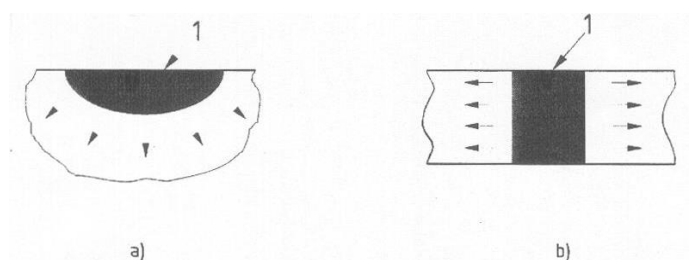


seostatakse selle etapiga. Erinevate autorite poolt pakutud soojuslevi mudeleid ei saa otseselt kasutada inseneripraktikas, kuid need võimaldavad hinnata keevituskiiruse ja keevitatava metalli soojusjuhtivust termovälja kujule. Lõplike elementide meetodi ja nüüdisaegse arvutus- tehnikaga kasutamine võimaldab teha keevisliidetes täpsemaid soojuslevi arvutusi.

Inseneriarvutustes kasutatakse soojuslevi arvutusi, hinnates jahtumisaega temperatuurivahemikus 800 kuni 500 °C, mida tähistatakse  $t_{8/5}$ . Roostevabade teraste juures on parameetriks jahtumisaeg 1200 kuni 800 kraadini, tähistatuna  $t_{12/8}$ . Kirjandusest kasutatakse ka teisi jahtumistemperatuuride vahemikke. Inseneripraktikas on soovitatav jahtumisaja määramiseks kasutada standardis EVS EN 1011-2 toodud metoodikat, valemiteid ja graafikuid.

Kaarkeevitusel eristatakse kahte soojuslevi mehhanismi sõltuvalt keevitatava lehe või plaadi paksusest, soojussisestuse suurusest:

- a) suhteliselt paks plaat kolmemõõtmelise soojusleviga,
- b) suhteliselt õhuke plaat kahemõõtmelise soojusleviga.



Joonis 3.8. Kahe- ja kolmemõõtmeline soojuslevi

Raske on vahet teha õhukesel ja paksu plaadi vahel. Õhukesel plaadil on põkkõmbluse pealispinna ja alumise juurepinna temperatuuri erinevus väike. Jahtumisaeg  $t_{8/5}$  sõltub nii materjali paksusest kui ka soojussisestusest. Paksu plaadi korral, kui keevitatakse suhteliselt väikese soojussisestusega, on soojuslevi kolmemõõtmeline ja ei sõltu plaadi paksusest.

Kolmemõõtmelise soojuslevi korral kasutatakse jahtumisaja määramiseks järgmist valemit:

$$t_{8/5} = (6700 - 5T_0) \cdot Q_x \left( \frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F_3$$

kus  $T_0$  – ettekuumutustemperatuur, läbimitevaheline temperatuur,

$Q_x$  – soojussisestus kJ/mm,

$F_3$  – õmbluse kujutegur. Valitakse tabelist 3.1 ja on vahemikus 0,67–1,0.

Tabel 3.1

### Õmbluse kujuteguri väärtused

Keevisõmbluse tüüp	Skeem	Kujutegur	
		$F_2$ kahemõõtmeline soojuslevi	$F_3$ kolmemõõtmeline soojuslevi
pealekeevitatud		1	1
põkkõmbluse läbimid		0,9	0,9
sisemine nurkõmblus		0,9–0,67	0,67
ühe läbimiga nurkõmblus T-liites		0,45–0,67	0,67

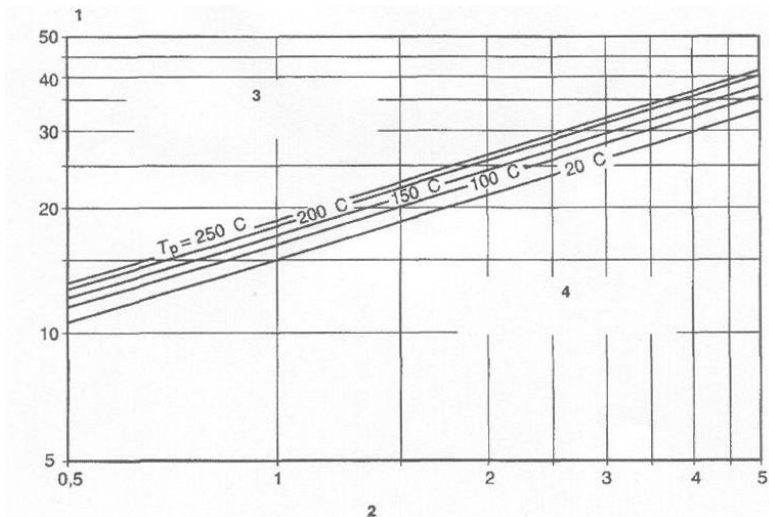
Kahemõõtmelise soojuslevi korral kasutatakse järgmist valemit:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3T_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \left[ \left( \frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left( \frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot F_2$$

kus:  $d$  – plaadi paksus mm;

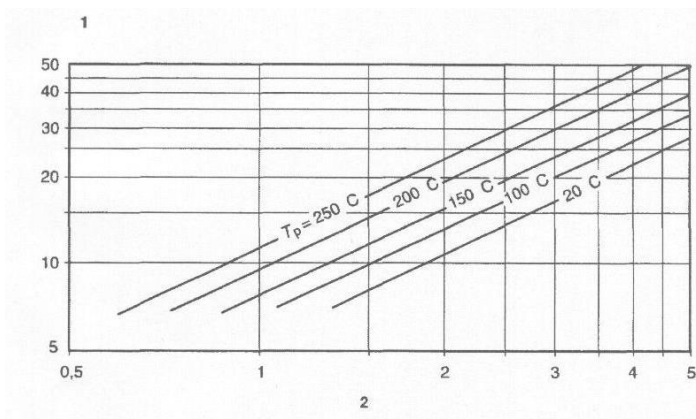
$F_2$  – õmbluse kujutegur.

Kahe- või kolmemõõtmelise soojusleviga juhtumi selgitamiseks kasutatakse graafikuid joonisel 3.9.



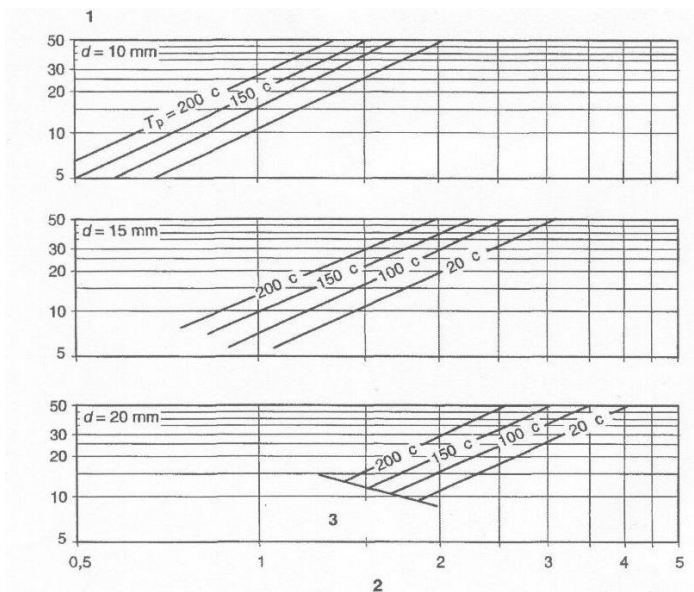
Joonis 3.9. Kriitilise materjali paksuse ja soojussisestuse vaheline seos: 1 – kriitiline materjali paksus  $d$  mm, 2 – sojussisestus kJ/mm, 3 – kolmemõõtmeline soojuslevi, 4 – kahemõõtmeline soojuslevi

Jahtumisaeg  $t_{8/5}$  mõlemal soojuslevi juhtumil määratakse graafikutelt joonisel 3.10 ja 3.11.



Joonis 3.10. Jahtumisaaja määramise graafikud kolmemõõtmelise soojuslevi korral sojussisestuse ja ettekuumutustemperatuuri  $T_p$  järgi: 1 – jahtumisaeg  $t_{8/5,s}$ ; 2 – sojussisestus kJ/mm





Joonis 3.11. Jahtumisaja määramise graafikud kahemõttelise soojuslevi korral soojussisestuse ja ettekuumutustemperatuuri  $T_p$  järgi: 1 – jahtumisaeg  $t_{8/5}$ , 2 – soojussisestus kJ/mm, 3 – kolmemõtteline soojuslevi

Paljud terasetootjad annavad tehnilistes tingimustes ette maksimaalse ja minimaalse jahtumisaja. Vaatleme terasest RAEX 500 ML plaadi paksusega  $d = 30$  mm keevitamist, kus tootekataloogis on antud maksimaalseks jahtumisajaks  $t_{8/5} = 25$  s. Oletame, et tegemist on kolmemõttelise soojusleviga. Kasutame ettekuumutust  $T_p = 100$  °C, jooniselt 3.9 saame, et vajalik soojussisestus peab olema  $Q = 3,6$  kJ/mm. Edasi kontrollime jooniselt 3.9, kas tegemist on ikka kolmemõttelise soojusleviga. Leitud punkt asetseb kõrgemal joonest  $T_p = 100$  °C ja on järelikult kolmemõttelise soojuslevi piirkonnas. Keevitame mitme läbimiga, kasutades MAG-keevitust kasuteguriga  $k = 0,85$  ja kujuteguriga  $F_3 = 0,9$ . Vajalik soojussisestus on  $\frac{3,6}{0,9} = 4,0$  kJ/mm. Vajalik keevitusenergia, mis rakendatakse keevituse vooluallikaga, on  $E = \frac{Q}{K} = \frac{4,0}{0,85} = 4,7$  kJ/mm. Sellist keevitusenergiat ei ole võimalik saada käsi-keevitusega, tuleks valida keevitus räubustis.

## Kokkuvõte

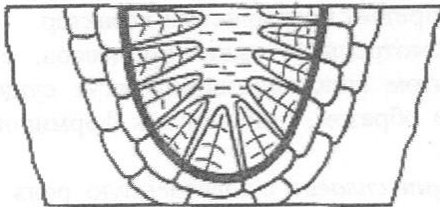
1. Keevitusvannis esinevad metallurgiaprotsessid on komplitseeritud ja võivad olla pooride ja räubesade defekti põhjuseks.
2. Keevismetallis lahustunud väikesed lämmastiku ja hapniku kogused võivad parandada keevisõmbluse mehaanilisi omadusi. Vesiniku mõju on negatiivne ja võib olla teatud tüüpi pragude tekkimise üheks põhjuseks.
3. Keevituselektroodidele mõjuvatest jõududest on olulisemad pindpinevus- ja elektrodünaamilised jõud, mis määravad elektroodimetalli siirdeviisi.
4. Keevitusvann on pidevas liikumises ja see mõjutab soojusülekannet keevituse soojusallikast põhimetallile ja keevisõmbluse ristlõiget ning kujudefektide teket.
5. TIG-keevitusel mängivad olulist rolli sulakeevitusvanni voolamise suunale metalli pindpinevusjõud, mis sõltuvad väga väikestest lisandite hulga muutustest sulamites ja võivad mõjutada tulemuste korratavust.
6. Keevitamisel räubustis võivad sulametalli keerised põhjustada räubesade defekte.
7. Keevituse soojussisestuse määramisel on vaja määrata soojuslevi tingimused ja arvesse võtta nii materjali paksust kui ka ettekuumutuse temperatuuri.

## 4. KEEVISLIITE STRUKTUUR JA OMADUSED

### 4.1. Keevismetalli struktuur ja keemiline koostis

Keevisõmbelse struktuur on sarnane valuploki omaga. Keevitusvanni tardumine algab osaliselt sulanud põhimetalli teradest keevitusvanni servadel ja kulgeb risti servadega katkendlikult kihtide kaupa ehk frontidena (joonis 4.1). Tekkinud sammaskristallid (*columnar*) on seda suuremad, mida suuremad on põhimetalli terad keevitusvanni eralduspinnal. Sammasstruktuur võib sõltuvalt jahtumistingimustest olla kõrgstruktuurne (*cellular*) või kõrgdendriitne või dendriitne (*dendrite*).

Mida parem on soojuse äravool ja väiksem keevitusvann, seda väiksem on kihtide paksus. Madalama sulamistemperatuuriga ühendid (oksiidid, sulfiidid, nitriidid) eralduvad õmbelse keskel, põhjustades dendriitset likvatsiooni ja teatud juhtudel kuumpragusid.



Joonis 4.1. Keevitusvanni tardumisel keevisõmbelses tekkiv struktuur

Keevismetalli mikrostruktuuri hindamiseks võib kasutada pidevjahtumise e CCT diagramme. Eristatakse ferriidi erinevaid vorme. Eelistatavaks tuleb lugeda nõelja (*acicular*) ferriidi teket õmbelusmetallis [19, 20].

Kõrgtugevate teraste keevismetalli mikrostruktuur võib olla beiniit-martensiitne, ferriit-perliitne või austeniitne. Et saavutada keevismetallile põhimetalliga võrdtugevust, oleks soovitatav saavutada beiniit-martensiitstruktuuri.

Mitmekihiliste keevisõmbeluste mikrostruktuur on läbimite lõikes erinev, kus rekristalliseerumise kaudu omandavad terad võrdtelgse kuju. Keevismetalli sammasstruktuure saab parandada võrdtelgsete terade tekitamise teel järgmiste võtetega:

- keevismetalli mikrolegeerimisega Ti, V, Nb, Zr,
- pindaktiivsete elementide lisamisega,
- termilise ja termomehaanilise töötusega.

#### Keevisõmbelse keemilise koostise ebahütlus

Keevisõmbelus on keemilise koostise osas ebahütlane, mis võib teatud juhtudel olla nn kuumpragude teket soodustavaks teguriks. Eristatakse keemiliste elementide mikrolikvatsiooni (*microsegregation*) ühe tera või dendriidi piires. Nii võib süsiniku või väevli sisaldus dendriitide servadel olla kuni kaks korda suurem kui keskel, mis võib oluliselt halvendada keevismetalli mehaanilisi omadusi. Ohtlikum on keemiliste elementide (C, S, P) makrolikvatsioon (*macrosegregation*) erinevate õmbelse osade vahel ja lisandite kontsentreerumine õmbelse keskele.

Keevismetalli keemiline koostis muutub keevitamise käigus tema pinnalt aurustuvate või väljapõlevate elementide kontsentratsiooni vähenemise tõttu. Nimetatud asjaolu tuleb näiteks

arvestada MAG-keevitusel, kus süsihappegaasis keevitades on õmbluses vähem C ja Mn võrreldes Ar + CO<sub>2</sub> segugaasis keevitades. Nimetatud asjaolu mõjutab ka keevisõmbluse tugevust.

### Keevismetalli keemilise koostise arvutamine

Keevismetalli keemiline koostis mõjutab liite omadusi ja seetõttu on vaja prognoosida selle keemilist koostist. Eriti tähtis on määrata keevismetalli keemiliste elementide sisaldust ja tekkivat mikrostruktuuri roostevabade jt kõrgeleegeritud teraste keevitamisel. Probleem on selles, et keevismetalli legerib ka põhimetall. Osa legerivaid elemente liigub põhimetallist keevismetalli, mistõttu keevisõmbluse metalli keemiline koostis erineb nii lisamaterjali kui ka põhimetalli omast. Nähtust nimetatakse segunemiseks – legerastmeks, segunemisastmeks (*dilution*).

Pealekeevitamise näitel väljendatakse segunemisastet järgmise seosega:

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

Sisuliselt näitab segunemisaste, kui suure osa moodustavad põhimetalli legerivad elemendid keevisõmbluse antud legeerelemendi sisaldusest.

Segunemisaste väärtus sõltub kasutatud keevitusprotsessist, õhupilust detailide vahel, pinna või juurelääbimi keevitamisest.

Praktikas opereeritakse järgnevate segunemisastme väärtustega erinevatel keevitusprotsessidel:

- elektrodkeevitus, käsikaarkeevitus (MMA, SMAW),  $\gamma_e = 0,15-0,25$ ;
- MIG/MAG-keevitus,  $\gamma_e = 0,25-0,4$ ;
- MIG/MAG-keevitus impulssvooluga,  $\gamma_e = 0,1-0,2$ ;
- TIG-keevitus lisametalliga,  $\gamma_e = 0,2-0,5$ ;
- keevitamine rääbustis (SAW),  $\gamma_e = 0,4-0,8$ .

Sageli kasutatakse keevisõmbluse keemilise koostise arvutustes segunemisastet 30% või 0,3. See tähendab, et keevismetalli mingi keemilise elemendi sisaldus koosneb 30% ulatuses põhimetalli omast, millele lisandub 70% lisametalli keemilise elemendi sisaldust.

Keevismetalli keemilise koostise arvutamine toimub järgmiselt:

keevisõmbluse keemilise elemendi sisaldus on  $R_k$ ,

elektroodi keemilise elemendi sisaldus on  $R_e$ ,

põhimetalli keemilise elemendi sisaldus on  $R_0$ .

$$R_k = R_0\chi + (1 - \chi) \cdot R_e \%,$$

kus  $\chi$  – põhimetalli osakaal õmbluse metallis (*dilution*), võetakse sageli 0,3.

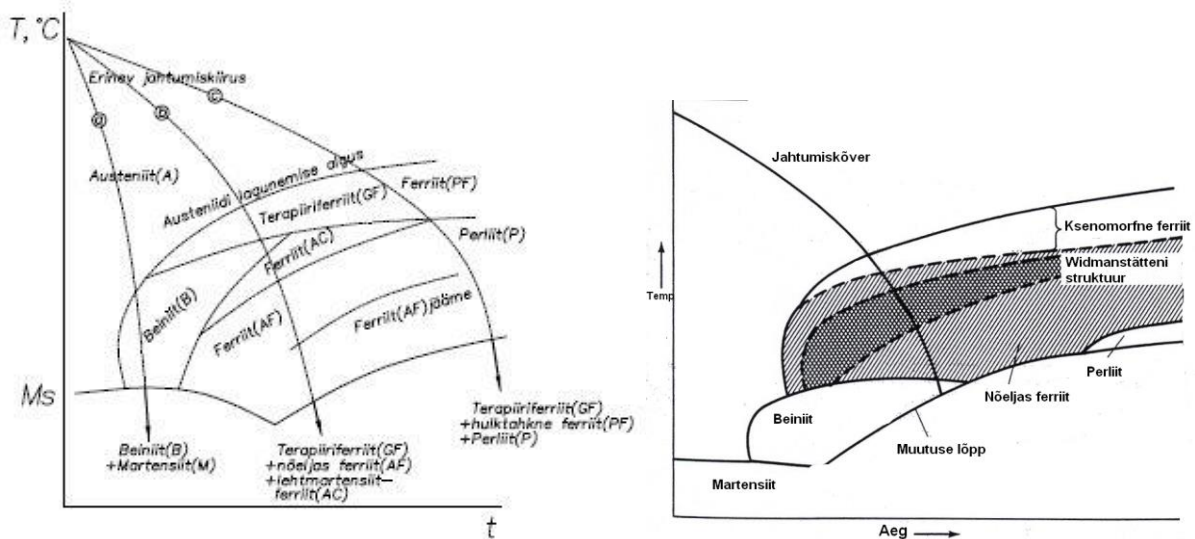
$1-\chi$  – elektrodmetalli üleminekutegur võetakse 0,7.

Selle valemiga on võimalik määrata keevisõmbluse ligikaudset keemilist koostist (legeerelementide sisaldust) või vajaliku keevitustraadi keemilist koostist. Vaatleme juhtumit, kui keevitatakse madallegeerterast margiga 20Ni Cr Mo2, mida iseloomustab järgmine keskmine legeerelementide sisaldus: Ni = 0,55%, Cr = 0,5%, Mo = 0,2%.

Keevitatakse austeniitse elektroodiga koostisega 19% Cr, 10% Ni. Keevismetalli prognoositav legeerelementide sisaldus arvutuste järgi tuleb järgmine: Cr = 14,8%, Ni = 7,1%, Mo = 0,06%.

## 4.2. Keevismetalli mikrostruktuur ja selle juhtimine

Keevismetalli tõmbetugevus ja löögisitkus on määratud tema keemilise koostise ja jahtumisaajaga  $t_{8/5}$ . Probleem on selles, et sageli keevismetalli tõmbetugevuse kasvades selle löögisitkus ei kasva, aga võib ka väheneda. Löögisitkust on võimalik parandada juhul, kui optimaalse termotsükli tagajärjel tekib põhiliselt nõeljas (*acicular*) ferriit [19]. Keevismetalli mikrostruktuuride osas kasutatakse rahvusvahelise keevitusinstituudi IIW liigitust, kus on esitatud ferriidi erinevad modifitseeringud [20], mis erinevad TMT struktuuridest.



Joonis 4.2. Põhimõttelised CCT-diagrammid keevismetallile: a – kiire jahtumine,  $t_{8/5}$  alla 5s, b – normaalne jahtumine,  $t_{8/5} = 10-20$  s, c – aeglane jahtumine,  $t_{8/5} > 100$  s

Kiirel jahtumisel (a), kui keevituse soojussisestus  $Q_e$  on väike ja/või materjali paksus suur, siis tekib martensiidne ja beiniitne struktuur. Nimetatud struktuur on kõige suurema tugevusega ja kõvadusega. Aeglasel jahtumisel (c), kui tegemist on suure  $Q_e$  või materjali paksusega, tekib hulktahkne ferriit ja perliit. Optimaalseks tuleb lugeda jahtumiskõverat (b), kus tekib põhiliselt nõeljas ferriit, millel on suurim löögisitkus ja tugevus.

Siit järeldub, et keevituse ajal tuleb kontrollida jahtumisaega ja selle kaudu juhtida keevismetalli mikrostruktuuri soovitud suunas. Mida suurem on keevitatava terase tugevus, seda kitsamates piirides tuleb hoida jahtumiskiirust. Liiga väike jahtumisaeg kutsub esile karastusefekti ja vesinikpragude tekke ohu, liiga suur halvendab löögisitkust.

Suurim löögisitkus saavutatakse, kui keevismetall koosneb põhiliselt nõeljas ferriidist. Keevituse soojussisestuse kasvul nõelja ferriidi hulk väheneb ja järelikult löögisitkus halveneb, mistõttu liiga suurte soojussisestuste kasutamine kõrgetootlike protsesside korral võib

kutsuda esile probleeme. Keevismetalli keemilist koostist saavad juhtida keevismetalli leegerimisega Mn, Ni, Mo, mis soodustavad peeneteralise nõelja ferriidi teket. Sama mõju avaldavad ka B ja Ti.

Keevismetalli voolavuspiir ja mikrostruktuurid on omavahelises seoses. Tavaterastel – voolavuspiiriga kuni  $500 \text{ N/mm}^2$  on keevismetalli struktuur järgmine: eeleutekoidne ehk terapiirne ferriit, lehtmartensiitne ferriit, nõeljas ferriit. Võivad tekkida veel sammaskristallid, Widmānstattēni plaatja struktuuriga ferriit. Vältida tuleb jämedateralise ferriidi teket. Tugevamad terased  $R_e > 500 \text{ N/mm}^2$  on järgmise mikrostruktuuriga: nõeljas ferriit, beiniit, martensiit. Eristatakse alumist beiniiti, kus C on difundeerunud terade sisse kihtidena, ja ülemist, kus süsinik on terade vahel.

Eeltoodust järeldub, et soovitava keevismetalli mikrostruktuuri saamiseks on vaja kontrollida jahtumisaega  $t_{8/5}$ , mis sõltub:

- soojussisestusest  $Q_e$  kJ/mm,
- materjali paksusest  $t$ , sageli tähistatud  $d$ ,
- eelkuumutuse temperatuurist  $T_p$ ,
- läbimitevahelisest temperatuurist  $T_i$ .

Analüüsime keevitustraadi või elektroodivarda keemilise koostise mõju keevismetalli omadustele.

**C** – sisaldus võimalikult madal ( $<0,1\%$ ), millega välditakse vesinikpragude ehk külmpragude teket. Mida tugevam keevismetall, seda vähem süsinikku on lisametallis.

**Mn** – desoksüdeerija, on alati lisametallis. Tõstab  $R_m$ , KV paraneb kuni koostiseni 1,4–1,5% Mn. Soodustab nõelja ferriidi teket.

**Si** – desoksüdeerija, väldib pooride teket ja parandab keevismetalli voolavust. Tõstab  $R_m$ , vähendab KV, seetõttu on piiratud sisaldus 0,2–0,3%. Erandiks on Vene kõrgtugevate teraste keevituselektroodid, mis sisaldavad 0,55–0,7% Si ja mõned MAG-keevitustraadid, kus on 0,7–0,8% Si. Rübustis keevitamisel suure kiirusega on soovitatav traadi kõrgem Si sisaldus.

**Ni** – ei mõjuta  $R_m$ , kuid tõstab KV. Sisaldusel 1–13% paraneb korrosioonikindlus. Kui traat on Ni legeritud, siis vähendatakse Mn sisaldust. Kõrgtugevatel teraste keevitamisel kasutatakse Ni-Mo või Ni-Cr-Mo legeritud lisametalli.

**Mo** – kuni 0,3–0,5% parandab KV. Kasutatakse keevitamisel rübustis (SAW), kus keevitatakse suure soojussisestusega ja 1- või 2-läbimiga.

**Cr** – tõstab  $R_m$ , kuid vähendab KV. Kasutatakse tavaliselt koos Cr-Mo.

#### Mikrolegeerelemendid

**B** – annab nõelja ferriidi, piirab terakasvu. Sobib kõrgetele soojussisestustele –  $Q_e$  tavaliselt koos Ti, näiteks täidistraadis.

**Ti** – väikestes kogustes soodustab nõelja ferriidi teket, sisaldus kuni 30–200‰.

**Nb** – satub keevismetalli põhimetallist ja tõstab  $R_m$ , kuid vähendab keevismetalli KV.

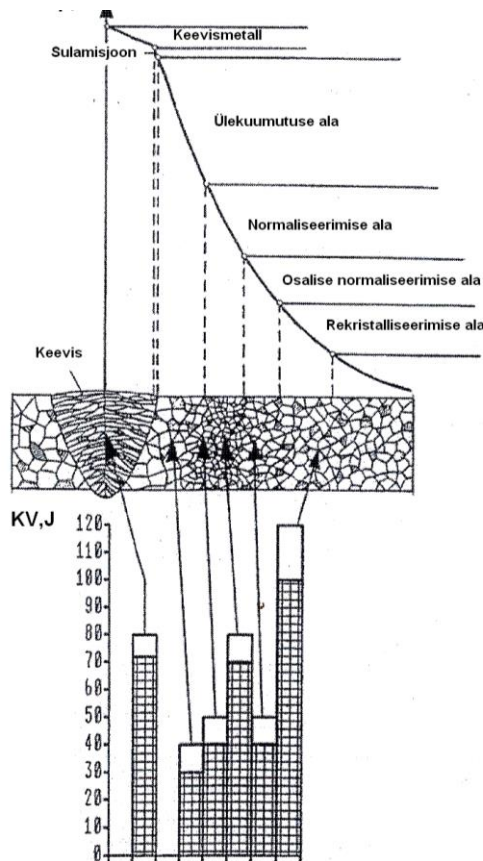
**Al** – satub keevismetalli põhimetallist, vähendab KV.

#### Gaaside mõju

**O** – halvendab tavaliselt KV. Väikestes kogustes isegi kasulik, kus on kristalliseerumistsentrite algeks. Optimaalne sisaldus 250–350‰. Tähtis hoida sisaldus kontrolli all juhtudel, kui nõutakse keevismetallilt suurt löögisitkust madalatel miinustemperatuuridel.

### 4.3. Termomõjutsooni struktuur ja omadused

Keevisliite mehaanilistele omadustele avaldab tugevat mõju keevisõmbluse lähiala, nn *termomõjutsooni* – TMT (*heat affected zone HAZ*) mikrostruktuur ja mehaanilised omadused (joonis 4.4).



Joonis 4.4. Termomõjutsooni alade löögisiskus

Eristatakse järgmise mikrostruktuuriga alasid e vööndeid:

**Kokkusulamis- e segunemisala** (*solid-liquid transition zone*), aga ka osalise sulamise vöönd põhimetallis, paksusega mõnest mikromeetrist kuni 0,4 mm. Juhul kui selles alas ei ole esinenud kokkusulamist e metallilise sideme tekkimist, näiteks oksiidikelme või ebapiisava soojussisestuse tõttu, siis konstruktsioon kaotab tugevuse.

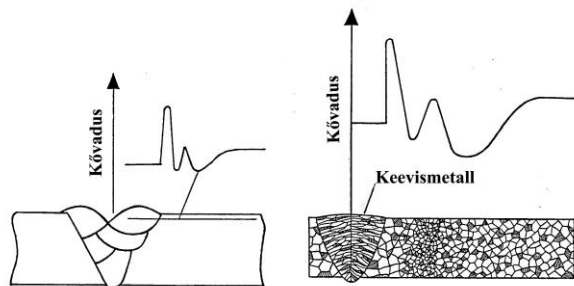
Ülekuumutuse ala (1100...1450 °C) (*coarse-grained region, overheated zone*), kus kuumutamisel tekib jämedateraline austeniit, mis faasilisel ümberkristalliseerumisel võib anda 12–16-kordselt jämedateralisema struktuuri. Järsult väheneb löögisiskus. Loetakse sageli kõige kriitilisemaks alaks keevisliites.

**Normaliseerimisala** (*fine grain region*), sõltuvalt terase margist, ala temperatuurist ja kuumutusajast võib tekkida põhimetallist suurema tugevusega ala.

**Osalise normaliseerimise e rekristalliseerumise ala** (*partially transformed region, intercritical region*). Kõrvuti põhimetalli kristallidega erinevad rekristalliseerunud terad. Iseloomustab väike löögisiskus

**Sinihapruse ala** (*tempered zone*) (200...400 °C), kuumutamise toimel on üleküllastunud tardlahusest eraldunud peeneteralised nitiidid ja karbiidid. Selles alas kasvab terase tõmbetugevus ja kahaneb tunduvalt löögisiskus.

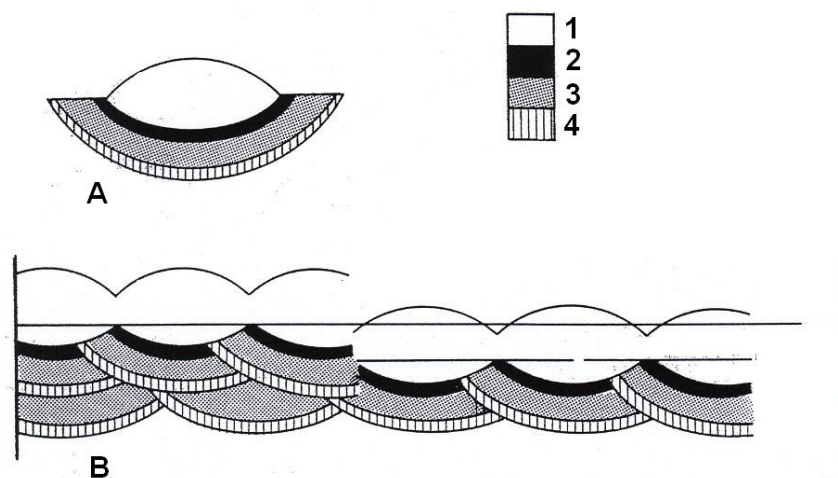
Tuleb märkida, et vaatamata jämedateralisele nn Widmānstattēni struktuurile on keevismetallil suur löögisiskus. Kõige halvemaid mehaanilisi omadusi näitavad tera kasvu ja osalise rekristalliseerumise alad. Keevituse soojussisestuse suurendades kasvab nende alade laius ja väheneb löögisiskus. Karastuvate teraste keevitamisel võib tekkida kiirel jahtumisel martensiidne struktuur, mis võib viia vesinikpragude tekkimisele. Karastusefekti mõjul kasvab kõvadus, mida on võimalik näiteks Weldox- ja Hardox-tüüpi teraste korral vähendada optimaalse mitme läbimiga keevitamisega [21], kusjuures viimane läbim noolutab karastunud ala (joonis 4.5).



Joonis 4.5. Kulumiskindla terase Hardox-tüüpi liite kõvaduse jaotus

#### Mitme läbimiga keevitatud keevisõmbluse mikrostruktuur

Mitme läbimiga keevitatud e mitmekihiliste keevisõmbluste mikrostruktuur erineb oluliselt ühekihilisest keevisõmblusest, kus iga järgnevalt keevitatud keevisläbimi soojuse abil toimub eelnevate kihtide termotöötlus (vt joonis 4.6). Igast eelnevast läbimist ca 40...50% kuumeneb üle  $Ac_3$  ja tekib normaliseeritud struktuur. Eelnevates läbimites eemalduvad metalli kahanemisest tingitud sisepinged, aga ka õmblusesse difundeerunud vesinik. Mitme läbimiga keevitus tähendab praktikas seda, et keevitatakse suhteliselt väikese soojussisestusega ja kaotatakse tootlikkuses, kuid võidetakse liite kvaliteedis ja saadakse keevistoote väiksemad kujumuutused e deformatsioonid.



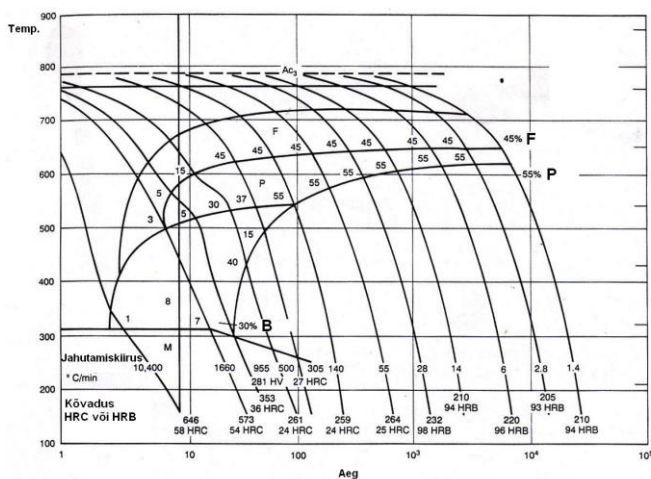
Joonis 4.6. Ühe läbimiga (A) ja mitme läbimiga (B) keevitatud keevisliite struktuurid: 1 – keevismetall, 2 – ülekuumutuse ala, jämetaala, 3 – normaliseerimisala, peenteraala, 4 – osalise rekristalliseerumise ala



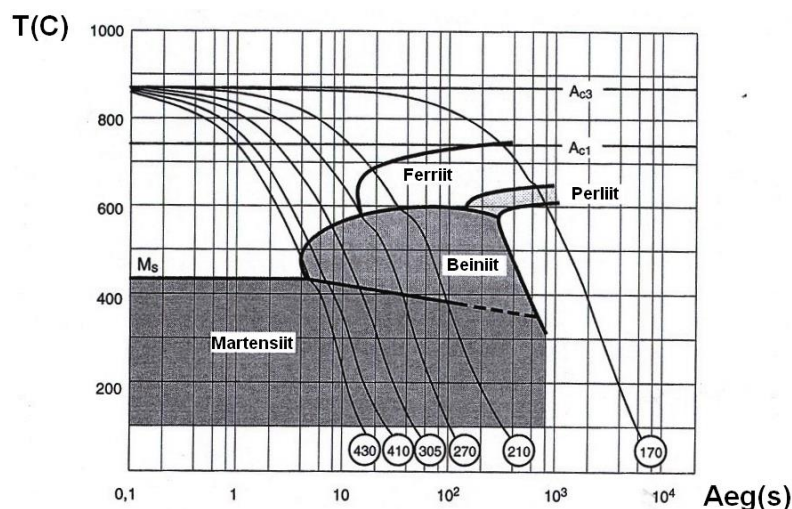
Ühe läbimiga keevitades tekib keevismetalli kõrval jämedateraline ala. Järgneva läbimi keevitamisel tera suurus selles alas väheneb ja jämedateralise ala osatähtsus termomõjutsooni ruumalas väheneb.

Keevisõmbeluse metalli ja termomõjutsooni mikrostruktuuri prognoosimiseks ja juhtimiseks kasutatakse keevitustehnoloogias **pidevjahtumise C kõveraid e diagramme (CCT)**, mis mõnevõrra erinevad isothermilise jahtumise diagrammidest (TTT) ja kehtivad ainult kindla keemilise koostisega teraste jaoks. Erinevalt isothermistest diagrammidest arvestatakse paremini reaalseid jahtumistingimusi keevisliites, eriti just mitme läbimiga keevitamisel. Diagrammidel on toodud erinevad jahtumiskõverad ja nende abil saab määrata prognoositavat mikrostruktuuri. Keevisliidete kõvaduse mõõtmise kaudu saab praktikas hinnata võimalike karastusstruktuuride teket. Keevitusprotseduuri atesteerimise katsel EN ISO 15614-1 järgi loetakse ühe läbimiga keevitamisel TMT kõvadust HV 380 juba ülemääraseks ja on vaja teha ettekuumutust või suurendada soojussisestust.

Mitme läbimiga keevitades on kõvaduse kriitiline väärtus 320 HV. CCT-diagrammide abil saab määrata ettekuumutuse temperatuuri, mis peab olema kõrgem martensiidi moodustumise lõpptemperatuurist. Joonisel 4.7 ja 4.8 on toodud CCT-diagrammide näited erinevate teraste jaoks.



Joonis 4.7. CCT-diagramm, terase mark AISI 1541(0,39% C,1,5% Mn)



Joonis 4.8. CCT-diagramm, terase mark St E 355 [7]

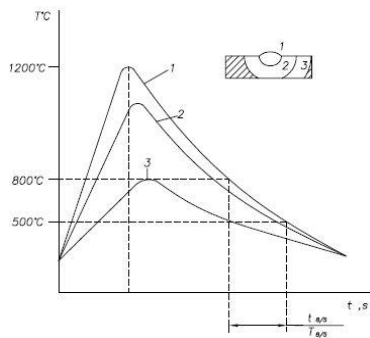


#### 4.4. Keevituse termotsükkel ja jahtumisaja mõju

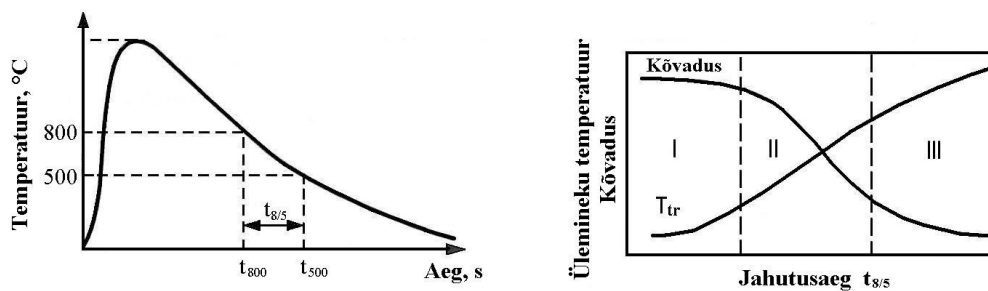
Keevitamisel ühe läbimiga liigub soojusallikas piki keevisõmblust ja koos allikaga seda ümbritsev temperatuuriväli. Temperatuur keevistoote erinevates punktides muutub pidevalt (vt joonis 4.9). Algul temperatuur kasvab ja saavutab maksimaalse väärtuse ja seejärel langeb. Keevistoote mingi keevisõmbluse lähiala punkti temperatuuri sõltuvust ajast nimetatakse keevituse termotsükliks.

Keevisliidete omadused sõltuvad põhiliselt keevituse termotsükli maksimaalsest temperatuurist ning jahtumiskiirusest.

Keevisliite omadused ja lähiala struktuur sõltuvad suurel määral jahtumiskiirusest vahemikus 800 kuni 500 °C, mida hinnatakse jahtumisajaga selles vahemikus ja tähistatakse kirjanduses  $t_{8/5}$  või  $\tau_{8/5}$  (vt joonis 4.10). Sellist lähenemist kutsutakse keevitustehnoloogias  $t_{8/5}$  kontseptsiooniks. Väikese jahtumisaja korral iseloomustab TMT suur kõvadus ja madal külmhapruse piir lõõgisitkusele, karastuvate teraste korral karastusefekt. Aeglasel jahtumisel väheneb kõvadus ja võib esineda tera kasv. Nõutavate keevisliite mehaaniliste omaduste saavutamiseks on vaja, et jahtumisaeg oleks optimaalne.

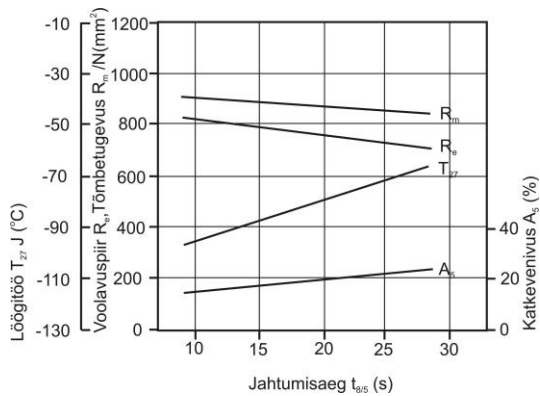


Joonis 4.9. Keevisõmbluse erinevate alade jahtumiskõverad



Joonis 4.10. Keevisõmbluse jahtumiskõver ja kriitiline jahtumisaja piirkond 800–500°C ning jahtumisaja mõju termomõjutsooni kõvadusele ja külmhapruse piirile

Jahtumisaja mõju keevismetalli mehaanilistele omadustele iseloomustavad graafikud joonisel 4.11 [6].



Joonis 4.11. Jahtumisaega mõju kõrgtugeva terase keevismetalli mehaanilistele omadustele

Keevitusparameetrite määramisel on soovitatav hoida jahtumisaega optimaalsetes piirides. Standard EN 1011-2 annab soovitusi teraste jahtumisaegadele, mis on 10–25 s piirides.

Mõnede terasetootjate (Ruukki, SSAB, Thyssen Krupp) soovitusel jahtumisaegade osas on toodud tabelis 4.1.

Tabel. 4.1

Soovitatavad jahtumisaegade  $t_{8/5}$  piirid

Terase mark. Tootja	min $t_{8/5}$ , s	max $t_{8/5}$ , s
S355J2G3 (Ruukki)	5	30
S355J2G3 (Thyssen)	5	40
Emox 355 (SSAB)	2	50
Weldox 420 (SSAB)	3	40
Weldox 700 (SSAB)	5	25
Weldox 960 (SSAB)	5	15
XABO 890-960	6	20

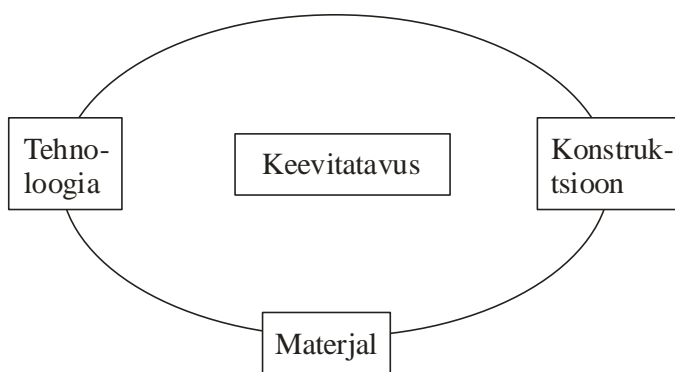
## Kokkuvõte

1. Keevismetalli ligikaudset keemilist koostist on võimalik arvutada, kusjuures tavaliselt lähtutakse eeldusest, et 70% keemilistest elementidest siirdub keevitusvani elektroodist.
2. Keevismetalli mehaanilisi omadusi on võimalik juhtida sobiva mikrostruktuuri saavutamiseks. Seejuures tähtsaks osutuvad legerielemendid keevismetallis ja jahtumiskiirus.
3. Termomõjutsoon on ebahühtlane nii struktuuri kui ka mehaaniliste omaduste osas. Eristatakse väiksema tugevusega alasid, mille laius sõltub keevituse soojussisestusest. Võimalik on karastusstruktuuride teke, mille tekkimise tõenäosust saab hinnata CCT-diagrammide abil ja kõvaduse mõõtmisega.
4. Keevituse termotsüklist ja jahtumisaegast 800 kuni 500 °C olenevad paljuski keevisliite mehaanilised omadused.

## 5. METALLIDE KEEVITATAVUS

### 5.1. Keevitatavuse mõiste ja kriteeriumid

Keevitatavuse (*weldability*) mõiste on keeruline kompleksmõiste ja on ajas läbi teinud suuri muutusi. Kui varasemalt vaadeldi keevitatavust seoses vajadusega kasutada ettekuumutust teatud liiki pragude vältimiseks: hea keevitatavus oli ilma detailide ettekuumutusega, rahuldav madala ettekuumutusega jne, siis tänapäeval kasutatakse laiendatud käsitlust, kus vaadeldakse nii põhimetalli keevitatavust e võimet moodustada kvaliteetne keevisliide kui ka konstruktiivset sobivust keevitamiseks (jäik konstruktsioon, ligipääsetavus jm) ja keevitusprotsessi kasutamiskõlblikkust selle materjali liitmiseks (joonis 5.1).



Joonis 5.1 Keevitatavust mõjutavad tegurid

Üldiselt käsitletakse ainult põhimaterjali keevitatavussomadusi e keevitatavust, kuid ei ole korrektne käsitleda seda omadust eraldi ülejäänutest. Materjal sobib keevitamiseks, kui teda saab keevitada füüsiliselt, metallurgiliselt ja keemiliselt sobiva keevitusprotsessiga ning täidetakse keevisliitele esitatud nõuded. Hea materjali korral saab keevitada ilma erilist hoolt kandmata keevisliite omaduste halvenemise või keevitusdefektide tekkega keevisliites.

Keevitatavus on seda parem, mida vähem tähelepanu tuleb pöörata materjalide ettevalmistamisele ja puhtusele, ettekuumutusele, eriliste kaitsegaaside kasutamisele, järeltermotöötusele, erilistele puhtusenõuetele töö tegemisel jm.

Keevitatavust saab hinnata teatud probleemide vältimise kaudu e kriteeriumite abil, mis võivad mõjutada keevisliite kvaliteeti ja on põhiliselt toodud defektidena joonisel 1.3.

Eeltoodust võib järeldada, et metallide keevitatavus võib teatud tingimustes olla halb ja teistes tingimustes rahuldav. On seatud teatud piirid, mille sees saab toota rahuldavate keevitatavusomadustega keeviskonstruktsioone. Kui need piirid on laiad, siis väidetakse, et keevitatavus on hea. Kui need piirid on kitsad, siis on keevitatavus halb. Kui keevitamisel tuleb rakendada erakorralisi tingimusi, siis võidakse seda materjali lugeda ka mittekeevitatavaks. Seejuures võidakse ühe ja sama metalli või sulami keevitatavust lugeda ühtedes tööstusharudes halvaks ja teistes tööstusharudes ning tingimustes rahuldavaks. Viimase juhul tuleb täita rangeid keevitusprotseduuride nõudeid, kasutada ranget kontrolli ja aksepteerimise nõudeid.

Üldjuhul on süsinikteraste keevitatavuse hinnang seotud ebasoovitavate mikrostruktuuride, nagu martensiit, tekkega termomõjutsoonis (TMT), mida saab kontrollida kõvaduse mõõtmiste kaudu.

Keevitatavust saab hinnata teatud kriteeriumite abil, mis võivad tekitada probleeme keevisliites või konstruktsioonis.

### Keevitatavuse kriteeriumid e tingimused

Nii uuemas keevitusalas kirjanuduses kui ka standardites kasutatakse vähem klassikalist keevitatavuse mõistet, kuid vaadeldakse neid tingimusi, mis võivad viia keevisliite kvaliteedi halvenemiseni. Kui varem kutsuti neid keevitatavuse kriteeriumiteks, siis standardis EN1011-1 tähistatakse neid terminiga "keevitatavuse tingimused" (*weldability conditions*). Keevitatavuse seisukohast lähtudes tuleb arvesse võtta järgmisi tingimusi:

- vesinikpragude tekkimine,
- termomõjutsooni (TMT) sitkus ja kõvadus,
- tardumispragude tekkimine,
- lamellaarpragude tekkimine,
- korrosioon.

Märgitakse, et teraste keevitamisel võivad TMT kõvaduse ja sitkuse muutused suurel määral mõjutada liite omadusi, mis sõltuvad suurel määral keevitatavuse tingimustest.

Soojusenergeetika seadmete korral tuleb veel lisaks arvestada korduvkuumutuse pragude-kindlusega e kalduvusega *korduvkuumutuspragudele*.

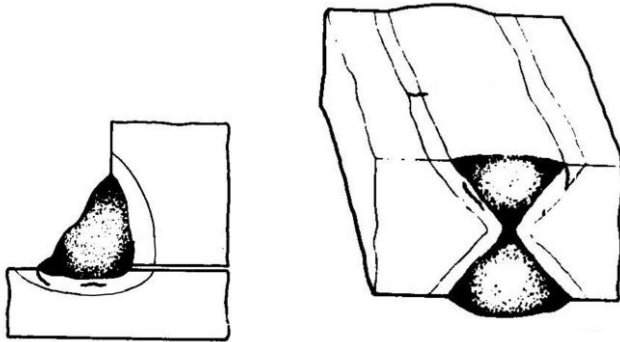
Keevitatavuse määramise meetodid liigitatakse kahte rühma. Esimese rühma kuuluvad **kaudsed meetodid**, kus kalduvust pragunemisele määratakse arvutuslikul teel, võttes arvesse materjalide keemilist koostist. Saadud arvutuslikke parameetreid võrreldakse etteantud kriitiliste väärtustega. Teise kuuluvad **otsesed e katselised meetodid**, kus keevitatavus määratakse kindla kujuga proovikehade keevitamisega või viiakse läbi keevisliidete või keevitatavate materjalide katsetamine erimasinatega oludes, mis imiteerivad keevitusprotsessi mõju keevisõmblusele ja termilise mõju tsoonile.

## 5.2. Vesinikpraod ja nende vältimine

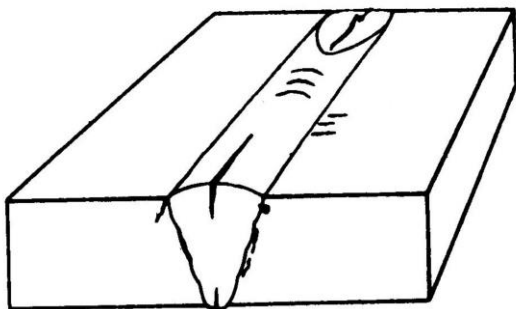
1920.–1930. aastatel avastati, et laevade ja survemahutite valmistamisel on madallegeerterased vähem sobivad keevistoodete valmistamiseks kui madalsüsinikterased. Täheledatai nii sildade kui ka laevade habrast purunemist. Keevisliidete purunemise probleem kerkis teravamalt esile II maailmasõja ajal USAs, kus evitati Liberty-tüüpi laevade saritootmine kolmest ja enamast seksioonist kokkukeevitamise teel. Mõnede laevade puhul avastati pärast vettelaskmist juba ilma koormamata kere purunemist mitmeks osaks keevisliidetest [17]. Probleemiga hakati põhjalikumalt tegelema. Leiti, et habras purunemine on tingitud külmpragudest ja sõltub terase keemilisest koostisest. Märgati, et enamasti halvenes terase keevitatavus süsinikusisalduse või legeerelementide sisalduse kasvades. Keemilise koostise mõju pragude tekkimisel saab hinnata terase süsinikekvivalendi väärtuste kaudu. Juba 1942. a avaldati Inglismaal esimene terase süsinikekvivalendi arvutamise valem. Täheledatai, et purunenud liidete murdepind oli hele ja puudusid oksüdeerimise jäljed, mis viitas madalale temperatuurile pragude tekkel. Seetõttu hakati neid pragusid kutsuma külmpragudeks (*cold cracks*). Hilisemad uuringud näitasid, et nimetatud pragude tekkimist on suuresti mõjutanud vesinik, ja siis hakati kutsuma neid vesinikpragudeks. Vesinikpraod on tuntud ingliskeelses kirjanduses erinevate nimetuste all: *hydrogen crack*, *hydrogen induced crack* – HIC, *hydrogen assisted crack* – HAC, *cold crack*, *hardening crack*, *delayed crack*. Sõltuvalt prao asukohast keevisliites on tuntud veel läbimialune pragu (*underbead crack*), sisselõikepragu (*toe crack*)

ja juurepragu (*root crack*). Üldmõistena kasutatakse terminit vesinikpragunemine (*hydrogen cracking*), kuna pragude tekkimist mõjutab vesiniku difusioon termomõjutsooni. Vesinikpraod võivad tekkida süsinik- ja madallegeerteraste, aga ka roostevabade martensiitteraste keevisõmbluste kõrval termomõjutsoonis. Kõrgtugevate teraste, näiteks termomehaaniliselt valtsitud TMCP-teraste keevitamisel on täheldatud keevisõmbluse pikiteljega risti olevaid pragusid. Neid pragusid on raske avastada õmbluste ristlõike makroliihvidel. Sellised praod võivad esineda terastel voolavuspiiriga  $R_e > 500$  MPa või tõmbetugevusega üle 600 MPa.

Vesinikpraod tekivad terase martensiitse muutuse temperatuurist madalamal (põhiliselt 150–200 °C).



Joonis 5.1. Vesinikpraod keevisliites



Joonis 5.2. Vesinik- ja kuumpraod keevisliites

### Vesinikpragude tekkimise põhjusteks on:

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

Praod tekivad, kui kõik kolm eelnimetatud tegurit esinevad üheaegselt. Nii ei tekiks pragusid, kui puuduksid keevistootes jääkpinged ja ei esineks nii martensiitset struktuuri kui ka vesiniku suurendatud sisaldust. Omakorda suured jääkpinged ei põhjustaks pragude teket, kui ei oleks martensiitset struktuuri.

Pragude tekkele TMT võib eelneeda inkubatsiooniperiood, mis on seotud vesiniku difusiooni kiirusega metallis. Praod võivad tekkida isegi kaks ööpäeva (48 tundi) pärast keevitamist. Seetõttu näevad mõned standardid, näiteks survemahutite valmistamisel, ette mittepurustavat kontrolli pärast keevitamist õhemal teraslehel vähemalt 16 tunni pärast, paksemal lehel 40 tunni pärast.

## Vesiniku difusioon

Vesinik satub keevismetalli vesinikku sisaldavate ühendite lagunemisel keevituskaare kuumuses. Vesinikku on vee või niiskuse kujul lisamaterjalides, näiteks elektrodikatetes, keevitustraadidel, aga ka õmbluse servade oksiidikihtides. Keevitamine võib toimuda suure niiskusega keskkonnas. Sulas keevismetallis lahustub tuhandeid kordi rohkem vesinikku kui toatemperatuuril. Vesinik lahustub termomõjutsooni kõrval olevas austeniidi alas kümneid kordi rohkem kui hiljem tekkivas ferriidis. Keevitamise lõppedes jahtub keevismetall kiiresti ja vesinik ei jõua eralduda, vaid difundeerub termomõjutsooni. Vesinik koguneb kolme-mõõtmelises pingeolukorras olevatesse mikropragudesse ja gaasi survele need laienevad. Juhul kui keevitamisel kasutatakse detailide ettekuumutust, on soovitatav seda jätkata näiteks temperatuuril 150 °C 2–3 tunni jooksul pärast keevitamise lõpetamist. Nii eemaldatakse vesinik keevisliitest.

## Karastusnähtused keevitamisel ja vesinikpraod

Keevitamisel TMT kuumutatakse terase karastustemperatuurini ja siis järgneb kiire jahtumine. Liitest kaugemale jääv ala jääb suhteliselt külmaks ja hea soojusjuhtivuse tõttu võib see ala jahtudes piisavalt suure kiirusega ka TMT jahutada. Eelduseks on, et jahtumiskiirus ületaks kriitilist. Kiire jahtumine esineb õhukese materjali keevitamisel miinustemperatuuridel, aga ka paksu terasplaadi korral toatemperatuuril.

Karastusefekt keevitamisel sõltub ka keskkonna temperatuurist. Madalamatel temperatuuridel nõutakse ettekuumutuse kasutamist. Survemahutite valmistamisel juhindutakse standardist EN13445-4, kus lubatakse keevitada ferriitteraseid temperatuuridel üle +5 °C ilma ettekuumutust kasutamata. Sama piir on ette nähtud ka teraskonstruksioonide valmistamise standardis EN 1090-2. Karastusnähtusi saab vähendada jahtumiskiiruse vähendamisega, mida saab realiseerida kas detailide ettekuumutusega, näiteks gaaskeevituse põletitega, või keevituse soojussisustuse suurendamisega.

Karastusefekti suurus sõltub terase keemilisest koostisest ja jahtumiskiirusest. Mida suurem on terase süsinikusisaldus ja legeerelementide sisaldus, seda suurem on karastusefekt. Süsinikterased karastuvad alates süsinikusisaldusest 0,25% ja samal ajal hakkavad tekkima ka praod TMT. Karastusvõimet seostatuna terase legeerelementide sisaldusega on võimalik hinnata süsinikekvivalendi valemi abil. Kasutusel on väga erinevaid valemeid. Terasse karastuse määra on võimalik hinnata TMT kõvaduse mõõtmistega. Tavaterastes võetakse minimaalseks kõvaduseks 350–380 HV10 ühe läbimiga keevitamisel (standard EN ISO 15614-1). Tuleb mainida, et uutest kõrgtugevates termomehaaniliselt töödeldud terastes on avastatud vesinikpraod ka kõvadustel alla 300 HV. Eeltoodust järeldub, et õmbluse kõrvalala kõvaduse mõõtmistega võime hinnata võimalike vesinikpragude tekke tõenäosust. Ühtlasi tuleb arvutuslike meetoditega hinnata ettekuumutuse vajadust. Kirjanduses märgitakse, et vesinikpragude tekke seisukohalt on tähtis, et martensiidi kogus ei ületaks 30%.

### **Ilma ettekuumutusega võib keevitada teraseid, mille:**

- 1) voolavuspiir  $R_e < 360$  MPa või
- 2) tõmbetugevus  $R_m < 500$  MPa
- 3) teraslehe paksus on alla 25–30 mm

## Teraste vesinikpragudekindluse hindamise arvutuslikud meetodid

Teraste keevitatavuse hindamiseks kasutatakse süsinikekvivalendi mõistet, kus terases olevad keemilised elemendid tinglikult justkui suurendaksid terase süsinikusisaldust. Kasutatakse

erinevaid ekvivalendi valemideid, kus keemilise elemendi sisaldus massiprotsentides terases jagatakse läbi valemis toodud teguriga, mis on määratud katseliselt. Süsinikekvivalendi (*carbon equivalent*) arvutamiseks kasutatakse erinevaid valemideid ja lühendeid: CE, CE<sub>IW</sub>, CE<sub>IW</sub>, CEV, C<sub>ekv</sub>, C<sub>ea</sub>, CEN, CET, P<sub>em</sub>.

Rahvusvaheliselt aktsepteeritav süsinikekvivalendi valem pakuti välja juba 1974. a Briti standardis BS 5135, mis on kasutusel nii rahvusvahelise keevitusinstituudis IIW kui ka standardimisorganisatsioonis ISO, samuti toodud standardis EVS EN 1011-2 ja on järgmine:

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

Põhjamaades [7] soovitatakse rakendada valemit terastele  $C \geq 0,18\%$  ja jahutusaegadel  $t_{8/5} > 12$  sekundit. Kui  $CE < 0,41$ , saab keevitada kõigi kaarkeevitusprotsessidega. Kui  $CE > 0,41 \dots 0,45$ , tuleb kasutada B kattega elektroode, MAG-keevitust ja nii vältida vesiniku sattumist keevisõmblusesse.

Eelnimetatud valemi kasutamisel ei arvestata otseselt keevituse tehnoloogilist parameetrit – soojussisestust, mistõttu saab seda rakendada keevitatavuse orienteeruvaks hindamiseks.

Suurte reservatsioonidega võib süsinikekvivalenti nimetada teraste keevitatavuse näitajaks, kuna see ei ole rakendatav kõigile terasemarkidele ja selle juures ei arvestata toote jahtumiskiirust. Näiteks Vene teraste 14G, 16GS, 09G2S, 15HSND jt korral on vaja erandina kasutada teisi valemideid süsinikekvivalendi või analoogse parameetri määramiseks.

Standardis EN 1011-2 on toodud valem parameeter CET määramiseks:

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

Valemit sobib kasutada ettekuumutustemperatuuri määramiseks Weldox- ja Hardox-teraste keevitamisel [21]

Keevitavuse hindamiseks pakuti 1970. a Jaapanis välja parameeter  $P_{CM}$ :

$$P_{CM} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

Valem sobib termotöödeldud teraste jaoks (Weldox jt), juhul kui  $C < 0,22\%$  ja  $t_{8/5} = 6 \dots 8$  s. Etteantud soojussisestuste  $Q_e = 1$  kJ/mm ja 2 kJ/mm korral hinnatakse terase kalduvust vesinikpragude tekkele. Parameetrit  $P_{CM}$  kasutatakse ettekuumutustemperatuuri määramiseks gaasloikamisel.

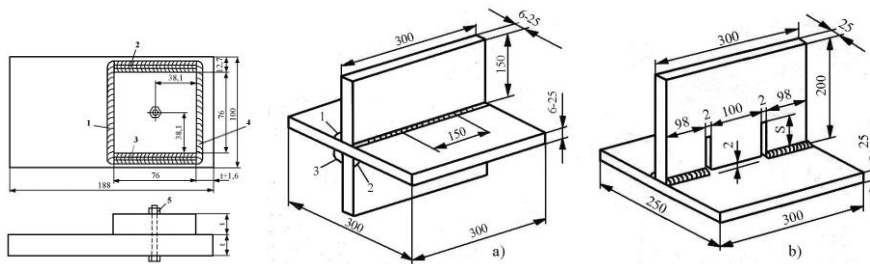
Süsinikekvivalendi kriitilise väärtuse osas on andmed kirjanduses vasturääkivad, kuna tuleb arvestada nii õmblusesisest vesinikusisaldust kui ka keevituse soojussisestust. Leitakse [7], et kui  $CE \leq 0,41$ , siis on teras hästi keevitatav kõikide protsessidega. Rootsi kogemuse järgi on kriitiliseks CE väärtuseks 0,43 [14], ehituskonstruktsioonide valmistamisel terastest margiga S420 ja S460 antakse ette kitsad piirid ekvivalendile seostatuna plaadi paksusega. Süsinikekvivalendi arvutamiseks on vaja teada terase täpset keemilist koostist. Praktikas saab terase keemilise koostise teada tarnija poolt väljastatud vastavast dokumendist ehk sertifikaadist. Erinevate toodete valmistamisel võidakse nõuda erinevat sertifikaadi vormi. Survemahutite tootmisel näiteks nõutakse kindlasti sertifikaati vormi EN 10204 3.1 järgi (vana vorm 3.1 B), mida kõigil terasetootjatel pole võimalik pakkuda. Kuna terase leeger-elementide sisaldus ja järelikult süsinikekvivalent võivad erinevate partiide osas suuresti kõikuda, siis võidakse ka keevitusprotseduuride atesteerimisel seada sellele näitajale ülemine

piir. Näiteks ei tohi teatud juhtudel ületada tootmises kasutatava terase süsinikekvivalent atesteerimise katsel kasutatud terase oma rohkem kui 0,02 võrra.

### Vesinikpragudekindluse määramise katselised meetodid

Tõesed tulemused saadakse tehnoloogiliste teimide abil. Levinuimad on järgmised teimid:

- CTS-teim (*controlled thermal severity*),
- ristiteim (*cruciform test*),
- T-liite murdeteim katse,
- Tekken-teim



Joonis 5.3. CTS-, ristiliite ja T-liite proovikehad

CTS-katsel keevitatakse algul kokku proovikeha külgmised õmblused 2 ja 3 ja lastakse proovikeha jahtuda (joonis). Edasi keevitatakse kontrollõmblused 1 ja 4. Jahtumiskiirust on võimalik juhtida plaatide paksuse ja keevituse soojussisestuse varieerimisega. Uuritakse kontrollõmbluste alas mikrolihvidel pragude esinemist.

Ristiteimil keevitatakse erineva temperatuuriga ( $-40...250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) plaadid kokku nelja nurkõmblusega, alates õmblusest 1 kellaosuti suunas liikudes õmblustele 2, 3 ja 4. Vesinikpragudekindluse kriteeriumiks on temperatuur, mille juures ei teki pragusid. T-liite murdeteim on standarditud. Kevvitatakse T-liide, mis siis pressi all purustatakse. Purunemine peab toimuma keevismetalli sees.

### Vesinikpragude vältimise meetmed:

1. Valida võimalusel konstruktsiooni tarvis võimalikult madala süsinikusisaldusega ja süsinikekvivalendiga teras.
2. Kasutada minimaalse vesinikusisaldusega keevitusprotsesse, näiteks MAG-keevitust või aluselise kattega elektroode.
3. Paksude kõrgtugevate teraste keevitamisel kasutada esimese ehk juurelábimi keevitamisel madalama tugevusega lisametalli (elektroode, traate).
4. Kasutada austeniitseid roostevabasid lisametalle, mis võib osutada küll kulukaks.
5. Keevituselektroodid ette valmistada kasutusjuhendite järgi (kuivatada, hoida töökohal, ladustada), et vältida nende niiskumist.
6. Puhastada liidetavate detailide servad roostest, mustusest, õlist.
7. Kasutada võimalikult suurt keevituse soojussisestust, arvesse võttes võimalikku löögisitkuse vähenemist.
8. Kasutada ettekuumutust.



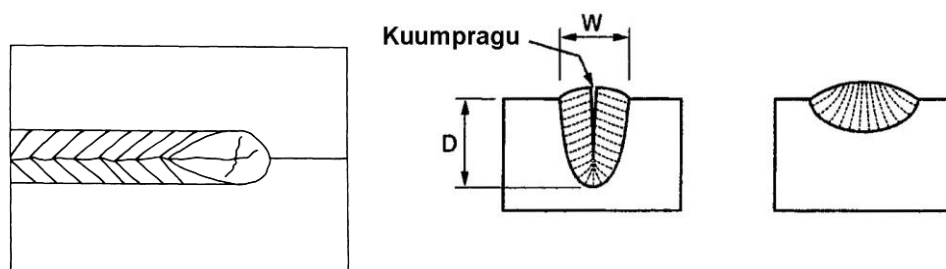
9. Kasutada kohe pärast keevitamist liitest vesinikku eemaldavat kuumutust.
10. Teha järeltermotöötlust, näiteks lõõmutust või noolust.
11. Vähendada keevituse jääkpingeid, näiteks kasutades keevitamist vastusammuga lõikudena, keevitades sümmeetrilisi ja kahepoolseid õmblusi.

### 5.3. Kuumpraod keevitamisel

Kuumpraod (*hot cracking*) võivad esineda keevisõmbluse metallis või termomõjutsoonis, tingituna haprast purunemisest solidusjoone lähedastel temperatuuridel vedel-tahkes faasis kristalliseerumise lõppedes või kristalliseerunud metalli kõrgetel temperatuuridel keevituse jääkpingetest tekkinud teradevahelise deformatsiooni tulemusena. Esimesel juhul on tegemist tardumispragudega (*solidification cracking*), teisel juhul likvatsioonipragudega (*liquation cracking*). Tavaliselt on murdepinnad jämedateralise struktuuriga ja oksüdeerunud.

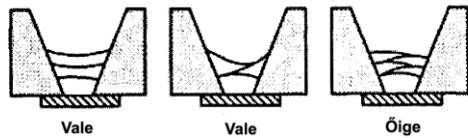
#### Tardumispraod

Kuumpragude all mõeldakse tavaliselt tardumispragusid, mis tekivad siis, kui suurem osa sulast keevismetallist on tardunud. Tardumisel e kristalliseerumisel tekivad dendriitide vahele vedelas faasis õhukesed kelmed, mis võivad puruneda metalli kahanemisel tekkinud pingete toimel. Reeglina võib pragu tekkida piki õmblust tingituna selliste elementide, nagu C, S, P, makrosegregatsioonist. Harvem tekivad praod risti õmblusega ja on raskemini avastatavad. Õmbluse keskjoonel asetsev dendriitidevaheline pragu ei avane sageli keevisõmbluse pinnale. Eriti raske on avastada pragusid mitme läbimiga keevitatud keevisõmblustes, kus iga järgneva läbimi keevitamisel eelneva läbimi pealispinnas olevad praod sulatatakse kokku. Kuumpraod võivad tekkida keevitamise vääral lõpetamisel, kus õmbluse lõpus tekib madalam osa e nn lõpetuskraater. Tardumispraod võivad tekkida hästi lõiketöödeldavate, nn automaatteraste keevitamisel, mis sisaldavad lõiketöödeldavuse parandamiseks legeerelementidena Pb, S, P, Ce.



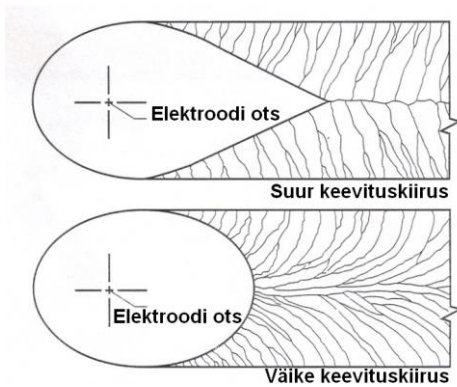
Joonis 5.4. Kraaterpragu ja kuumpragu keevisõmbluses

Terased suure P ja S sisaldusega annavad sageli õmbluse keskel tugevalt oksüdeerunud ja dendriitse struktuuriga murdepinna. Väevli mõju on võimalik teoreetiliselt vähendada Mn lisamisega õiges proportsioonis lisametalli koostises. Sageli võivad praod tekkida esimese juurelähimi keevitamisel, eriti kui on tegemist nõgusa õmblusega [19].



Joonis 5.5. Kuumpragu nõgusate läbimitega õmbluses

Kuumpragude risk suureneb keevituskiiruse kasvuga, kui keevitusvann omandab tilgakujulise kuju. Viimasena tarduvad väiksema tugevusega faasid õmbluse keskel võivad puruneda kahanemispingete mõjul.



Joonis 5.6. Keevituskiiruse mõju keevitusvanni kujule ja võimalikule kuumpragude tekkele

Keevitusvanni kuju mõjutab likvatsiooni ja keemisõmbluse omadusi. Kaarkeevitusel keevitusvoolu suurenedes keevitusvanni sügavus kasvab ja sellise kitsa ja sügava õmbluse keskel eraldunud faasid (karbiidid, oksiidid) võivad esile kutsuda näiteks roostevabade teraste keevitamisel kuumpragusid.

Kuumpragude teke võib olla seotud õmbluse kujuga e laius/sügavuse  $w/d$  suhtega. Kui materjalil on kalduvus kuumpragudele, siis väga kitsaste ja sügavate õmbluste korral võib tekkida pragu õmbluse keskele. Liiga madala ja laia õmbluse korral on prao sügavus väike. Pragu õmbluse keskel võib tekkida austeniitse roostevaba terase keevitamisel austeniitsete lisametallidega. Standardis EN1011-3 on toodud, et kui õmbluse laius/sügavuse suhe  $w/d$  on väiksem või suurem kui  $w/d = 1-1,5$ , siis kuumpragude tõenäosus on suur. Süsinikterastes ja madallegeerterastes on optimaalne õmbluse laius/sügavuse suhe  $1,5-2,5$ , millest kõrvalekallete korral võivad praod tekkida kaarkeevitusel rääbustis, kus õmbluse kuju on nende tekkeks sobiv ja keevituskiirus suur.

### Likvatsioonipraad

Keevisõmbluse termomõjutsoonis võib kuumutamisel tekkida vedel faas, mis voolab tera piiridelt ära keevitusvanni ja siis võib toimuda purunemine metalli kahanemise sisepingete tõttu. Seejuures on temperatuur madalam kui tardumispragude tekke ajal. Likvatsioonipraad on avastatud C-Mn-terastes ja mikrolegeerterastes. Küllaltki sageli võivad likvatsioonipraad tekkida teatud tüüpi Al-sulamite ja roostevaba terase keevitamisel [9].

## Kuumpragudekindluse arvutuslik hindamine

Sageli arvutatakse terase keemilise koostise järgi teatud parameetrid, mida võrreldakse etteantud väärtustega.

Keevitamisega rüüstis on leitud parameeter *UCS* (*units of crack susceptibility*), mis on seotud terase keemilise koostisega järgmiselt:

$$UCS = 230 C + 190 S + 75 P + 45 Nb - 12,3 Si - 5,4 Mn - 1$$

Valemis on tähistatud keemiliste elementide sisaldus terases. Kui arvestused annavad tulemuse  $UCS \leq 10$ , siis on pragude risk suur, ja kui  $UCS \geq 30$  – siis väike. Valemit on tunnustanud TWI.

TIG-keevitusel on saadud parameetiline valem [14, 17]

$$CSF = 42 C + 847 S + 265 P - 10 Mo - 3042 O + 19$$

Parameetri *HCS* järgi hinnatakse madallegeerteraste kalduvust kuumpragude tekkimisele:

$$HCS = \frac{(S + P + 0,04Si + 0,01) \cdot 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V}$$

kui  $HCS < 4$ , siis terastel  $R_m < 700$  MPa on kalduvus kuumpragude tekkimisele.

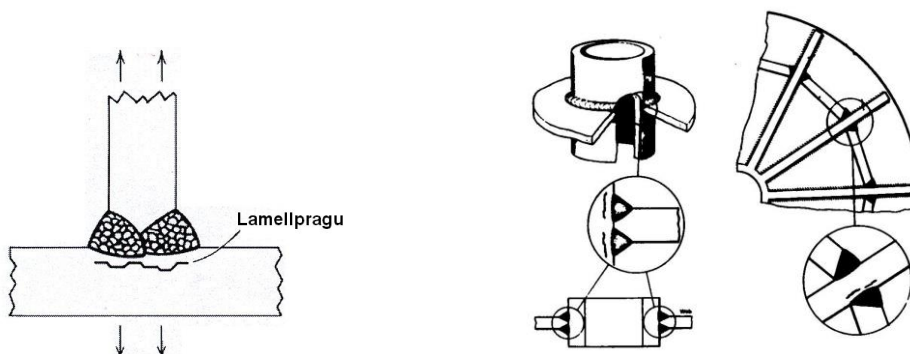
Tehnoloogiliste teimidega hinnatakse kalduvust kuumpragude tekkimisele kriitilise deformatsioonikiiruse abil :

$$Vkr = 19 - 42 C - 411 S - 3,3$$

Kui legeerterastel  $Vkr > 6,0$  , siis nad ei kaldu kuumpragude tekkimisele, kui  $Vkr < 1,8$ , siis kalduvad.

## 5.4. Lamellpraod ja korduvkuumutuse praod

Teatud juhtudel on avastatud koormatud T-liidetes õmbeluse all praod paralleelselt lehe pinnaga. Visuaalselt märgatakse pragusid pärast keevitamise lõpetamist ja liite jahtumist. Pragusid tuntakse lamellpragude või lamellrebendite (*lamellar tearing*) all. Praod tekivad peamiselt toote valmistamise ajal, aga ka väsimus- või löökkkoormustel kasutamise ajal. Pragude tekkimise põhjuseks on terase madal kvaliteet – mittemetalsed lisandid sulfiidide ja silikaatide kujul, mis eralduvad valtsimisel tera piiridel. Pragude teket hinnatakse tehnoloogiliste teimidega. Vältimise teeks on kvaliteetse, väikese S-sisaldusega terase kasutamine.



Joonis 5.7. Lamellpraod keevisliites ja nende määramise katsekeha

## Korduvkuumutuse praod

Energeetikaseadmetes, kus kasutatakse Cr-Mo ja Cr-Mo-V tüüpi teraseid, avastati jääkpingeid eemaldava löömutuse järel termotsoonis ja ka keevisõmbluse metallis praod. Alates 1970ndatest hakati neid pragusid nimetama korduvkuumutuse pragudeks (*stress relief cracking, reheat cracking*). Kuumutamise ajal eralduvad nendes terastes peeneteralised karbiidid temperatuurivahemikus 500–700 °C.

Pragusid on täheldatud lehe paksusel üle 50 mm ja suurte keevituse jääkpingete korral. Pragude vältimiseks on soovitatav vähendada terase Mo ja V sisaldust, jääkpingeid keevitamise tagajärjel või kuumutustemperatuuri tõstmist üle 700 °C.

Pragudekindluse hindamiseks kasutatakse Nakamura poolt 1970ndatel pakutud valemit:

$$\Delta G_I = 10 C + Cr + 3,3 Mo + 8,1 Mo-2$$

Kui  $\Delta G_I$  ületab väärtust 2, siis on võimalik löömutamisel pragude teke. Teraste kuumpragudekindluse määramise meetodika on toodud standardites ISO 17641-1; 2.

## 5.5. Süsinikteraste keevitavuse hindamine

Teraste vesinikpragudekindluse määramise meetodika on toodud standardites ISO 17642 – 1; 2, 3. Teraste ja alumiiniumi sulamite erinevate markide keevitavusega tuleb arvestada nii keevitajate atesteerimisel kui ka keevitusprotseduuride koostamisel. Keevitajate atesteerimisel standardi EN 287-1 ja protseduuride atesteerimisel standardi ISO 15614:2004 järgi on kõik terased jagatud 11 gruppi või rühma. Teraste liigitus on toodud standardis ISO TR 15608:2005. Tuleb märkida, et varasem liigitus sisaldas 5 rühma teraseid. Teraserühmad võivad jaguneda veel alamrühmadeks. Teraste rühmitamise aluseks on iga rühma mõnevõrra erinev keevitustehnoloogia, võib olla ka detailides. Teiselt poolt võib keerulisema tehnoloogia ja raskemini keevitatava terase protseduur või keevitaja proovitöö anda atesteerimise ka lihtsamat tüüpi materjalidele. Näiteks kui keevitaja keevitab edukalt 2. rühma terasest margiga S460M proovikehad, siis loetakse ta kompetentseks keevitama 1. grupi teraseid voolavuspiiriga alla  $R_e < 460 \text{ N/mm}^2$  ja 3. grupi termotöödeldud teraseid voolavuspiiriga üle  $360 \text{ N/mm}^2$ . Keevitusprotseduuri (WPS) atesteerimisel laieneb atesteerimispiir sama rühma sees vaid väiksema tugevusega terastele võrreldes katsel kasutatuga. Esimese rühma terased on üldjuhul hästi keevitatavad õhukese lehe korral. Paksema terase ja madallegerimise korral on vaja kasutada väikese vesinikusisaldusega protsesse ja võib olla ka ettekuumutust. Näiteks 4. grupp käsitleb roomavuskindlaid Cr-Mo-V-teraseid. Õhemat lehte on võimalik keevitada ilma ettekuumutuseta TIG- ja MAG-keevitusega. Paksema materjali keevitamisel on vaja kasutada ettekuumutust, et vältida pragusid TMT. Kasutatakse järeltermotöötlust (PWHT) TMT löögisitkuse parandamiseks. USAs on terastele antud järgnevad soovitusel keevitavuse osas [19, 20]. Madalsüsinikterased ( $C < 0,2\%$  ja  $Mn < 1,0\%$  ja lehe paksusega alla 25 mm) ei ole aldis vesinikpragude tekkele. Ei ole vaja ette näha ettekuumutust, järeltermotöötlust. Paksemas plaadis võib C-sisaldus ületada 0,3% ja kui Mn on üle 1,4%, siis tuleks hoold kanda võimalikult väikese vesinikukoguse sattumise eest keevisõmblusesse.

Kui terase süsinikekvivalent on suurem  $CE > 0,4$ , mõnedes standardites ja kirjanduses vahemikus 0,41...0,43, siis tuleb kontrolli all hoida termomõjutsooni kõvadust, kontrollides soojussisestust Q. Ettekuumutust on tavaliselt vaja paksu plaadi keevitamisel, kasutades kas väikese vesinikusisaldusega B-kattega elektroode või MAG-keevitust.

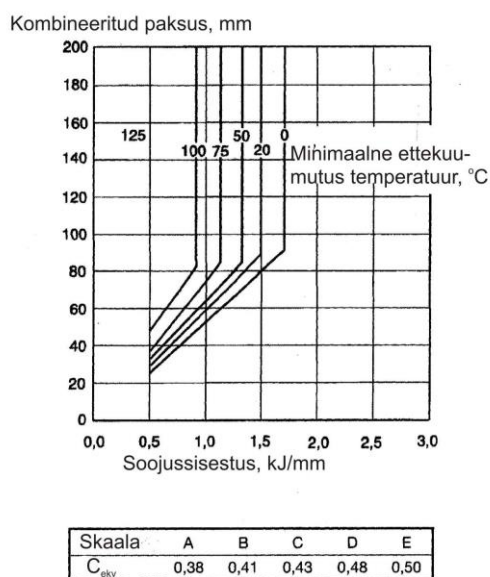
Kui terase C-sisaldus ületab 0,45% ja toode töötab väsimusele või löökoormustel ning tootes on suured jääkpinged, siis tuleb pärast keevitamist kasutada jääkpingeid eemaldavat termotötlust-lõõmutamist.

USAs loetakse keskmise süsinikusisaldusega terasteks teraseid süsinikusisaldusega 0,4–0,6% ja nende keevitamisel tuleb järgida nn kõvaduse kontrolli meetodit soojussisestuse ja ettekuumutuse kombinatsiooniga koos vesinikusisalduse ohjamisega. Eeltoodust suurema süsinikusisaldusega teraste keevitamisel tuleb kasutada martensiidi tekkimise temperatuurist kõrgemat ettekuumutustemperatuuri koos järgneva termotötlusega. Kui ei ole võimalik teha keevistoote termotötlust, siis tuleb kasutada austeniitseid roostevabu elektroode. Madallegeerterased, mis sisaldavad mikrolegeerelemente, nagu V ja Nb, vajavad sageli järeltermotötlust

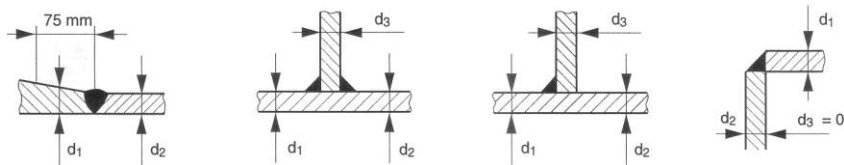
## 5.6. Ettekuumutustemperatuuri määramine

Madalsüsinikteraste ettekuumutustemperatuuri määramisel praktikas kasutatakse standardi EN 1011-2 meetodikat. Aluseks võetakse kombineeritud lehe paksus, keevituse soojussisestus ja terase süsinikekvivalent. Kombineeritud lehe paksuseks võetakse põkkõmblustel kahekordne lehe paksus, T-liitel kolmekordne lehe paksus. Kasutatakse kahte lähenemist, millest ühte tutvustame edaspidi. Kasutades standardis toodud graafikuid (joonis 5.8), kus lisaks võetakse aluseks protsessi vesinikusisaldus HD, määratakse graafikutelt ettekuumutustemperatuur. Joonisel toodud graafikud sobivad MAG-keevitusprotsessile (skaala D) ja terasele süsinikekvivalendiga 0,48. Põkkõmblusel plaadi paksusel 40 mm e kombineeritud lehe paksusel 80 mm ja soojussisestusel  $Q = 1,2 \text{ kJ/mm}$  juures on vajalik ettekuumutus  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Rutiilelektroodiga keevitades saaks sama ettekuumutusega ja soojussisestusega keevitada teraseid, mille süsinikekvivalent CE ei ületaks 0,38.

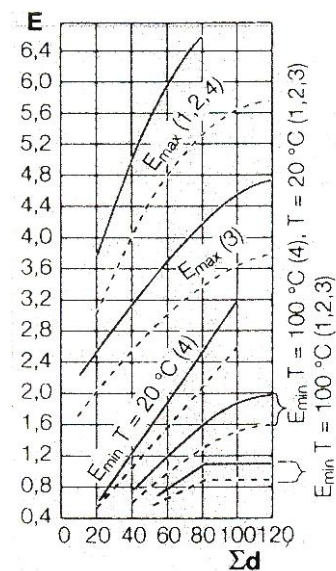
Paljud terasetootjad on töötnud välja soovitud ettekuumutustemperatuuri määramiseks sõltuvalt terase kombineeritud paksusest, mida Ruukki teraste puhul iseloomustavad kõverad joonisel 5.10.



Joonis 5.8. Ettekuumutustemperatuuri määramine graafikutelt standardi EN 1011-2. järgi. Skaalad (A, B, C, D, E) vastavad vesiniku hulga keevitusprotsessis

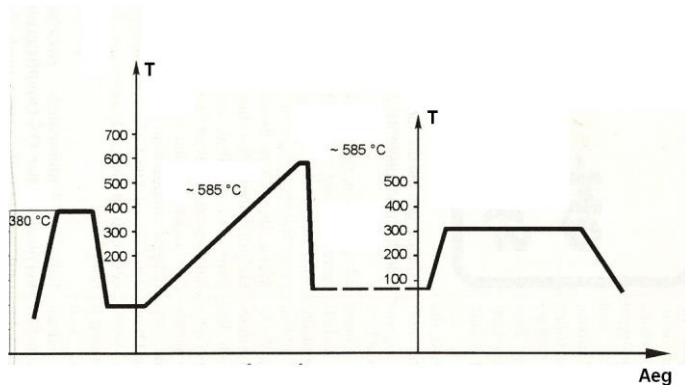


Joonis 5.9. Kombineeritud lehe paksuse määramise arvutuskeemid



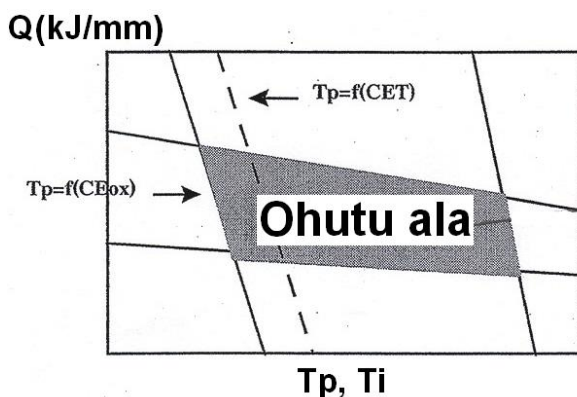
Joonis 5.10. Ettekuumutustemperatuuri määramine Ruukki terastele. Abstsisssteljel tähistatud kombineeritud plaadi paksus, ordinaatteljel keevitusenergia: 1 – teras RAEX Multisteel, 2 – RAEX 355N, 3 – RAEX 355 NL, 4 – S 355J2G3

Graafikutel on näidatud minimaalne keevitusenergia  $E_{min}$ . Tuleb kasutada sellest joonest ülespoolele jäävaid väärtusi, kuid allapoole joont  $E_{max}$ . Maksimaalne keevitusenergia on tähistatud  $E_{max}$ , mille ületamisel liite löögisiskus väheneb märgatavalt. Graafikutelt on näha, et kolme esimesena märgitud terast saab rahuldavalt keevitada ettekuumutust kasutamata, kuid viimane terasemark nõuab juba miinumenergia korral ettekuumutust. Kuumustugevate teraste keevitamisel on vaja kasutada keerulist kuumutustsüklit nii keevitamisel kui ka iga keevituslähimi järeltermotöötlusel (joonis 5.11).



Joonis 5.11. Terase X38CrMoV51 ettekuumutuse ja järeltermotöötuse ajagraafik

Tugevate ja kõrgtugevate teraste keevitamisel tuleb lahendada keeruline keevitusparameetrite ja ettekuumutuse temperatuuri määramise optimeerimisülesanne. Tuleb täpselt piiritleda minimaalset ja maksimaalset jahtumisaega temperatuurivahemikus 800–500 °C, tähistatud  $t_{8/5}$ . Vesinikpragude vältimiseks tuleb kas suurendada soojussisestust või kasutada ettekuumutust. Liiga suur soojussisestus halvendab keevisliite löögisitkust, kuna pikeneb jahtumisaeg. Liiga väikese soojussisestuse ja madala ettekuumutuse korral lüheneb jahtumisaeg alla kriitilise ja esineb karastusefekt, mida piiritletakse TMT kõvadusega. Seejuures ettekuumutustemperatuuri liigsel tõstmisel võivad halveneda keevisliite plastsusomadused tingituna tera kasvust terases. Ratsionaalne on esitada keevitusparameetrid ja ettekuumutustemperatuuri võimalikud vahemikud akna kujul diagrammil. ThyssenKrupp teraste kohta on toodud näide joonisel 5.12 [23] ja analoogset tarkvara kasutatakse TTÜs Rootsi terasetootja SSAB poolt tarnituna Weldox- ja Hardox-teraste korral. Diagrammi abstsissitel on näidatud ettekuumutus- või läbimitevaheline temperatuur, ordinaatteljel soojussisestus. Joonisel 5.12 on maksimaalse soojussisestuse väärtus kaldjoonena, millele vastab maksimaalne jahtumisaeg 25 sekundit. Alumine joon määrab minimaalse soojussisestuse, mille juures tagatakse veel keevisõmbluse servade sulatamine. Joonele  $T_p$  vastab minimaalne ettekuumutustemperatuur või mitme läbimiga keevitamisel läbimitevaheline temperatuur  $T_i$ , millest vasakul võib esineda TMTs karastusefekt ja tekkida vesinikpraod. Tarkvarapakett arvestab seejuures keevismetalli viidava vesiniku kogusega HD. Ettekuumutustemperatuuri tõstmisel väheneb lineaarselt vajalik soojussisestus. Ettekuumutustemperatuuri piiratakse püstise kaldjoonega. Edasisel ettekuumutustemperatuuri tõstmisel halvenevad liite plastsusomadused. Kui keevitamisel hoitakse ettekuumutustemperatuuri ja soojussisestust etteantud aknas, siis tagatakse liite optimaalsed mehaanilised omadused.



Joonis 5.12. Keevitusparameetrite aken keevitamisel

## 5.7 Ettekuumutuse ja järeltermotötluse praktika

Standardi ISO 13916 järgi määratakse ettekuumutuse temperatuur  $T_p$  (*preheating temperature*) kui miinumtemperatuur enne keevitamise alustamist. Üldjuhul on selle väärtus sama suur kui läbimitevaheline temperatuur. Läbimitevaheline temperatuur  $T_i$  (*interpass temperature*) on mitme läbimiga keevitamisel põhimetalli temperatuur enne järgneva läbimi keevitamise alustamist. Hoidmistemperatuur  $T_m$  (*maintenance temperature*) on keevitusala minimaalne temperatuur keevitamise ajal.

Kõrglegeeritud austeniit-ferriitsete nn dupleksteraste korral piiratakse läbimitevahelist temperatuuri, lähtudes asjaolust, et madalamal temperatuuril viibib termomõjutsoon ja keevismetall jahtudes lühemat aega tugevusomaduste kahjuliku sigma faasi piirkonnas (470–900



°C) ning nii tagatakse liite mehaanilised omadused. Vesiniku eemaldamiseks keevisliitest võidakse kohe keevitamise järel teha vesinikeemaldav kuumutus (tavaliselt 250 °C), mille temperatuuri standardis EN 1258 tähistatakse järelkuumutustemperatuurina  $T_N$  (*post heating temperature*). Kuumutusaeg sõltub plaadi paksusest ja võetakse rusikareeglina 2 min iga plaadi paksuse millimeetri kohta.

Standardi EN ISO 13916 järgi mõõdetakse plaadi paksusel alla 50 mm temperatuuri detaili servadelt kaugusel 4 plaadi paksust, kuid mitte kaugemal kui 50 mm. Praktikas opereeritakse mõõtmiskoha kaugusega 50 mm lehe-plaadi servast ja soovitatavalt mõõdetakse kuumutatava pinna vastaspoolelt, kui see on võimalik. Kui ei, siis keevitamise poolt. Faasitud servadega põkkliite ja T-liite korral mõõdetakse temperatuuri pinnalt, lähtudes faasitud servast. Faasitud servadega T-liite korral mõõdetakse temperatuuri horisontaalse plaadi peal vertikaalse plaadi täispaksuse projektsioonist. Terasplaadi paksusel üle 50 mm mõõdetakse temperatuuri tavaliselt mitte kaugemal kui 75 mm detaili servast pärast kuumutuselemendi eemaldamist ja temperatuuri ühtlustumist. Hoidmisajaks pärast kuumutustemperatuuri saavutamist võetakse 2 min iga 25 mm paksuse kohta. Temperatuuri mõõtmismeetodite tähistus standardi EN 13916 järgi on järgmine:

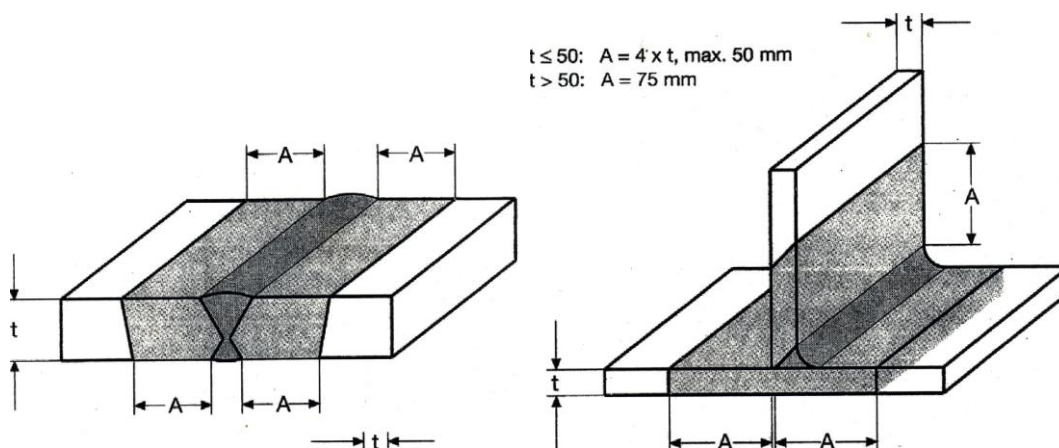
- TS – termovärvid, näiteks termopliiatsid,
- CT – kontakttermomeetrid,
- TE – termoelemendid ehk termopaarid,
- TB – kontaktivabad mõõtmised, näiteks lasermõõturid, püromeetrid.

Tehnilises dokumentatsioonis võib ettekuumutuse temperatuuri tähistada järgnevalt:

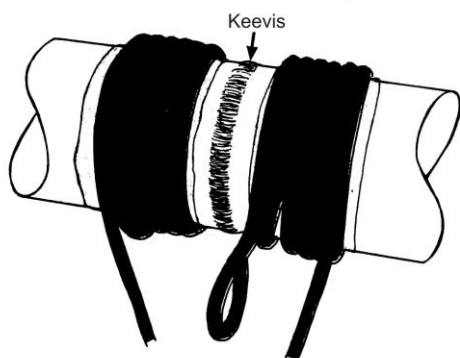
#### EN ISO 13916 – Tp 155 – CT

Ettekuumutuse vajadusel ka järgneva termotöötamise nõuded määrab kompetentne konstruktor, kuid neid ei näidata joonistel, vaid eraldi juhenditena. Keevisliidete termotöötamise tarvis on välja töötatud kvaliteedi tagamise standard EN ISO 17663. Ettekuumutust on teatud juhtudel vaja kasutada paksemate karastuvate teraste gaas- ja plasmalõikisel, kus lõikepinnas võivad moodustuda juuspraod. Ettekuumutuse korral väheneb lõigatud pinna kõvadus ja seda on võimalik lõiketöödelda. Ühtlasi kasvab termolõikamise kiirus. Arvutusvalemid kuumutustemperatuuri määramiseks on toodud sageli terasetootjate prospektides [7, 21]. Keeviste ettekuumutamiseks võib kasutada ahikuumutust või siis lokaalset kuumutust gaasileegiga, pöörivooludega ehk induktioonkuumutust või takistustraadist elementidega kuumutusmatte. Levinud on kuumutamine gaasipõletitega, kus kasutatakse põlevgaasina propaani või atsetüleen- ning hapniku segu. Atsetüleen-hapniku kasutamisel võidakse saada kuumutustemperatuur kuni 1200 °C, atsetüleen-suruõhu kasutamisel kuni 750 °C, atsetüleen-õhu kasutamisel kuni 350 °C [26]. Sageli kasutatakse silindriliste mahutite ja ka jämedate torude kuumutamiseks mitme põletiga rõngaskuumuteid. Hapnik-atsetüleenleeki kasutatakse nii ühe põletiga kui ka ratastel liikuva põletikomplektiga (tavaliselt 4 põletit) keevitusdeformatsioonide vähendamiseks. Takistustraadist kuumutusmatid võimaldavad saada temperatuuri kuni 1100 °C, ja neid võib kasutada lokaalseks ettekuumutamiseks. Samuti võib ümber keevistoote ehitada neist ahju ja teha hästi kontrollitavat järeltöötlust. Torude keevitamisel on otstarbekohane kasutada induktioonkuumutust tööstusvooluga 50 Hz või inverteritega sagedusel 20–40 kHz. Puuduseks on ebahütlane temperatuuriväli, eelisteks protsessi hea juhitevus arvuti abil ja kuumutusmähiste kiire eemaldamise võimalus keevituskohast. Kohtkuumutamisel ei ole täpselt määratletud kuumutatava ala laius. Nii soovitatakse kirjanduses ettekuumutuse ala laiuseks 5–10 materjali paksust.

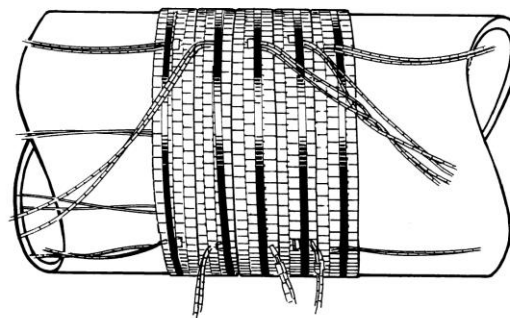




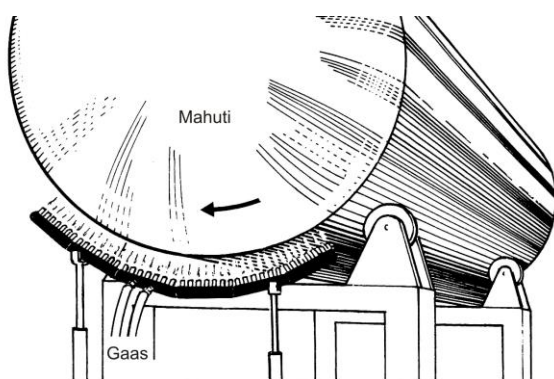
Joonis 5.13. Ettekuumutuse temperatuuri mõõtmine



Joonis 5.14. Induktsioonkuumutus



Joonis 5.15. Takistuskuumutus



Joonis 5.16. Kuumutus gaasipõletitega

### Järeltermotötluse praktika

Keevistoodetes tekkinud jääkpingete eemaldamiseks ja mõõtmete stabiliseerimiseks kasutatakse teatud juhtudel pingeid eemaldavat lõõmutamist. Survemahutite valmistamisel, eriti pärast külmdelormeerimist on vaja ferriidi tera suurust vähendavat lõõmutust, mille tempe-

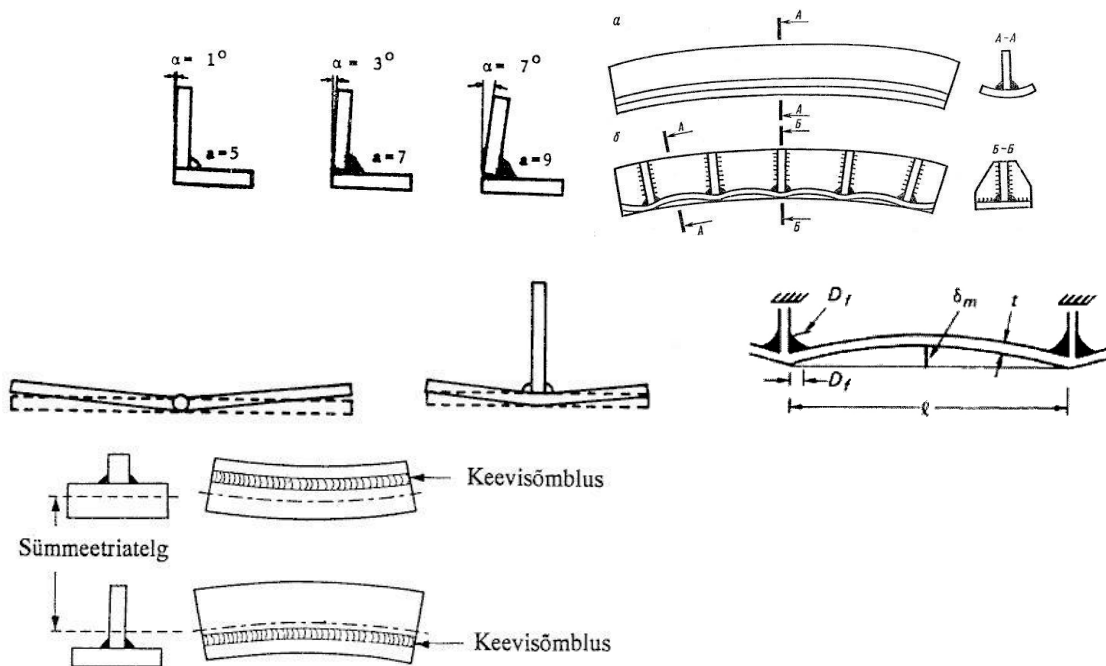
ratuur sõltub kasutatava terase margist ja sageli on madalsüsinikterastel 900–940 °C. Keevisliite mehaaniliste omaduste parandamiseks on valmistajad soovitanud järeltermotöötlust (*post weld heat treatment – PWHT*). Järeltermotöötluse eesmärgiks on liite väsimustugevuse parandamine, jääkpingete kõrvaldamine ja hapra purunemise tõenäosuse vähendamine, pinge-korrosioonikindluse tõstmine. Väidetavalt eemaldatakse 80–90% sisepingetest. Soovitusi termotöötluseks annavad terasetootjad ja valmistusstandardid, näiteks survemahutite standardid. Standardis EN 1011-2 on toodud tabelite kujul soovitused lõõmutustemperatuuride valikuks kuumuspüsivate teraste jaoks. Keevistoodete termotöötlusel tuleb arvestada üldisi reegleid teraste termotöötluse praktikast, kuumutus- ja jahtumiskiiruste, hoidmisaja kohta, et tagada toote ühtlane kuumutus ja optimaalsed mehaanilised omadused. Standardis EN 12062 on toodud termotöötluse parameetrite soovitused, mis võivad erineda USA standardi ASME omadest. Terasse tootja Ruukki [7] soovib sisepingeid eemaldavat lõõmutamist teha 550–600 °C, aga ka sõltuvalt terase tüübist kõrgemal temperatuuril kuni 950 °C. Termomehaaniliselt töödeldud terastel võib mõnel juhul kõrgem kui 650 °C lõõmutus viia mehaaniliste omaduste alanemiseni. Keeviskonstruktsioonide kujumuutuste vähendamiseks kasutatakse sageli kohtkuumutust gaasileegiga või induktsioonkuumutust. Üldiselt ei tohiks lokaalne temperatuur ületada 650 °C, kõrgleegeteraste korral 450 °C.

## Kokkuvõte

1. Metallide keevitavuse mõistet tuleb siduda keevisliite kvaliteediga ja see hõlmab nii materjali, tehnoloogiat kui ka konstruktsiooni iseärasusi.
2. Metallide keevitavust seostatakse keevitavuse tingimustega, mis on seotud negatiivsete ilmingute vältimisega keevisliite omadustele, nagu erinevat tüüpi pragude teke, liite tugevusomaduste vähenemine.
3. Süsinikteraste ja madallegeerteraste keevitamisel võivad eelkõige tekkida nn vesinikpraod keevismetalli kõrval termomõjutsoonis. Kalduvust vesinikpragude tekkele hinnatakse terase keemilise koostise, materjali paksuse, vesiniku difusiooni, keevituse soojussisestuse kombinatsiooni järgi.
4. Vesinikpragude vältimiseks tuleb kasutada detailide ettekuumutust või suurendada soojussisestust.
5. Kuumpraod võivad tekkida roostevabade teraste, alumiiniumi keevitamisel eelkõige õmbluse metallis seoses väiksema tugevusega faaside tekkimisel metalli tardumisel.
6. Kuumpragude teket mõjutavad materjali keemiline koostis, keevituskiirus, õmbluse ristlõige (laiuse-paksuse suhe), õmbluse läbimite kumerus või nõgusus.

## 6. KEEVITUSE JÄÄKPINGED JA KUJUMUUTUSED

Metallide keevitamisel tekivad keevisliidetes sisepinged e **keevituse jääkpinged** (*residual welding stress, welding stress*). Eristatakse keevisõmbeluse teljesuunalisi e pikipingeid ja põiksuunalisi e ristpingeid. Plastsetes materjalides ületavad jääkpinged voolavuspiiri ning tekitavad plastseid deformatsioone, mida võib nimetada kõverdumiseks keevitamisel (*welding distortion*). Viimase all mõeldakse nii mõõtmete muutusi – **piki- ja põikkahanemist** (*longitudinal, shrinkage and transverse shrinkage*) kui ka kuju muutusi – **detailide väändumine** (*twisting*), **läbipaindumine** (*bending*), **väljakummimine** (*buckling*) ja nurgamuutus e **nurkdeformatsioon** (*angular distortion, angular change*). Keevituse jääkpinged võivad teatud juhtudel põhjustada keevisliite enneaegset purunemist, mõõtmete muutust ajas, kiirendatud korrosiooni. Seetõttu on tähtis teada nende nähtuste põhjusi ja võimalusel minimeerida nende mõju.



Joonis 6.1. Põkkõmbeluste ja nurkõmbeluse kõverdumine keevitamisel

### 6.1. Keevituse jääkpinged ja nende tekkimise põhjused

Keevisliite kõverdumist ja jääkpingeid põhjustavad järgmised nähtused:

- sula keevismetalli kahanemine tardumisel,
- põhimetalli takistatud paisumine kuumutamisel külmaks jäänud keevisliite osade tõttu kuumutamisel keevitusvanni kõrval ja edasi jahtumisel kuumenenud osade takistatud kahanemine,
- ebahühtlane temperatuuriväli nii keevisliites kui ka tootes.

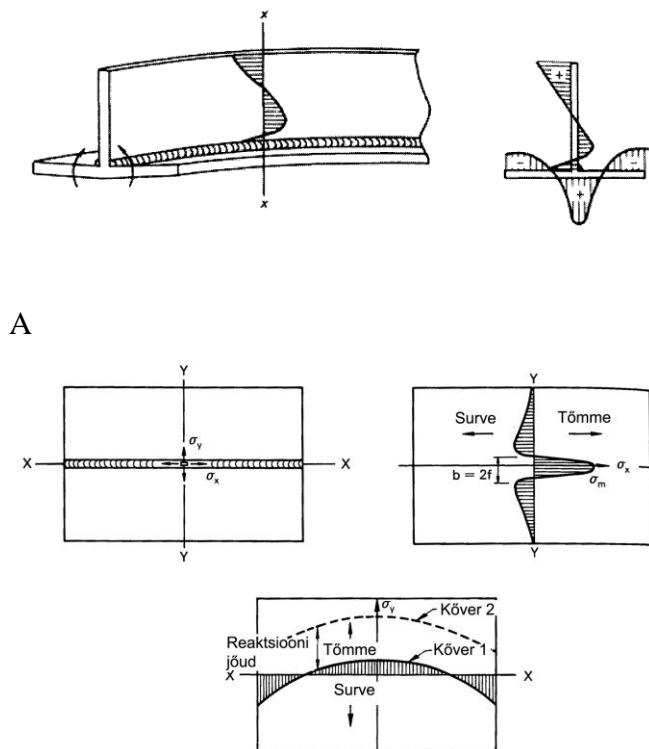
Eelkirjeldatud nähtuste tulemusena tekivad keevisõmbeluses pikisuunalised ja põiksuunalised tõmbepinged, mille suurus võib saavutada keevitavas materjalis voolavuspiiri.

Keevitamisel eristatakse keevisliidetes järgmisi jääkpingeid:

- a) mikropinged,
- b) makropinged.

Mikropinged on tavaliselt tingitud mikrostruktuuri muutustest, näiteks martensiitse muutuse toimumisest. Karastuvate teraste korral võivad tekkida keevisõmbuse kõrvalalas struktuurimuutuste korral ka survepinged.

Jääkpingete jaotust keevisõmbuses iseloomustavad pingete epüürid (joonis 6.2).

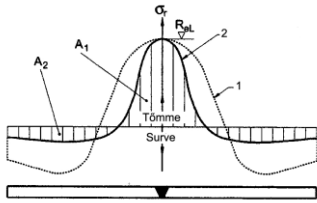


**B**

Joonis 6.2. Jääkpinged keevisõmbuses: A – T-liite kõverdumine ja jääkpingete epüürid, põikpinged; B – pikipinged X-telje ja pikipinged Y-telje suunas. Kõver 1 – põikpingete epüür, kõver 2 – põikpingete epüür pärast koormamist ühtlase tõmbepingega

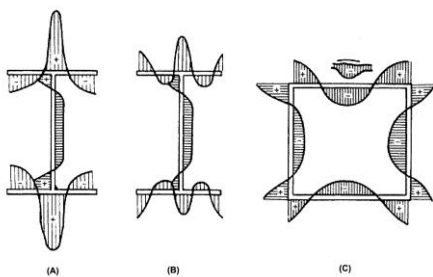
Tuleb märkida, et pikipinged keevisliite pikisuunas sõltuvad detaili pikkusest. Liite otstes on pingete väärtus null, edasi pinged kasvavad ja moodustavad ühtlase taseme õmbuse pikkusel üle 500 mm. Õmbuses ja kõrvalalas laiussega  $2b$  on plastselt deformeerunud ja tõmbepingetega koormatud ala. See ala laieneb soojussisestuse suurenedes (joonis 6.3), kuid väheneb materjali paksuse ja voolavuspiiri kasvuga. Plastselt deformeeritud ala laiust saab sõltuvalt terase voolavuspiirist, lehe paksusest  $t$  ja soojussisestusest  $Q$  määrata valemiga [24]:

$$2b = 0,41 \frac{Q}{t R_e}$$



Joonis 6.3. Pikipinged põkkõmbluseses erinevatel soojussisestustel: 1 – suur soojussisestus; 2 – väike soojussisestus

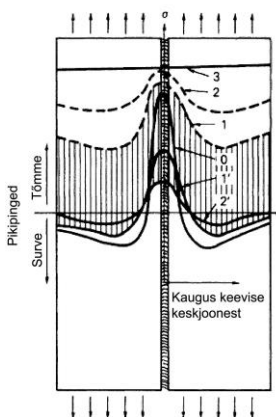
Eelnev detailide termolõikamine (gaaslõikus või plasmalõikus) tekitavad toodetes jääkpingeid ja muudavad nende jaotust pärast keevitamist (joonis 6.4). Harilikult säilivad õmbluse kõrval tõmbe pinged.



Joonis 6.4. Jääkpinged lõiketöödeldud toorikutes: T-talas(A), gaaslõigatud T-talas(B) ja gaaslõigatud toorikutest karpkonstruktsioonis(c)

### Välise koormamise mõju jääkpingetele

Vaatleme pikipingete jaotust põkkõmbluses (joonis 6.5) vahetult pärast keevitamist (kõver O). Edasi rakendame ühtlase välispinge suurusega  $\sigma$  (kõver 1). On näha, et pingekõvera tipp on küll natuke nihkunud ja ei ole enam nii terav. Edasisel välispingete suurendamisel (kõver 2) saavutavad maksimaalsed pinged voolavuspiiri. Kõvera kuju muutub. Edasisel välispingete suurendamisel pinged keevisliites saavutavad voolavuspiiri, mida tähistab sirge 3. Jääkpinged ei ole enam tähtsad. Vaatleme edasi olukorda, kui nüüd välispinged eemaldada (kõverad 1<sup>1</sup> ja 2<sup>1</sup>). Graafikutelt on näha, et jääkpingete mõju pingete jaotusele väheneb – kõverad ei ole nii järsu tipuga ja maksimaalne pinge on väiksem.



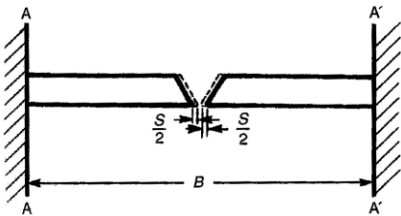
Joonis 6.5. Välise koormamise mõju jääkpingetele

## Keevisliite takistatud väline kahanemine

Jääkpingete suurust mõjutab veel nn takistatud väline kahanemine (*external restraint*), kui liidetavad detailid on enne keevitamist liidetud teiste detailidega (joonis 6.6). Vaatleme kahe plaadi põkkõmblust. Plaadid on eelnevalt jäigalt kinnitatud teiste detailide külge, mille vahekaugus on tähistatud tähga B. Kuna keevitamisel esineb põikkahanemine, siis tekivad reaktsioonijõudude toimele liites tõmbepinged järgmise valemi järgi [18]:

$$\sigma = E \cdot \frac{S}{B},$$

kus  $\sigma$  – reaktsioonipinge MPa,  
 $E$  – elastsusmoodul MPa,  
 $S$  – põikkahanemise suurus mm,  
 $B$  – keevistoote pikkus mm.



Joonis 6.6. Takistatud kahanemine keevitamisel

Jääkpingete vähendamiseks on mõttekas keeviskoost jagada alamkoostudeks ja need keevitada seejärel omavahel kokku. Juba keevitatud ja tardunud keevismetall on ise piisavalt jäik ja takistab metalli paisumist ning kahanemist. Seetõttu on soovitatav keevitada mitte kogu liite pikkuses ühe läbimiga, vaid lõikudena (vt vastusammuga keevitamine).

## Mõõtmete kahanemine keevitamisel ja tekkemehhanism

Keevisliite kõrvalalal keevitamisel esialgu metall kuumeneb ja paisub ning edasisel jahtumisel kahaneb. Toote külm osa takistab paisumist ja hiljem kaugemal asetsev kuumutatud ala takistab kahanemist.

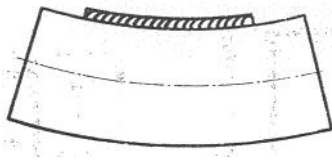
Takistatud paisumine ja kahanemine keevitamisel tekitavad toodetes nii piki kui ka põiksuunalised kahanemisjõud, mis muudavad keevistoote mõõtmeid ja põhjustavad detailide pikkuse vähenemist.

Vaatleme ribaterase külgservale keevitatud keevisõmblust (joonis 6.7). Keevisõmbelse kõrvalalal kuumeneb ja kaugenedes keevisõmbelse temperatuur langeb eksponentsiaalselt. Osa metalli keevisõmbelse kõrvalalal kuumeneb üle plastsustemperatuuri s.o metall hakkab hakkab voolama sisepingete mõjul. Sageli loetakse, et sellise ala temperatuur on 600 °C, mõnedel andmetel 300 °C [18]. Esimese osaga jäigalt seotud teise osa temperatuur on alla plastsustemperatuuri ja seal esinevad ainult materjali elastsed deformatsioonid.

Kuna riba kuum ja külm osa on omavahel jäigalt seotud, siis plaadi jahedam osa takistab kuumema osa termilist paisumist ning külmem osa võtab mingi vahepealse pikkuse.

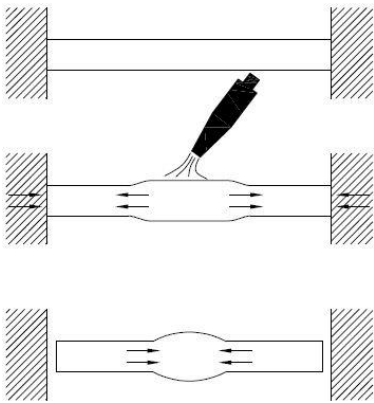
Plaadi kuumenenud osa võib tinglikult vaadelda kui tala, mis on kinnitatud kahe jäiga toe vahele (joonis 6.8). Kuumutamisel metallvarras pikeneb joonpaisumise  $\Delta l = \alpha \cdot T \cdot l$  võrra, kus  $\alpha$  on joonpaisumistegur, kuid jääkade tugev tõttu seda ei toimu ja esineb tala plastne deformeerumine ning jämenemine tavaliselt paisunud metalli mahus. Edasi vaatleme

keemisõmblusega plaadi ja tugede vahel oleva tala käitumist jahtumisel. Tala lüheneb jahtumisel joonpaisumisest tingitud pikennemise  $\Delta l$  võrra e pärast jahtumist on kuumutatud osa alati lühem kui osa, mis ei kuumenenud. Keevisõmbluse kõrvalala lüheneb ja kaugem osa on temaga jäigalt seotud ning püüab **takistada tema lühenemist**, mille tõttu tekivad keevisõmbluse kõrvalalas tõmbepinged.



Joonis 6.7. Kõverdunud terasriba pärast keevitamist

Seda nähtust võib nimetada takistatud paisumiseks ja kahanemiseks, inglise keeles terminiga *restraint*.



Joonis 6.8. Tala takistatud paisumine kuumutamisel

Kas detailide jahtumisel tekkinud sisepinged võivad viia purunemiseni? Võttes aluseks, et teras voolab sisepingete toimel temperatuuridel üle 600 °C, siis suhteline pikennemine madalsüsinikterastel oleks

$$\varepsilon = \alpha \cdot T = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 600 = 0,072 = 0,72\%$$

Selline deformatsioon ei ole ohtlik plastsete teraste puhul, kuid tuleb arvesse võtta haprate teraste korral.

Mis temperatuuril hakkab madalsüsinikteras tegelikult voolama? Vaadeldes madalsüsinikterast margiga S 235 voolavuspiiriga  $R_e = 235$  MPa, mille elastsusmoodul  $E = 2 \cdot 10^5$  MPa ning joonpaisumistegur  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$  ning võttes aluseks, et  $R_e = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta l}{l} \cdot E$ , saame  $T =$

$$\frac{235}{2 \cdot 10^5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}} \approx 100^\circ\text{C}.$$

Järelikult hakkab teras voolama tunduvalt madalamatel temperatuuridel kui 600 °C.

Jääkpingete või kõverdumise prevaleerumine sõltub terasplaadi paksusest. V. Aleksejev [25] on märkinud, et madalsüsinikterastes paksusega kuni 3 mm esineb suur kõverdumine ja

väikesed jääkpinged, paksustel 4–18 esinevad mõlemad ja paksematel plaatidel  $t = 18–60$  mm on põhilised jääkpinged.

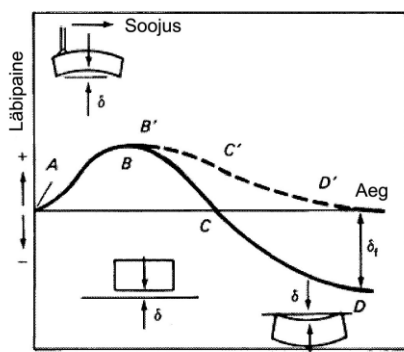
Jääkpingete mõju keevisliidetes võib kokku võtta lühidalt järgnevalt:

1. Jääkpingete mõju keevisliitele on tähtis ainult madalate rakendatud koormuste puhul ja juhul, kui võib esineda habras, väsimus- või korrosioonpurunemine.
2. Rakendatud välisjõudude kasvades jääkpingete mõju summaarsetele pingetele väheneb.
3. Keevituse jääkpingeid võib lugeda ebaolulisteks juhtudel, kui rakendatud välispinged ületavad materjali voolavuspiiri.
4. Keevituse soojussisestuse suurendamine suurendab tõmbepingete ala laiust.

## 6.2. Keevistoodete kõverdumine ja mõõtmete muutus

Keevisliide kõverdub keevitamisel, kuna kuumutatud piirkonnad kahanevad ebäühtlaselt ja tekivad jõud, mis on keevistoote ristlõike suhtes ekstsentrilised ja ei lange kokku sümmeetriateljega.

Vaatleme nelinurkse ristlõikega metallvarda kuju muutusi ajas, kui varrast ülevalt kuumutada liikuva punktikujulise soojusallikaga, näiteks gaasileegiga. Varras paindub läbi (joonis 6.9). Läbipainde suurus ja suund sõltuvad ajast. Esialgu kuumutamisel metall paisub soojusallika poole ja punktides A kuni B on läbipaine positiivne. Kui nüüd metall säilitaks elastsed omadused, siis peaks jahtumisel läbipaine kaduma ja seda kirjeldaks kõver  $AB'C'D'$ . Praktikas toimuvad kuumutamisel plastsed deformatsioonid ja varra läbipainet ajas iseloomustab kõver  $ABCD$  ning läbipaine  $\delta$ , mida võib nimetada ka kõverdumiseks (*distortion*). Graafikutelt on näha, et metalli liikumine ja kõverdumine on kuumutamisel ja jahtumisel vastassuunalised ning sama suurusega.



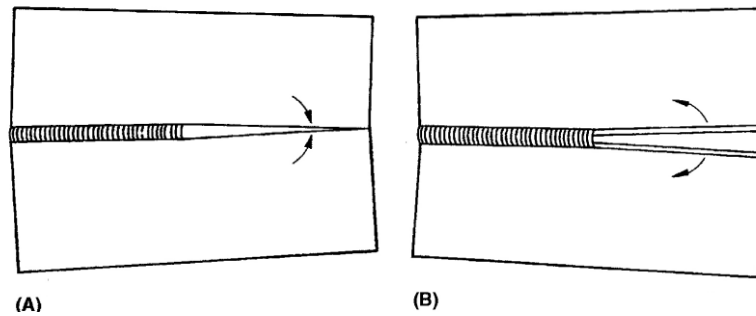
Joonis 6.9. Varda kõverdumine liikuva soojusallikaga kuumutamisel

Eelkirjeldatud mehhanismiga saab selgitada keevitamise ajal keevitatavate detailide pöördumist ja nendevahelise õhupilu muutust (joonis 6.10). Kui keevituse soojusallikas liigub piki keevisõhmblust ühest keevisõhmbuse otsast teiseni, siis saavad keevitamata osad liikuda ja pöörduda pikitelje suhtes (*rotational distortion*).

Vaatleme olukordi, kui keevitatakse suhteliselt vähe kontsentreeritud ja väikese soojussisestusega elektroodkeevitusega ja suure soojussisestusega protsessiga kas MAG- või räubustis keevitusega. Õhupilu võib detailide vahel sulguda keevitamise edenedes ja teha



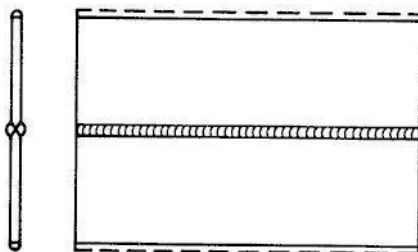
võimatuks täieliku materjali läbikeevituse saavutamise. Eeldatavasti langeb kujumuutus joonisel 6.9 toodud kõveral punktist B järgnevale lõigule. Sama õhupilu vähenemise efekt võib esineda ka juhul, kui vabalt asetatud detailide liikumist on liite lõpuosas piiratud tugelega. MAG-protsessiga keevitamise edenedes detailidevaheline õhupilu võib suureneeda. Skeemi joonise 6.9 järgi toimub detailide kõverdumine e pöördumine kõvera lõigu AB järgi.



Joonis 6.10. Detailide pöördumine ja nende vahelise õhupilu muutus keevitamisel

Keevitatud keevisliide on reeglina kokkukeevitatud detilidest lühem ja kitsam (joonis 6.11), millega tuleb arvestada toorikute valmistamisel. Keevitatud metallkonstruktsioone iseloomustab järgmised nähtused:

- a) põikkahanemine (*transverse shrinkage*),
- b) pikikahanemine (*longitudinal shrinkage*),
- c) nurgamuutus, nurkdeformatsioon (*angular change*).



Joonis 6.11. Põkkliite põikkahanemine

**Keevitusparameetrid** mõjutavad keevistoote kujumuutusi, mis on tingitud mõjuvatest kahanemisjõududest. Keevisõmbluses tekkivat kahanemisjõudu saab väljendada valemiga

$$F = 0,2 \cdot \eta \cdot \frac{U \cdot I}{V_k} = 0,2 \cdot \eta \cdot Q_e,$$

kus  $\eta$  – tegur, mis arvestab liite tüüpi, mõõtmeid ja keevitusprotsessi,

$U$  – keevituskaare pinge,

$I$  – keevitusvool,

$V$  – keevituskiirus,

$Q_e$  – keevituse soojussisestus kJ/mm.

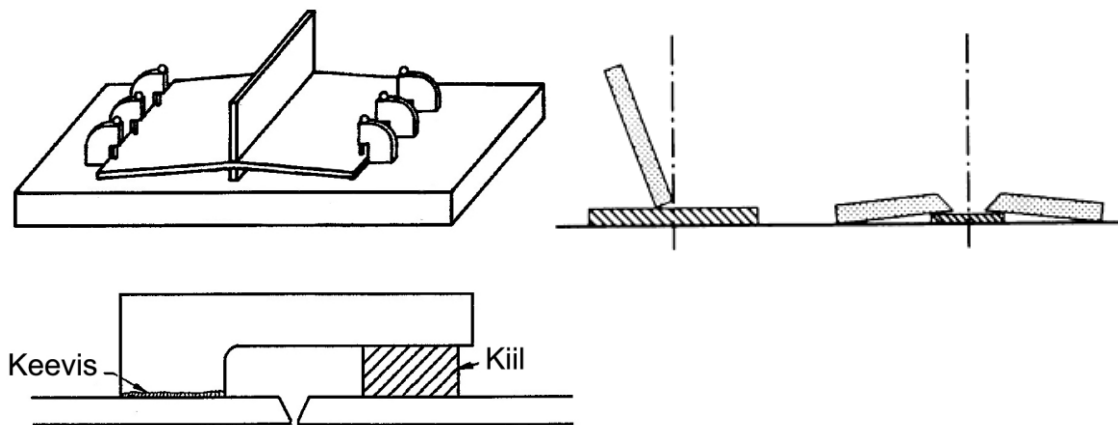
Kahanemisjõude ja toote kõverdumist on võimalik vähendada, keevitades väiksema ristlõikega, kuid suurema arvu keevisläbimitega, mis pole majanduslikult alati põhjendatud.

Kahanemise määramine reaalses metallkonstruktsioonides on keeruline ülesanne. Mõõtmete kahanemine keevistoote pikisuunas võib olla terasest põkkliidetele suurusjärgus 0,05–0,3 mm 1 meetri kohta.

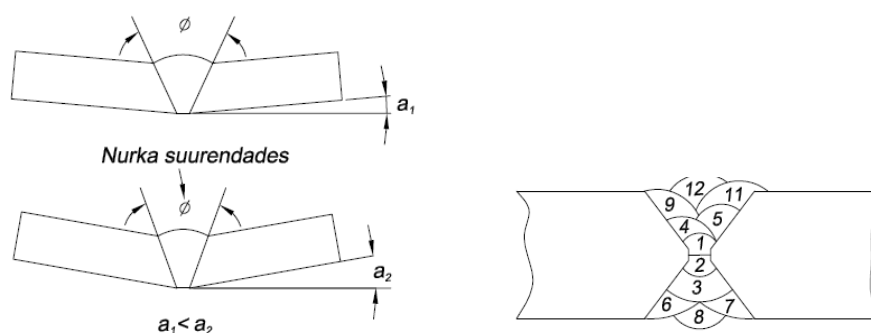
### 6.3. Keevituse jääkpingete ja kõverdumise vähendamine

**Enne keevitustööde alustamist** saab vähendada kõverdumist ja jääkpingeid järgmiste võtetega:

- 1) paigutades keevisõmblused võimalikult lähedale detailide sümmeetriatelgedele või mõlemale poole detaili sümmeetriatelge;
- 2) kasutades täpsemaid arvutusmeetodeid võimalikult väikese kõrgusega (mõõde  $a$ ) nurkõmbluste kavandamisega (minimaalne keevisõmbluse ristlõige);
- 3) kasutades paksema plaadi keevitamiseks põkkõmbluste korral võimalikult väikest detailide lahkemisenurka (minimaalne keevisõmbluse ristlõige) või kahepoolset keevitust X-kujuliste detailide servadega;
- 4) koostades ratsionaalse koostamise ja keevitamise järjestuse. Konstruktsioon jagatakse eelnevalt alamkoostudeks, andes komponentidele võimaluse omavahel liikuda keevitamise ajal;
- 5) vältida alustus-lõpetuskohtade asukohti kõrgete jääkpingete alades.



Joonis 6.12. Vastupidise painde ja kalde andmine detailidele ja nende kiiludega fikseerimine



Joonis 6.13. Faasimisnurka suuruse mõju nurkdeformatsioonile ja eelistatav X-servakuju  
**Keevitamise ajal saab vähendada kõverdumist:**

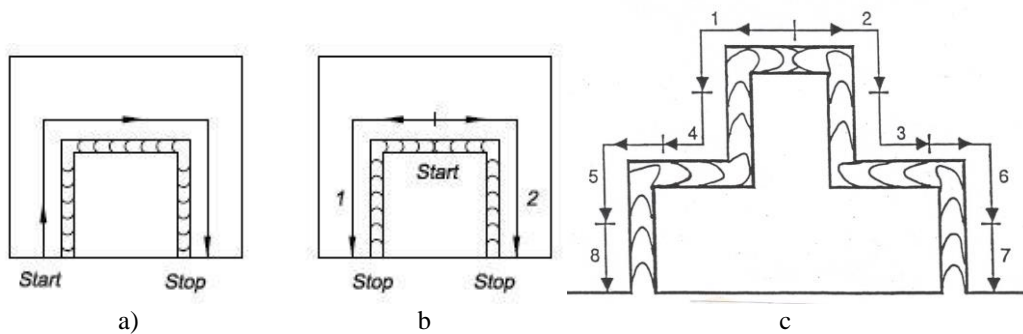
1) kinnitades detailid jäigalt rakistesse või piirates detailide liikumist ühes suunas, näiteks kiiludega jm;

2) vastupidiste deformatsioonide (läbipainde) või kaldenurga andmisega;

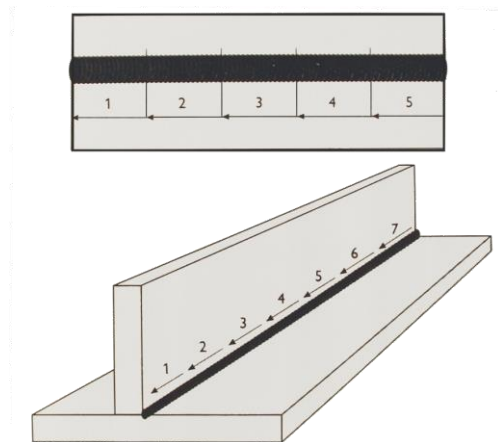
3) keevitamist tuleb alustada toote jäigemast osast ja keevitada vabade servade poole keevitamisega vastusammuliste lõikudena (joonis 6.14), plokkidena, kaskaadina või mitme kihiga. Seejuures lõikudena keevitades vältida alustus/lõpetuskohti kõrgete pingetega alades;

4) keevitamisega võimalikult väikese soojussisestusega, vähendades läbimite ristlõiget ja suurendades läbimite arvu;

5) ettekuumutuse kasutamisega temperatuurivälja erinevuste vähendamiseks.



Joonis 6.14. Keevitamine lõikudena: a) ebasoovitav keevitussuund, b) ja c) soovitatavad keevitussuunad. Numbrid näitavad lõikude keevitamise järjestust



Joonis 6.15. Keevitamine lõikudena e vastusammuga

**Keevitamise järel** saab vähendada kõverdumist ja jääkpingeid järgmiste võtetega:

- 1) mehaanilise õgvendamise presside, tungraudade jms abil;
- 2) õmbluse lähiala rullimise, valtsimise, haamritega läbitagumise teel, mis vähendavad tõmbepingeid ja venitavad metallikiude pikemaks;
- 3) kiilkuumutusega;
- 4) punktkuumutusega kindla skeemi järgi;
- 5) lintkuumutusega e joonkuumutusega ühe gaasipõleti abil või kaldlintkuumutusega;
- 6) lint- e joonkuumutusega mitme põleti abil.

**Kiilkuumutamisel** kuumutatakse gaasipõletiga kiilukujuliselt, alustades  $\sim 30^\circ$  kiilu tipust temperatuurini  $700\text{--}800^\circ\text{C}$  ja liikudes joonisel 6.17 noolega näidatud teekonda pidi. Üle-

jäänud detaili jahutatakse intensiivselt. T-tala õgvendamisel peab kuumutuskiilude vahekaugus olema 500–600 mm.

**Punktkuumutust** kasutatakse laevakorpuste, vagunite, traktorikabiinide jm õgvendamisel pärast keevitamist. Punkti läbimõõt sõltub lehe paksusest ja peab lehe paksusel  $t = 1\text{--}5$  mm olema 10–20 mm, paksemal plaadil  $t = 6\text{--}15$  mm piirides 20–30 mm. Kuumutada tuleb intensiivse terava gaasileegiga, aga ka induksioonkuumutusega nii, et vältida kõrvalala kuumenemist. Kuumutuspunktide vahekaugus detaili servast või üksteisest on ligikaudu 4 kuumutuspunkti läbimõõtu. Parim tulemus saadakse siis, kui eelnev punkt on jahtunud kuni 300 °C, näiteks jahutades ülejäänud ala suruõhu või veega. Punktkuumutusega õgvendamisel, näiteks ventilaatori katte korral, jagatakse pind kindlateks geomeetrilisteks kujunditeks (ruut, ristkülik, kolmnurk) ja kuumutatakse nende kujundite lõikepunktis, kasutades näiteks gaas-lõikepõletit võimsusega 1000 l/min. Kuumutatava punkti läbimõõt on 15 mm, vahekaugus vähemalt 4 läbimõõtu. Keevitatud katlakattekonstruktsiooni (joonis 6.20) punktõgvendamisel märgitakse kuumutuspunktid tootele. Kuumutamist alustatakse väljakumminud alalt ja minnakse järk-järgult servade poole (tähistatud suuremate ringikestega). Teisel läbimil kuumutatakse väikeste ristikestega tähistatud kohti vastaspoolelt. Pärast ebatasasuse kontrolli võib toimuda täiendav punktkuumutus ristikesega tähistatud kohtades.

**Lintkuumutus.** Suurte pindade õgvendamiseks, näiteks jäikusribide kohal, kasutatakse mitme põletiga lintkuumutust. Kasutades 3 põletiga komplekti, kuumutatakse 200...300 mm, lõikude kaupa vahele jättes katkestused ~100 mm. Alustatakse jäikusribide kohalt. Termilisel õgvendamisel välditakse termomõjutsooni kuumutamist. Põkkõmbluse nurgahälvet on võimalik vähendada, liikudes üle keevisõmbluse kiirelt ja edasi kaldu ühe põletiga (joonis 6.16). Seetõttu kaldlindiga kuumutamisel saadakse suurim õgvendusefekt siis, kui termomõjutsoon ületatakse kiiresti ilma detaile märgatavalt kuumutamata.

## Keevitusrakised

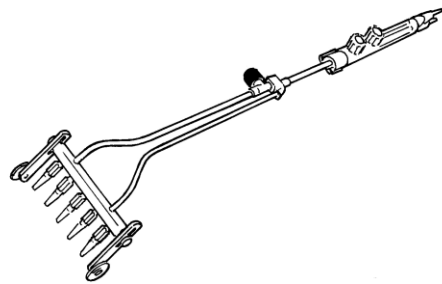
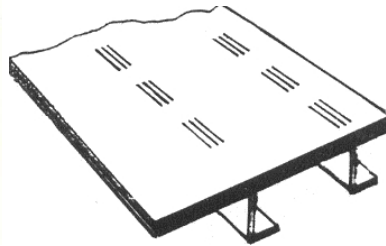
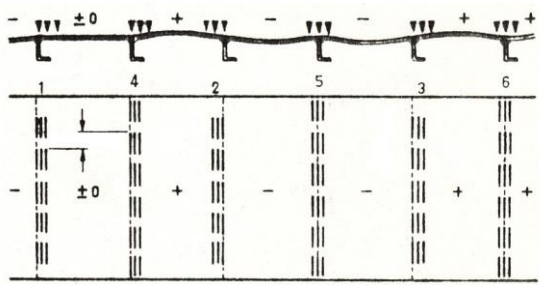
Keevitusrakiste kasutamine vähendab keevitusdeformatsioone ja tõstab tootlikkust. Eristatakse koosterakiseid ja kooste-keevitusrakiseid. Rakise valik sõltub tootepartii suurusest. Üksiktootmisel kasutatakse lihtsaid ja universaalseid rakiseid – kinnitusklambreid, pitskruvisid, kiilusid, kinnitusplaate, tugesid, koostelaudu ja -plaate, tõmmitsaid.

Keevitusrakised võimaldavad:

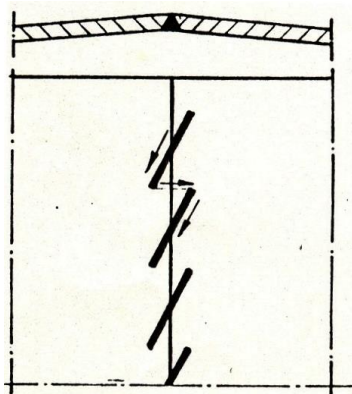
- a) korruga paigaldada ja fikseerida detailid traagelõmbluste abil;
- b) vähendada toodete deformatsioone, andes neile enne keevitamist vastupidiseid deformatsioone või kaldeid;
- c) keevitada kõige sobivamas asendis, näiteks allasendis (manipulaatorid, kanturid);
- d) ringõmbluste keevitamisel anda detailidele pöörlev liikumine (rullstendid, manipulaatorid).

Keevitusrakis koosneb jäigast raamist, detailide vastastikust asendit tagavatest elementidest – tugedest, prismadest, tornidest, alusplaatidest ja kinnitusmehhanismist. Kinnitusmehhanismid jagunevad ajami järgi mehaanilisteks, pneumaatilisteks, hüdrauilisteks ja magnetilisteks.

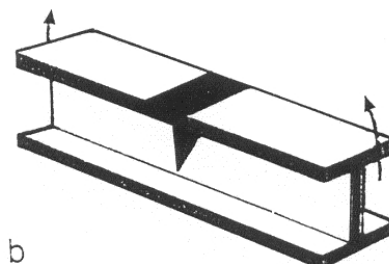
Keevitusrakiste tõhusat kasutamist piiravad nende töö- ja tugipindadele sattunud keevituspritsmed.



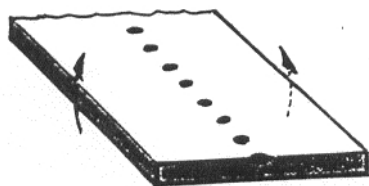
Joonis 6.16. Lintkuumutusega mitme põletiga õgvendamine ja põletite komplekt



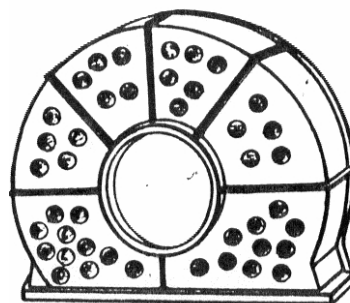
Joonis 6.17. Lintkuumutusega ühe põletiga õgvendamine



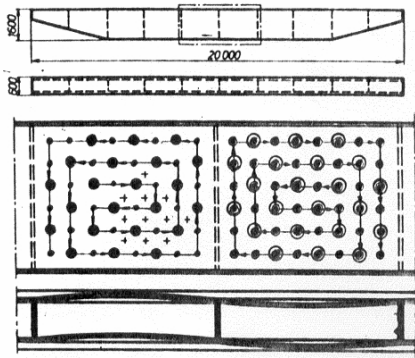
Joonis 6.18. Kiilkuumutusega õgvendamine



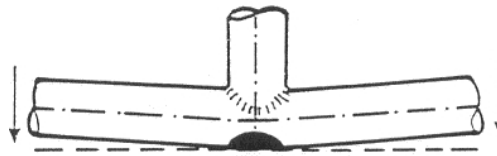
Joonis 6.19. Punktkuumutusega õgvendamine



Joonis 6.20. Ventilatori katte punktkuumutusega õgvendamine



Joonis 6.21. Katla kattede konstruktsiooni punktsoojusega õgvendamine



Joonis 6.22. Toruhargmiku õgvendamine gaasipõletiga

### Kokkuvõte

1. Metallide keevitamisega kaasneb toodete mõõtmete vähenemine, jääkpingete tekimine ja toote kujumuutused e deformatsioonid.
2. Keevisõmbluse kõrvalalal tekivad harilikult tõmbepinged. Tõmbepingetega ala laius suureneb keevituse soojussisestuse kasvuga.
3. Metall liigub keevitamisel, mis viib õhupilu muutuseni detailide vahel.
4. Keevituse kujumuutuste vähendamiseks saab kasutada meetmeid enne keevitamist, keevitamise ajal ja pärast keevitamist. Soovitav on keevitusrakiste kasutamine.
5. Keevituse kujumuutusi saab edukalt vähendada erinevate kuumutusvõtetega, mis põhinevad lokaalsel toodete kuumutamisel.

## 7. KÄSIKAARKEEVITUSE ELEKTROODID

### 7.1. Keevituselektroodide omadusi mõjutavad tegurid

Käsikaarkeevitus kattega elektroodiga e elektroodkeevitus leidis tööstuslikku kasutamist pärast Oscar Kjellbergi kattega elektroodi patenteerimist 1907. a Rootsisis laevaremondi eesmärkidel.

Elektroodkeevituse osatähtsus on aasta-aastalt vähenenud. Statistika näitab, et 2008. a moodustas elektroodkeevitus arenenud Euroopa riikides ja USAs 12–15% üldisest keevitustööde mahust, kuid Hiinas ja Indias kuni 60% .

Olgugi et elektroodkeevituse on välja tõrjunud MAG-keevitus, on tööstusharusid ja olukordi, kus selle keevitusprotsessi kasutamine on nõutav: välitingimustes ehituskonstruktsioonide ja torustike keevitamisel, katelde remondil jm nõutakse elektroodkeevituse kasutamist. Vastutusrikkad õmblused tehakse selle keevitusprotsessiga, sest nii välditakse MIG/MAG-keevitusele omase ohtliku keevitusdefektiõmbluse servade kokkusulamatuse esinemist. Elektroodkeevitus nõuab keevitaja kõrgeid kutseoskusi ja ei ole põhimõtteliselt mehhaniseeritav, mistõttu huvi selle protsessi vastu on vähenenud.

Elektroodkeevitusel kasutatav keevituselektrood kuulub laiemas mõttes keevitusmaterjali e keevituse lisametalli (*consumable, filler metal*) hulka.

Teraste käsikeevituselektrood koosneb vähese süsinikusisaldusega (alla 0,1%) või kõrgleegerterasest vardast ja elektroodikattest. Keevismetalli omaduste juhtimiseks võidakse varrast legerida Ni, Cr, Mo, Cu, aga ka mikrolegeerelementidega, nagu B, Ti, Nb, Al. Madallegeerteraste keevituselektroodidel viiakse põhilised legeerelemendid – Ni, Cr, Mo – kattesse, mistõttu õmblusmetalli legerimine toimub katte kaudu. Kõrgleegerteraste keevitamisel on legeerelemendid viidud elektroodivarda koostisesse. Turule on ilmunud nn süntetilised roostevabad elektroodid, kus kasutatakse madalsüsinikterasest elektroodivardaid ja legeerelemendid on viidud katte koostisesse. Nii on võimalik keevitada suurema vooluga ja saavutada kõrgemat tootlikkust. Keevituselektroode iseloomustatakse nende läbimõõdu ja pikkusega, mis on standarditud.

Keevituselektroodi läbimõõdu all mõeldakse metallvarda läbimõõtu, mis standardsetele elektroodidele on reas 1,6-2,0-2,5-3,2-4,0-5,0-6,0 mm tolerantsiga läbimõõdule  $\pm 0,06$  mm. Elektroodide pikkus on standarditud 200-300-350-450 mm. Keevituselektroode iseloomustavad järgmised omadused:

- a) kaare süüdatavus ja taassüüdatavus,
- b) kaare stabiilsus,
- c) vardametalli siirdeviis sulamisel,
- d) pritsmete tekkimine ja nende hulk,
- e) sula keevismetalli voolavus ning juhitevus, asendi omadused,
- f) räbu iseloom, kaitseomadused, voolavus ja eemaldatavus,
- g) õmbluse juure läbikeevitusvõime,
- h) õmbluse kuju (kumer, nõgus), õmbluse kõrgus ja üleminek põhimetallile, õmbluse pinna tasetasus.

Tänapäeval on saadaval lai valik elektroode erinevate nõudmiste tarvis. Elektroodikate koosneb suurest hulgast (15–20) pulbrikujulistest komponentidest, mis omavahel seotud sideainega.

Elektroodikatte ülesanded on järgnevad:

- elektroodimetalli tilkade kaitse siirdeprotsessis, keevitusvanni kaitse õhu keskkonna eest räbu ja eralduvate gaaside poolt;
- keevituskaare stabiilsuse parandamine, eriti keevitades vahelduvvooluga. Kaart stabiliseerivaks e ioniseerivateks lisanditeks on Ti, Zr ja Mg ühendid;
- legerivate ja deoksideerivate ainete lisamine. Kate võib sisaldada rauapulbrit;
- tagada piisav läbikuumitus, mis saavutatakse head soojusülekanne tagavate karbonaatidest ja tselluloosist eralduvate gaaside kasutamisega.

Keevituselektroode iseloomustatakse keevismetalli siirdatava vesiniku kogusega HD milliliitrites 100 g keevismetalli kohta, mida tähistatakse elektroodide klassifikatsioonis tähisega H5, H10 jne.

Elektroodide tootlikkust iseloomustab nende **efektiivsus** e **elektroodimetalli väljatuleku tegur** (*efficiency, recovery*)

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

kus  $m_{km}$  – sulatatud keevismetalli mass,  
 $m_{el}$  – sulanud elektroodivarda mass.

Elektroode  $\alpha_s < 105\%$  loetakse normaaltootlikeks, 105–130% kõrgendatud tootlikkusega ja  $>150\%$  kõrgtootlikeks. Suurim  $\alpha_s$  väärtus on 260%. Kõrgtootlikud elektroodid sobivad tavaliselt allasendis keevitamiseks.

## 7.2. Keevituselektroodide katete tüübid

Elektroodikatte koostise ja omaduste järgi liigitatakse kattega elektroode happelisteks (A), rutiilseteks (R), tselluloosseteks (C), aluselisteks (B), paksrutiilseteks e kõrgtootlikeks (RR), happelis-rutiilseteks (RA) ja aluselis-rutiilseteks (RB), rutiil-tselluloosseteks (RC). Elektroodikatte tüüp mõjutab keevismetalli mehaanilisi omadusi ja keevitamise sooritustehnikat.

### Happelised elektroodid

**Happelise kattega e happelised** elektroodid (tähistuses A täht) sisaldavad happelisi Mn, Si ja Fe okside ja ferromangaani. Oksiidide lagunemisel suhteliselt madalal temperatuuril eraldub hapnik, mis vähendab sula keevitusvanni pindpinevust ja suurendab tema voolavust. Väikese keevismetalli pindpinevuse tõttu esineb peentilksiire, millega kaasnevad väikesed keevitusvoolu ja kaare pinged muutused. Seetõttu keevituskaare võimsus  $P = U_k \cdot I_k$  on suur ja elektroode nimetatakse "kuumalt" keevitatavateks. Saavutatakse suur läbisulatus ja keevituskiirus. Liikuva sulakeevismetalli ja rikkalikult moodustuva räbu tõttu on raske keevitada ruumiasendites. Kasutatakse põhiliselt keevitamiseks allasendis. Keevisõmbluse pealispind on väikese konarlusega ja sile. Räbu hästi eemaldatav. Tardunud räbu kõrge aktiivsuse tõttu ei ole alati vaja õmbluse servade puhastamist õlist, tagist ja veest. Õmblusmetall vastab oma koostiselt keevale terasele. Keevitamisel eralduvad Mn aurud on mürgised ja tänapäeval selliste elektroodide kasutamine on piiratud ning nad asendatakse rutiilkattega elektroodidega. Happelise katte komponente kasutatakse nn kombineeritud katete (RA) koosseisus.



## Tsellulooskattega e tsellulooselektroodid

**Tsellulooskattega** elektroodid (C) sisaldavad kattes palju orgaanilisi gaasitekitajaid aineid (nt tselluloos, tärklis), neid iseloomustab keevituskaare suur võimsus ja hea läbisulatusvõime. Räbu jahtub suhteliselt kiiresti, mistõttu sobivad asendikeevitusteks suure vooluga, näiteks torujuhtmete keevitamiseks ülalt alla PG asendis. Kate sisaldab palju niiskust, mistõttu ei sobi tugevamate teraste keevitamiseks. Keevismetalli mehaanilised omadused ei ole kõrged.

## Rutiilelektoodid

**Rutiilkattega** e rutiilelektoodid (R). Elektroodikate sisaldab suures koguses rutiili (25–45%)  $\text{TiO}_2$ , millel on hea elektrijuhtivus. Seetõttu on kaar hästi süüdatav ja taassüüdatav ning saab keevitada ka vahelduvvooluga. Elektroodivarda siire keevitusvanni toimub keskmise suurusega tilkadena. Suhteliselt lihtne keevitada, keevituskaar on püsiv, esineb vähe pritsmeid, õmbluse pind on sile ja sujuva üleminekuga põhimetallile, räbu on kergesti eemaldatav.

Rutiilkattega elektroodid jagunevad õhukesekattelisteks, paksukattelisteks ja kombineeritud kattega elektroodideks.

Õhukese kattega elektroodidega keevitades tekib kiiresti tarduv räbu, mis toetab sulakeevitusvanni ja seetõttu sobivad hästi keevitamiseks ruumiasendites. Keevituskaar on intensiivne gaasi moodustavate ainete ja nende kaudu parema soojusülekande tõttu. Kuna keevismetalli hapnikusisaldus on küllaltki kõrge ( $\text{HD} = 40\text{--}50\text{ml}/100\text{g}$  keevismetalli kohta), siis ei saa garanteerida keevisõmbluse paremaid mehaanilisi omadusi, eriti löögisitkust madalatel temperatuuridel. Üldjuhul keevitatakse nende elektroodidega teraseid voolavuspiiriga alla  $350\text{ N/mm}^2$ . Sobivad hästi õhukese pleki keevitamiseks, vooluallikadena kasutatakse nii vahelduvvoolu trafodest kui ka alalisvoolu.

Paksukatteliste (tähistus RR) elektroodide kate, tuntud ka kõrgtootlike elektroodide (*high-yield electrodes*) nimetuse all, sisaldab suurel hulgal rauapulbrit, tekib palju raskestijuhitavat räbu. Seetõttu eelistatakse kasutada keevitamiseks allasendis.

Rutiilkatet kasutatakse laialdaselt roostevabade elektroodide valmistamisel.

Kombineeritud rutiilaluselised (RB) ja rutiiltselluloossed (RC) elektroodikatted on kombinatsioon mõlema elektroodikatte positiivsetest omadustest ja leiavad laialdast kasutust.

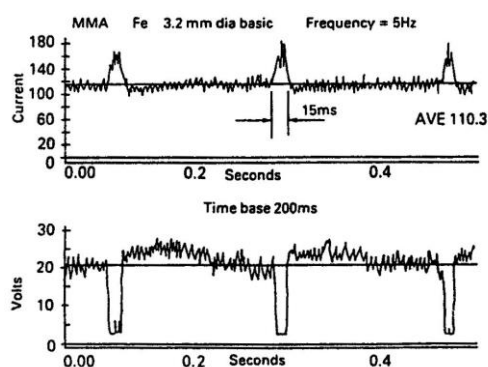
## Aluselised elektroodid

**Aluselise kattega** e aluselised elektroodid (B). Kate koosneb põhiliselt  $\text{CaCO}_3$  ja  $\text{CaF}_2$ . Reaktsiooni  $\text{CaF}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HF} + \text{CaO}$  tulemusena väheneb keevismetalli vesinikusisaldus ja ka vesinikpragude risk. Esimene katte komponent tagab kaare hea gaasikaitse. Aluselise räbu desoksüdeerivad omadused on head ja keevismetall on metallurgiliselt puhas. Võrreldes rutiil- ja happeliste elektroodidega annavad need madalama sulamistemperatuuriga räbu, mistõttu rübupesade tekke risk on madal isegi siis, kui räbu ei ole läbimite järel täielikult eemaldatud. Sobivad keevitamiseks ruumiasendites e asendikeevituseks.

Puuduseks on jäme ja konarlik õmbluse pind, õmbluste kumer väliskuju ja järsk üleminek põhimetallile. Reeglina ei eraldu räbu nii hästi kui teistel kattetüüpidel.

Katte materjalil on madalad ionisatsiooniomadused, mistõttu tuleb tavaliselt keevitada vastupolaarse alalisvooluga ( $\text{DC}^+$ ). Kaare süütamiseks lisatakse sageli kattes tsirkoonium- ja titaanoksiide. Turul on saadaval ka vahelduvvooluga keevitavad elektroodid, kus kasutatakse kahekihilisi elektroodikatteid, mille väliskihis sisalduvad fluoriühendid ei halvenda kaare ioniseerumist ja põlemist.

Elektroodimetall siirdub keevismetalli jämedate tilkadena, mis lühistavad kaarevahemiku ( $U_k \rightarrow 0$ ), väheneb kaare võimsus ja energiavoog õmblesse (joonis 7.1). Seetõttu nimetatakse neid elektroode ka "külmalt" keevitavateks. Siirdemehhanismi tõttu sisaldab keevismetall vähe hapnikku, mistõttu keevismetalli suurema pindpinevuse tõttu on nurkõmbused kumeramad ja põkkõmbused järsu üleminekuga. Nüüdisaegsetel elektroodidel on saavutatud koostise täiustamisega sujuv üleminek põhimetallile. Sobivad paremini keevitamiseks ruumiasendites. Minimaalse õmblesmetalli hapnikusisalduse tõttu säilib hea löögisitkus miinustemperatuuril tavaliselt kuni  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ , üksikjuhtudel kuni  $-60\text{ }^\circ\text{C}$ . Keevismetalli vesinikusisaldus (ml/100g keevismetallis) on madal ja määratud paljude elektroodide tähistuses tähistega H3, H5, H10, H15.



Joonis 7.1. Keevitusvoolu ja kaarepinge muutused keevitamisel aluseliste elektroodidega

Aluseliste elektroodidega keevitamisel on vaja heade kutseoskustega keevitajaid, sest on vaja keevitada lühema kaarega pikkusega 2–3 mm, vastasel korral võivad keevismetallis tekkida lämmastiku poorid. Kuna keevismetall on metallurgiliselt puhas ja kõrge viskoossusega, siis on oht, et keevitamise alustuskohtades võivad kuni põhimetalli kuumenemiseni tekkida räbupesad ja gaasipoorid, kuna räbu ja gaasid ei jõua tõusta keevitusvanni pinnale enne selle tardumist. Seetõttu tuleb kasutada nn alustus-lõpetusplaate, mis keevitatakse kergelt detailide külge.

Aluseliste elektroodide puuduseks on samuti nende suur niiskuseimavus, mis suurendab õmblesmetalli vesinikusisaldust, külmpragude ohtu, pritsmeid, poore. Viimastel aastatel on turule ilmunud niiskuskindlad aluselised elektroodid, näiteks tootenimetuste LMA (*low moisture absorption*); MR (*moisture resistant*) ja R (*resistant*) all ning need ei vaja enne kasutamist kuivatamist.

## Keevituselektroodide klassifikatsioon

Teraste keevituselektroodid klassifitseeritakse e liigitatakse rahvusvaheliste standardite järgi nelja rühma: ISO 2560A ja varasemalt EN499 – leegerimata ja madallegeerterateraste jaoks, EN1599 – kuumustugevate teraste jaoks, EN757 – kõrgtugevate teraste jaoks volavuspiiriga 550-890 MPa, EN1600 – roostevabade ja kuumuspüsivate teraste jaoks. Elektroodide klassifikatsiooni näited on toodud kirjanduses [4, 29].

Mitteleeger- ja madallegeerteraste keevituselektroodide klassifikatsioon ISO2560 A järgi jaguneb neljaks, kõrgtootlike elektroodide oma viieks osaks. Alguses toodud täht E näitab, et tegu on keevituselektroodiga. Järgnevad kaks numbrit näitavad õmblesmetalli volavuspiiri  $\text{kgf/mm}^2$  ja katkevenivust. Kolmas number tähistab õmblesmetalli purustustöö löökpaindel (etteantud temperatuuril) tunnusnumbrit. Järgnevad üks või kaks tähte näitavad elektroodi-

katte tüüpi. Järgmine number tähistab voolu tüüpi ja tõhusust, edasi on tunnusnumber (1...5), mis näitab keevitusasendit. Kui järgneb täht H, siis piiritletakse õmblusmetalli vesinikusisaldust. Kasutatakse täielikku või lühendatud (4...7 sümbolit) tähistust.

Kõrgleegerteraste elektrootide tähistuses kasutatakse põhitähisena keemilise koostise tähist.

### 7.3. Keevituselektrootide ja keevitusparameetrite valik

Mitteleegerteraste keevituselektrootid valitakse põhimetalli mehaaniliste omaduste järgi ja kõrgleegerteraste elektrootid keemilise koostise järgi.

Keevituselektrootide tekitatud keevismetalli omadused määratakse laia servavahemikuga keevitatud keevisõmblusest väljalõigatud teimikute testimisega. Kui valitakse põhimetalli omadustele vastav keevitusmaterjal (*matching filler metal*), siis tootmistingimustes ei saa neid näitajaid saavutada, mistõttu tuleb sageli valida mõnevõrra tugevam keevismetall (*overmatching filler metal*).

Teatud juhtudel, näiteks kui õmblusele ei ole esitatud võrdtugevuse nõudeid, võidakse erandina kõrgtugevate teraste keevitamisel esimese keevituslõbimi keevitamiseks valida mõnevõrra madalamate mehaaniliste omadustega keevituselektroot (*undermatching filler metal*). Nii paraneb keevismetalli sitkus ja väheneb vesinikpragude risk.

Tuleb valida majanduslikult põhjendatud elektrootid, millega tagatakse kvaliteedinõudeid rahuldavad keevisõmblused. Erandi moodustavad laevad, surveanumad, katlad, kus kasutatakse järelevalve ametkondade määratud aluselise kattega elektroote.

Üldiselt kasutatakse ehituskonstruksioonide valmistamisel rutiil- ja rutiiltsellulooskattega elektroote, tugevamate vesinikpragudele kalduvate teraste keevitamisel aga aluselise kattega elektroote. Torude ja torustike keevitamisel on kasutatud tsellulooskattega elektroote.

Toome mõningad soovitusel elektrootide valikuks katte tüübi järgi [29].

Detalle fikseerivaid lühikesi (10–20 mm) traagelõmblusi e sildamist tehakse üldjuhul rutiilkattega elektrootidega (R-, RR-, RC-kate).

Terasest paksusega kuni 6 mm ehituskonstruksioonide keevitamiseks sobivad elektrootid E 42 0 RC 11. Saab kasutada nii vahelduvvoolu kui ka alalisvoolu ja keevitada kõigis ruumi-asendites.

Elektroot E 42 2 RB 12 sobib ehituskonstruksioonide ja torustike keevitamiseks. Aluselise komponendi lisamine suurendab räbu vedelvoolavust ja parandab keevitusvanni jälgitavust. Elektrootid E42 2 B 74 ja E 38 0 RR 54 on kõrgtootlikud elektrootid keevismetalli väljatulekuga kuni 240%, s.o keevismetall koosneb 100% elektrootivarda metallist ja 140% kattes olevast metallipulbrist. Sobivad pikkade ehituskonstruksioonide nurkõmbluste keevitamiseks.

Elektroot E 42 2 C 25 leiab kasutamist torustike keevitamisel asendis ülalt-alla. Eraldub palju keevitussuitsu ja tekib palju pritsmeid. Kasutatakse vastupolaarsusega alalisvoolu, mitme lõbimiga õmbluste korral juurelõbimi keevitamisel päripolaarset voolu. Vajalik vooluallika kõrge tühijooksupinge.

*Elektrooti lõbimõõt* valitakse materjali paksuse, õmbluse servakuju ja õmbluse ruumilise asendi järgi. Asendiõmblused tehakse peenemate elektrootidega (lõbimõõt alla 4 mm). Nurkõmbluste keevitamisel valitakse elektrooti lõbimõõt õmbluse kaateti ja asendi järgi. Rusikareeglina valitakse madalsüsinikteraste keevituselektrootide lõbimõõt lehe paksusel kuni 3...4 mm ligikaudselt võrdselt materjali paksusega (tabel 7.1).

Elektroodi läbimõõt lehe paksuse järgi

Paksus mm	1–2	3	4–5	6–12	≥ 13
Läbimõõt mm	1,5–2	3	3–4	4–5	≥ 5

**Keevitusvoolu** tugevus sõltub elektroodi läbimõõdust, põhimetalli paksusest ja serva-vahemiku kujust, keevitusläbimõttest (juure- või täitvad läbimid), elektroodi tüübist, keevitus-asendist, põhimetalli soojusjuhtivusest jm. Keevitusvoolu ligikaudseks määramiseks kasu-tatakse järgmisi valemeid:

$$I_k = 60 (d_{el} - 1);$$

$$I_k = 6 d_{el}^2 + 20 d_{el};$$

$$I_k = 40 d_{el} \text{ (aluseline elektrood, süsinikteras);}$$

$$I_k = 30 d_{el} \text{ (rutiilelektrood, roostevabale terasele).}$$

Püstõmbuste keevitamisel tuleb keevitusvoolu vähendada 15%, laeõmbuste korral 10%.

Keevituskaare pinget keevitamisel ei reguleerita ja see sõltub kaare pikkusest, keevitus-voolust ning katte tüübist, standardtingimustel saab määrata valemiga

$$U_k = 20 + 0,04 \cdot I_k.$$

### Elektroodide ladustamine ja tööks ettevalmistamine

Elektroode tuleb hoida ladudes tootjate poolt piiritletud aja jooksul temperatuuril  $T \geq 15 \text{ }^\circ\text{C}$  ja alla 60% niiskusega ruumis. Tavaliselt on see 3–5 aastat, kuid standardi EN1090-2 järgi teras-konstruktsioonide valmistamisel avatud pakendite korral mitte üle 2 aasta. Rutiilkattega elektroode reeglina ei kuivatata, kuid kui neid on üle ühe nädala hoitud avatud pakendis või on nad niiskust saanud, siis tuleb kuivatada 80–120 °C kahe tunni jooksul. Seejuures tuleb vältida ülekuumutamist.

Aluseliste elektroodide korral on vaja neid kuivatada tootja soovitude kohaselt 300–400°C, eriti tugevamate teraste keevitamisel. Kui elektroodipakend on avatud ja kasutamata elektroodid korjatakse pakendisse, siis võib neid hoida hoidmiskapis +150 °C kuni 3 kuud. Keevitaja töökohal tuleb elektroode hoida kuumutatavas torbikus +70–120 °C kuni 4 tundi. Kui elektroodid on vahepeal niiskunud, siis tuleb nad kuivatada +350–400 °C kuni 5 korda [4]. Niiskust mitteimavad, näiteks LMA-tüüpi elektroodid ei vaja kuivatamist, Roostevaba terase elektroodid ei vaja samuti, kui neid hoitakse niiskuskindlas pakendis töökohal kuni 8 tundi.

### Kokkuvõte

1. Süsinikteraste käsikaarkeevituse elektroodid valitakse põhimetalli tugevusomaduste järgi, elektroodikatte tüüpi arvestades. Roostevaba terase elektroode tähistatakse ja valitakse keemilise koostise järgi.
2. Keevituselektroodi katte tüüp määrab elektroodimetalli siirdeviisi, õmbuse kuju jt keevitustehnoloogilised omadused.
3. Aluselise kattega elektroode kasutatakse põhiliselt vastutusrikaste konstruktsioonide ja toodete valmistamisel, kusjuures tuleb täita elektroodi valmistaja juhiseid kuivatamise, ladus-tamise ja hoidmise osas ning kasutada erinevat keevitustehnikat.

## 8. MIG/MAG-KEEVITUS

Kaarkeevitust (MAG-keevitus – MAG welding, USAs GMAW) sulava elektroodiga kasutatakse teraskonstruktsioonide valmistamisel töökodades (täisraat tunnusnumbriga 135 ja täidistraat tunnusnumbriga 136). MIG-keevitus (MIG welding, tunnusnumber 131) toimub inertse kaitsegaasi keskkonnas ja leiab põhiliselt kasutamist alumiiniumi keevitamisel. Varasemas kirjanduses nimetati sageli neid keevitusprotsese süsihappegaaskeevituseks või poolautomaatkeevituseks.

Keevitusprotsessi iseloomustab kõrge tootlikkus, mis on tingitud suurte keevitusvoolude 80...500 A rakendamisest ja väikesest keevitustraadi läbimõõdust (0,8–2,0 mm) põhjustatud suurest voolutihedusest 100...500 A/mm<sup>2</sup>. Suurt voolutugevust võimaldab kasutada asjaolu, et keevitusvool juhitakse keevituselektroodile vahetult enne keevituskaart keevituspüstolis oleva voolukontakti kaudu.

Keevitusprotsessi kasutatakse kõikide keevitatavate metallsete materjalide puhul: mitteleeger-, madalleeger- ja kõrgeleegerterased, alumiiniumi-, vase- ja niklisulamid. Olenevalt keevitatavast materjalist valitakse kaitsegaasi liik.

Lehtmaterjali saab keevitada väga suures paksusvahemikus. Minimaalseks loetakse umbes 0,6 mm paksust terast ja ülemist piiri praktiliselt pole. Selline suur materjali paksusvahemik on võimalik keevitusparameetrite ja keevituskaare tüüpide laia reguleerimisvahemiku tõttu. Keevitusprotsessi saab kasutada kõigis ruumilistes asendites ja üldiselt sisetingimustes. Väliingimustes ja ehitusplatsidel võib tõmbetuul rikkuda keevituskaare gaasikaitset.

MAG-keevituse põhipuudused on: paksu materjali – faasitud materjali keevitamisel esineb sageli raskesti avastatavat keevitusdefekti – servade kokkusulamatust; tõmbetuule ja püstoli teatud kaldenurkade ning pritsmete korral püstoli suudmikus võivad tekkida keevisõmbluses poorid.

Arenenud riikides tehakse 70–80% keevitustöödest MIG/MAG-keevituse abil. Tuleb märkida, et kuigi võrreldes käsikaarkeevitusega on protsess sooritustehniliselt ja ergonoomiliselt lihtsam, tuleb siiski rohkem reguleerida keevitusparameetreid. Keevitusprotsessi võimalused on avardunud seoses protsessi juhtimisega invertervooluallikate ja tarkvara abil. Elektroonsed vooluallikad on välja tõrjunud lihtsa konstruktsiooniga nn trafomasinad e tavamasinad. Tänapäevased masinad on varustatud lisafunktsioonidega, mis hõlbustavad keevitaja tööd ja parandavad kvaliteeti.

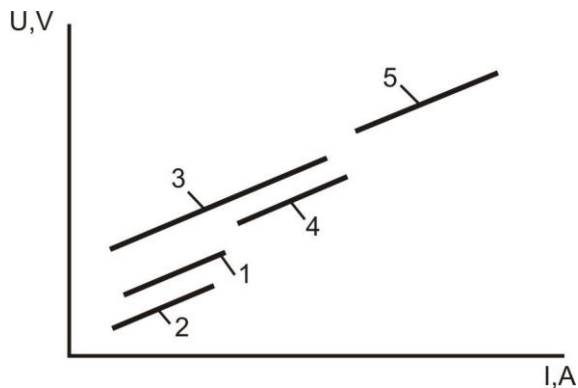
MIG/MAG-keevituse seadme ehitust ja seadistamise põhimõtteid on kirjeldatud kirjanduses [3]. Edaspidi käsitletakse trükises inseneri pädevusse kuuluvaid küsimusi, mis on seotud keevitustraaside, kaitsegaaside valikuga ja keevisõmbluste kvaliteeti ning kuju mõjutavate teguritega.

### 8.1. Kaaretüübid ja elektroodimetalli siirdeviisid

MIG/MAG-keevitusel seostatakse elektroodi siirdeviisi e mehhanismi kaare pingega ja kaitsegaasi tüübiga. Levinuim lähenemine on kirjeldada elektroodimetalli siiret 3 mehhanismi abil:

- lühistega,
- jämetilkadena,
- peentilkadena.

Olenevalt siirdemehhanismist eristatakse kaaretüpe, millele eespool nimetatutele lisanduvad veel impulsskaarega, pöörleva ja forsseeritud kaarega keevitamine.



Joonis 8.1. Keevituskaare ja keevitusprotsesside põhitüüpe: 1 – lühikaar, 2 – CMT, Cold Arc, 3 – impulsskaar, 4 – vahekaar, 5 – pihustuskaar

Standardi EN ISO 4063 järgi eristatakse ja tähistatakse tehnoloogiadokumentatsioonis järgmisi siirdeviise ja kaaretüpe, millele on lisatud Saksa standardi kohaselt DIN 1910 toodud pikk-kaar.

Tabel 8.1

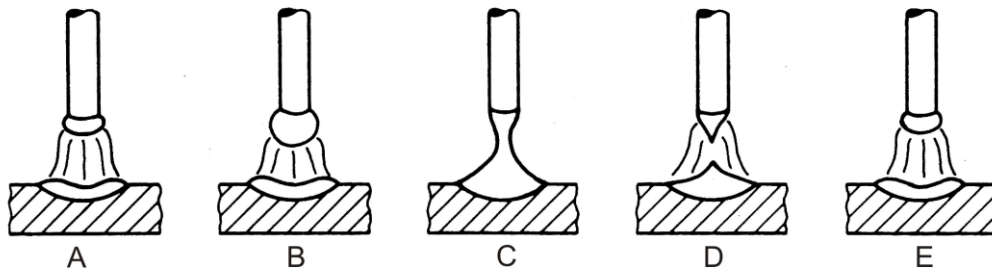
Elektroodimetalli siirdeviisid ja kaaretüübid

Siirdeviisi tunnustäh	Tunnustäh Saksa standardites	Inglisekeelne termin	Eestikeelne nimetus (sulgudes kaaretüüp)
D	k	<i>Short-circuit transfer (dip transfer)</i>	Lühistega siire (lühikaar), ühtlane siire
G	ü	<i>Globular transfer</i>	Jämetilksiire (vahekaar), osaliselt lühistega, osaliselt ilma, ebakorrapärane siire
S	s	<i>Spray transfer</i>	Peentilksiire (pihustuskaar), ilma lühisteta ühtlane siire
P	p	<i>Pulse transfer</i>	Impulss-siire, pulss-siire (impulsskaar, pulsskaar), ilma lühisteta ühtlane siire
	l	<i>Repelled transfer, nonaxial globular transfer, long arc</i>	Pritsmetega jämetilksiire (pikk-kaar).

Keevituskaare tüüpide tähistamist nõutakse keevitusprotseduuri heakskiidu standardis EN ISO 15614-1 ja siirdeviis kantakse keevitusprotseduuri spetsifikaadile (WPS-ile). Vaatleme levinuimaid siirdeviise.

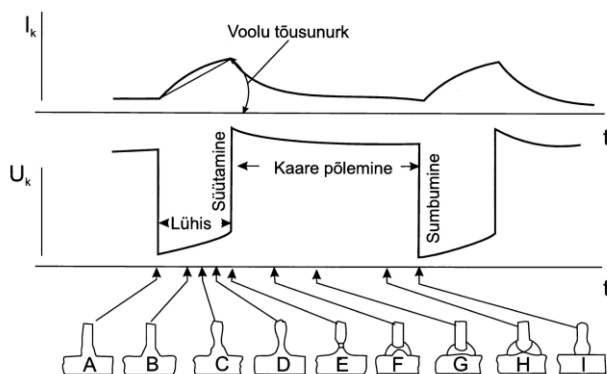
## Lühikaar

Lühikaar e lühiskaar (*short circuiting arc, short arc*) esineb madalamatel kaarepingetel  $U \leq 15\text{--}20\text{ V}$  ja väiksematel keevitusvooludel  $I = 50\text{--}190\text{ A}$ . Tekib keevitamisel väike ja kiiresti tarduv keevitusvann, mis sobib õhukese materjali keevitamiseks, aga samuti erinevates keevitusasendites ning suure õhupiluga detailide keevitamiseks. Keevituspritsmeid eraldub vähe. Metall siire toimub sellel ajavahemikul, kui elektroodi ots on kontaktis sulakeevitusvanniga (joonis 8.2), ei ole elektroodimetalli siiret läbi kaarevahemiku.



Joonis 8.2. Keevismetalli siire lühistega

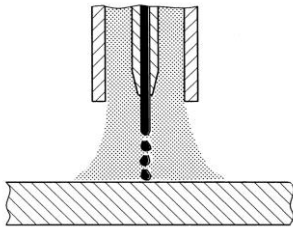
Keevitustsüklis saab eristada lühise- ja kaareperioodi. Olenevalt paljudest teguritest (nt kaarepingest) võib lühiseid olla vahemikus 20–200 sekundis. Lühiste arv sekundis mõjutab keevitusvoolu keskmist väärtust ja keevituskaare võimsust. Joonis 8.2. kirjeldab eri ajahetkedel siirde nähtusi seostatuna keevitusvoolu ja kaarepingega. Algul traadi ots lühistab vooluahela kontaktis keevitusvanniga (A), tekib sulakeevismetalli tilk, mis pindpinevusjõudude toimel omandab sfäärilise kuju. Edasi liigub sulametalli tilk keevitusvanni poole (B ja C) ja tekib Pinchi elektromagnetjõust tingitud nn kael, sulametalli tilk eemaldub traadi otsast (etapid D ja E) ning taas süttib kaarlahendus. Tähtsat rolli mängib voolu kasvukiirus. See peab olema piisav elektroodi kuumutamiseks ja metallitilga siirdamiseks, kuid piisavalt väike, et vältida pritsmete tekkimist. Tavavooluallikates kontrollitakse voolu tõusu vooluallika väljundahela induktiivsuse muutmise kaudu. Kui kaarevahemik lühistub siirde käigus, siis tavaliselt kaare pinge läheneb nullile, keevituskaare võimsus väheneb ja ühtlasi väheneb läbikeevituse suurus (joonis 8.3). Kuna tegemist on suhteliselt suurte metallitilkadega, siis nende väikese pindala tõttu metall rikastub vähem hapniku ja lämmastikuga ning saadakse suure pindpinevusega ja nn metallurgiliselt puhas keevismetall, mis sageli põhjustab nii halba õmbluse servade märgamist e ülemineku sujuvust põhimetallile kui ka nurkõmbluste kumerust.



Joonis 8.3. Keevituskaare pinge ja keevitusvoolu muutused lühikaarkeevitusel

## Pihustuskaar

Suuremate keevitusvoolude  $I = 175...350$  A ja kaarepingete  $U_k = 18...35$  V puhul ning argoonipõhjaliste segugaaside kasutamisel esineb peenetilgaline pihustusstiire (*spray transfer, free light transfer*) ilma kaarevahemiku lühisteta. Ülekanduvate metallitilkade läbimõõt on väiksem traadi läbimõõdust. Eristatakse kriitilist keevitusvoolu (*transient current*), mille korral stiire toimub peenikeste tilkadena. Keevituskaar on stabiilne ja suure energiaga. Keevisõmbluse pind on sile ja tekib vähe pritsmeid. Elektroodimetall rikastub hapnikuga siirdeprotsessis ja selle pindpinevus väheneb kaitsegaasi toimel ning kõrgema kaare temperatuuri abil, mille tulemusena saadakse elektrodünaamiliste jõudude toimel peentilksiire. Keevismetall on voolav ja märgab hästi õmbluse servi, kuid seetõttu saab keevitada **ainult allasendis**. Saadakse nõrgasid nurkõmblused. Kuna õmblusmetall ei ole metallurgiliselt puhas, siis liite löögisitkus ja plastsus ei ole eriti kõrged. Saab keevitada suure tootlikkusega paksemat materjali allasendis.



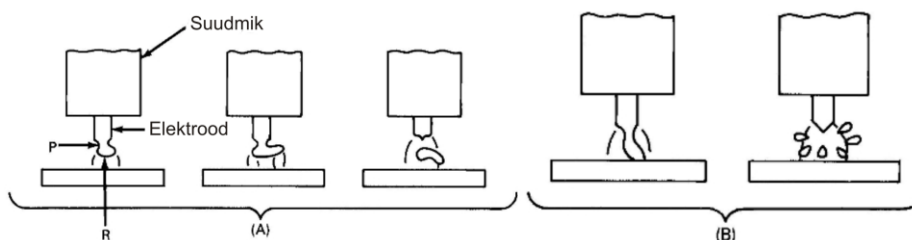
Joonis 8.4. Pihustuskaar

## Vahekaar

Vahekaar on lühikaare ja pihustuskaare piirkondade vahel keskmiste keevitusvoolude  $I = 145...250$  A ja pingete (22...26 V) puhul, üheaegselt lühistega esineb jämetilksiire ja pihustusstiire. Tekib palju pritsmeid, mistõttu püütakse vältida nimetatud piirkonda. Kasutatakse ainult siis, kui lühikaare energia ei ole piisav ja pihustuskaare oma on liiga suur. Teoreetiliselt tuleks seda kaaretüüpi vältida, kuid on kasutusel keskmise paksusega terasplaadi keevitamisel. Võimalik kasutada ülalt alla püstõmbluste ja rõhtõmbluste keevitamiseks.

## Pikk-kaar

Kasutades kaitsegaasina ainult süsihappegaasi, ei ole suurte keevitusvoolude piirkonnas (nn pihustuskaare ala) võimalik saavutada peentilksiiret. Suured metallitilgad kalduvad kaarest kõrvale (*repelled transfer*), mille tulemusena tekib palju pritsmeid ning õmbluse pind on konarlik.

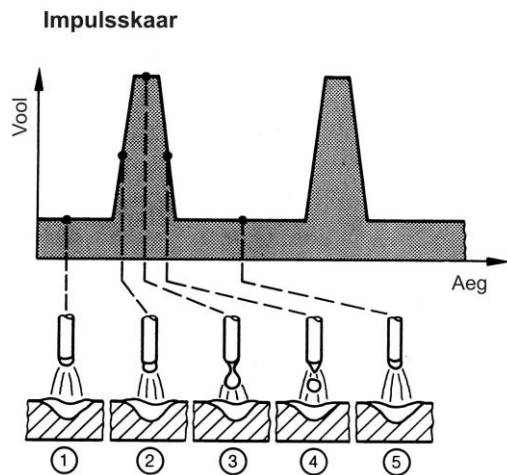


Joonis 8.5. Pikk-kaarega keevitus



## Impulsskaar, pulsskaar

Keevitamine toimub pihustuskaarega inertgaasides (Ar või He) või argoonipõhjalistes kaitsegaasides ilma lühisteta. Keevituse baas- e pilootvoolule lisanduvad vooluimpulsid sagedusega 20...400 Hz, mille ajal esineb pihustussiire peentilkadena. Rohkem kasutatakse alumiiniumisulamite keevitamisel, kuid kasutus laieneb ka terastele. Iseloomulik on suurem keevituskiirus ja tootlikkus, samas aga väiksem õmbluste poorsus, väiksemad keevitusdeformatsioonid. Selgitame protsessi järgneva skeemi abil joonisel 8.6.



Joonis 8.6. Keevitusvool ja elektroodi siire impulssvooluga keevitamisel

Keevituskaar põleb väikese baasvoolu e pilootvoolu toel, elektroodimetalli siiret keevitusvanni ei toimu. Voolu kasvades suureneb sulametailk traadi otsas ja põhiliselt elektromagnetjõudude toimel eraldub metallitilk ning siirdub lühist tekitamata keevitusvanni. Edasi alaneb keevitusvool baasvooluni ja kaar süttib taas. Baasvool valitakse võimalikult madal, et kaar veel põleks, kuid ei kustuks. Vooluimpulsi suurus peab ületama kriitilist voolu pihustusrežiimis ja olema piisava kestusega. Vooluimpulsside sageduse kasvades suureneb kaare võimsus ja tootlikkus. Paljudes impulssvooluallikates on baasvoolu ja impulsside kestuse suhe püsiv ning kaare võimsust muudetakse impulsside sageduse muutmisega.

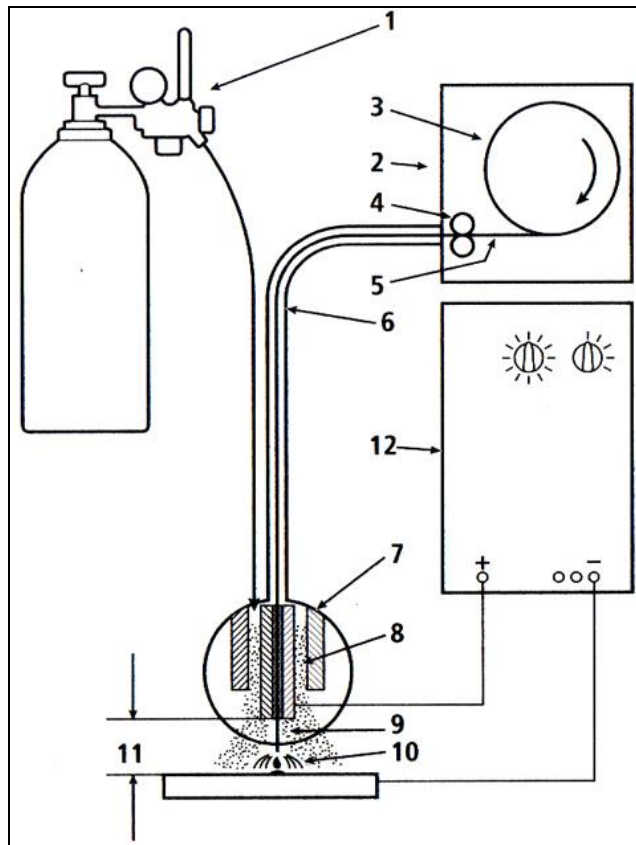
Puuduseks on vooluallikate kõrge hind ja raskused esialgsel keevitusparameetrite määramisel. Tänapäevastes seadmetes kasutatakse tarkvara poolt juhitavaid keerulise kujuga vooluimpulssse, mis tagavad hea ülemineku õmbluselt põhimetallile ja õmbluse hea juure.

## 8.2. MAG-keevituse olemus ja keevitusparameetrite mõju

MAG-seadme e masina ehitust selgitab skeem joonisel 8.7.

MIG/MAG-keevituse tegemise tingimuseks on vajalik stabiilne traadi etteandekiirus ja järgmise tingimuse täitmine:

Protsessi stabiilsuse tingimus  
traadi etteandekiirus = traadi sulamiskiirus

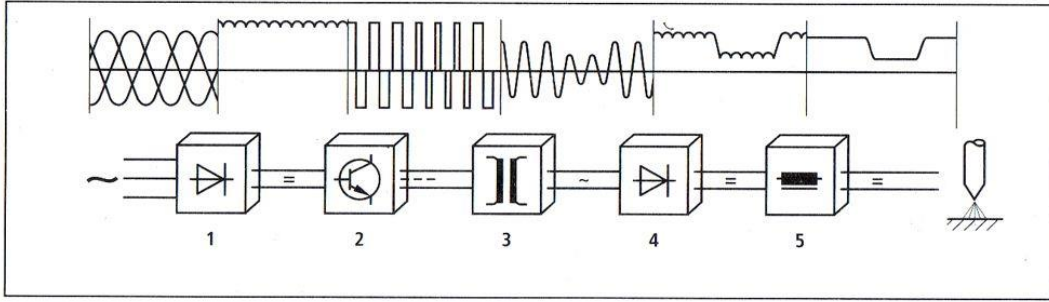


Joonis 8.7. MAG-seadme põhiosad: 1 – kaitsegaasi balloon koos reduktori ja gaasi kulu mõõturi-rotameetriga; 2 – traadi etteandemehhanism; 3 – traadi pool; 4 – etteanderullid; 5 – keevitustraat; 6 – peavoolik; 7 – keevituspüstol; 8 – kaitsegaasi juga; 9 – kaitsegaasi pilv; 10 – traadi siirdumine keevitusvanni; 11 – voolukontakti kaugus

**Tavavooluallikatena** kasutatakse trafot koos alaldiga, tänapäevasemates masinates kasutatakse invertervooluallikaid.

Tavavooluallikates kasutatakse trafot ja alalduselementidena sageli dioode või türistore. Kaare pinget reguleeritakse astmeliselt, muutes trafo primaarmähise keerdude arvu lüliti abil. Maandusahelasse on lülitatud voolu pulseerimist vähendav paispool ehk drossel, mille väljaviigid on sageli välja toodud maanduskaabli pistikupesadena poolautomaadi esipaneelil. Eeliseks on konstruktsiooni lihtsus, töökindlus ja suur kasutegur. Puudusteks on pinge astmelise reguleerimise vajadus, millega kaasneb lüliti kontaktide kulumine, tundlikkus võrgupinge kõikumiste suhtes ja kaugjuhtimise võimaluse puudumine.

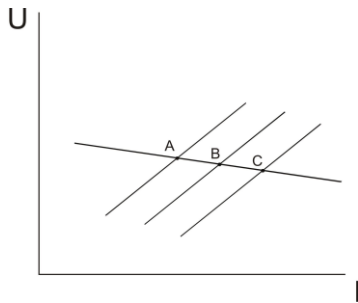
Invertervooluallikates (joonis 8.8) võrguvool alaldatakse, muudetakse 5–100 kHz nelinurkimpulssvooluks ja siis saadakse ferriitsüdamikuga trafo abil vajalik keevitusvool [10].



Joonis 8.8. Keevitusinverteri põhimõtteskeem

Tagasisideahela abil saab kontrollida keevitusparameetreid ja hoida neid püsival väärtusel.

MIG/MAG-keevitusel kasutatakse jäiga tunnusjoonega vooluallikaid, mille kalle suureneb mõnevõrra väljundahela induktiivsuse kasvades.



Joonis 8.9. Vooluallika ja keevituskaare tunnusjooned MIG/MAG-keevitusel: B – keevituse tööpunkt, A – pikem kaar, C – lühem kaar

### Traadi etteandemehhanism

Keevitusprotsessi stabiilsus tagatakse püsiva traadi etteandekiiruse saavutamise, mistõttu on tähtis selle masinasõlme konstruktsioon.

Traadi etteandeseadmed jagunevad oma tööpõhimõttelt järgmiselt:

- traati **tõukavad** (*push*),
- traati **tõukavad-tõmbavad** (*push-pull*),
- vahejaamaga** (*intermediate*).

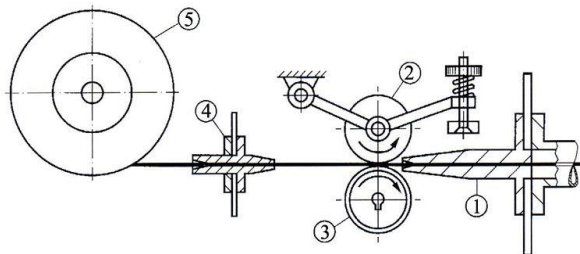
Tõukavat lahendust kasutatakse terase keevitamisel, kus etteanderullide abil tõugatakse keevitustraati läbi peavooliku kanali ja voolukontakti keevituskaare piirkonda. Vedavat lahendust kasutatakse pehme ja plastse alumiiniumtraadi etteandmiseks. Võidakse kasutada nn *push-pull* lahendust Al-traadi etteandmiseks, kus masina sisse ehitatud tõukav mehhanism lükkab traati peavoolikusse ja keevituspüstolil olev rullipaar tõmbab traati enda poole.

Tavaliselt tagab keevitusseadme kvaliteetse töö traadi etteandekiiruse muutumatus pärast häälestamist.

Levinud traadietteandemehhanismid jagunevad etteanderullide arvu ja tööpõhimõtte järgi:

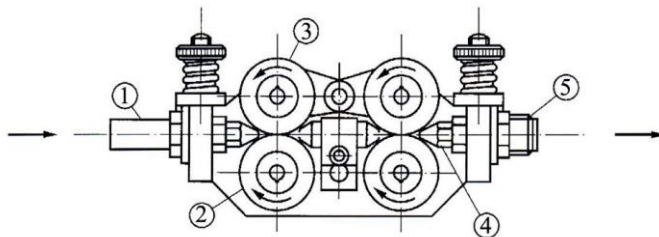
- ühe rullipaariga e 2 rulliga, alumine on ajamiga vedav rull, ülemine ainult surverull;
- ühe rullipaariga, mõlemad vedavad, ülemine rull on hammasülekandega seotud alumise rulliga;

- c) kahe rullipaariga e 4 rulliga, kus mõlemal on oma ajam, ülemised rullid on hammas-ülekanetega seotud alumistega;
- d) kahe rullipaariga ja kahe ajamiga, kus kõik rattad on vedavad ning omavahel seotud hammasülekandega;
- e) planetaarmehhanismid (Al keevitamisel sisseehitatud keevituspüstolisse).

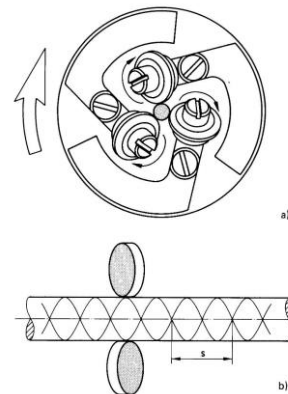


Joonis 8.10. Kahe etteanderulliga mehhanism

Skeemi a kasutatakse väikestes seadmetes, skeemi b keskmise võimalusega seadmetes, c ja d suure võimsusega rasketööstuse seadmetes. 4 rulliga seadme etteandemehhanism on näidatud joonisel 8.11. Ajami võllile võib kinnitada erineva läbimõõduga ( $\varnothing$  28 ja 40 mm) rullid, mis on varustatud plastist hammasvööga ja kahe erineva soonega kahele erinevale traadi läbimõõdule. Terastele on soon kolmnurkne, Al-sulamite ja täidistraadi korral ümar. Täidistraadi etteandmiseks kasutatakse rihveldatud soontega rulle ja reeglina 4-rullilist mehhanismi.



Joonis 8.11. Nelja rulliga mehhanism



Joonis 8.12. Planetaarmehhanismiga etteandemehhanism

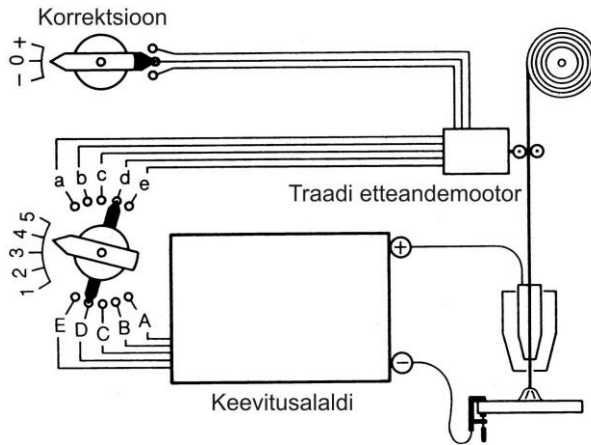
## Tava- ja sünergiline juhtimine

Tavamasinates kasutatakse keevitusparameetrite seadistamiseks nn kahe juhtimisnupuga skeemi, kus ühe lülitisnupuga 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.

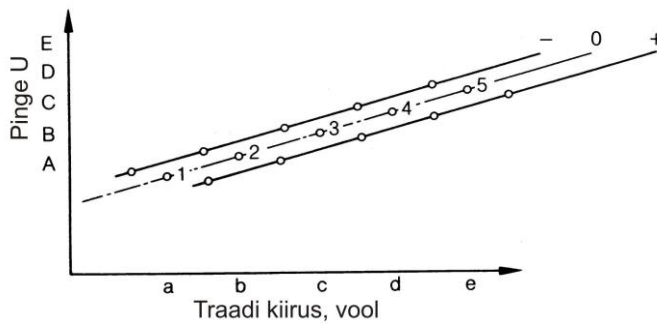
Tänapäevastes masinates kasutatakse sünergilist juhtimist, kus seostatakse kaare pinget vastava elektrilise ahela kaudu traadi etteandemehhanismi pöörlemissagedusega (joonis 8.13).

Korreksiooninupu abil on võimalik tööpunkti asukohta muuta. On levinud lahendus, kus potentsiomeetri nupu abil tõstetakse kaare pinget ja kaare pikkust ning saadakse nõgusam õmblus. Kaare pinge vähendamisel e keevituskaare lühendamisel saadakse kumer õmblus.

Sünergilise juhtimise korral sisestatakse juhtpaneelil materjali tüüp ja materjali paksus või nurkõmbluse kõrgus ( $t = a$ ), vajadusel saab korrigeerida tööpunkti asukohta ja keemisõmbluse ristlõiget, muuta väljundahela induktiivsust.



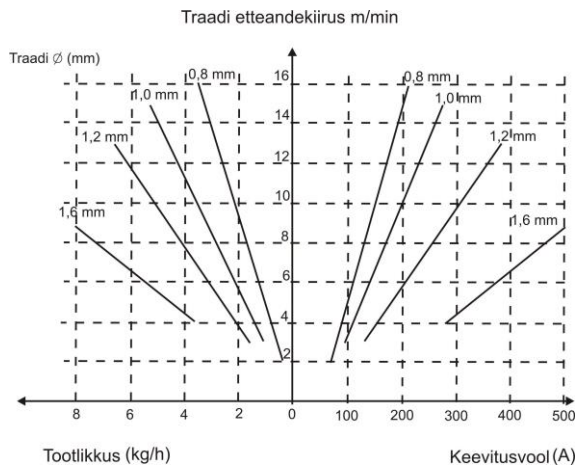
Joonis 8.13. Sünergilise MIG/MAG-masina põhimõte



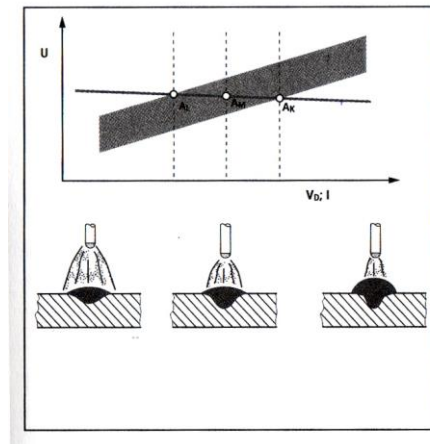
Joonis 8.14. Kevitusparameetrite sünergiline karakteristika

## Keevitusvoolu mõju

Keevitusvool on määratud traadi etteandekiirusega (joonis 8.15) ja kasvab viimase suurenedes.



Joonis 8.15. Keevitusvoolu tugevuse määramise graafikud etteandekiiruse abil ja erinevate traadi läbimõõtude puhul. Kaitsegaas 82% Ar+12% CO<sub>2</sub>

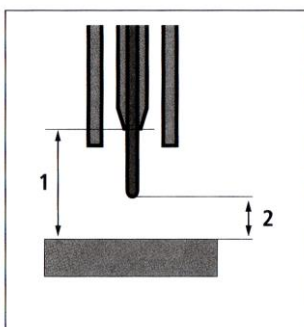


Joonis 8.16. Keevitusvoolu suuruse mõju keevituse ristlõikele

Jooniselt on näha, et keevitusvoolu suurenedes kasvab läbikuumituse suurus. Voolu suurenedes muutub keevituskaar lühemaks ja saadakse kumera välispinnaga õmblus, mis on ebasoovitav. Lühikese kaare korral eraldub palju keevituspritsmeid ja protsess ise on ebastabiilne. Praktikas on tähtis optimaalse pingevoolu suhte saavutamine.

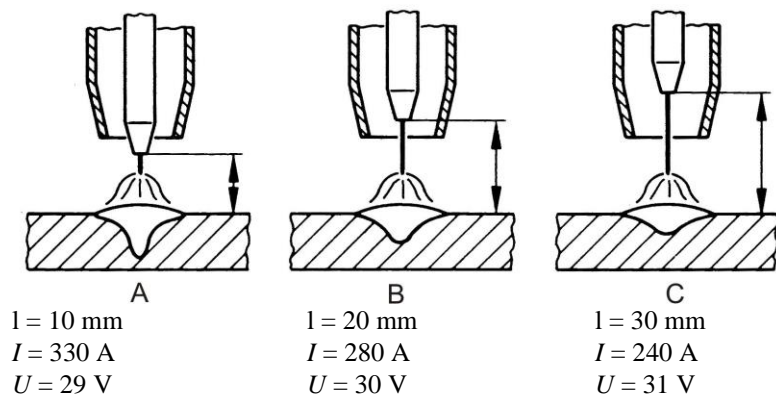
## Voolukontakti kauguse mõju

Tugevalt mõjutab keevitusprotsessi voolukontakti kaugus (*stand off distance*). USAs on kasutusel termin *contact tip to work distance* ja lühend CTWD.



Joonis 8.17. Voolukontakti kaugus (1) ja keevituskaare pikkus (2)

Harvemini kasutatakse terminit “keevituspüstoli kaugus detailidest” (*nozzle to work distance*). Juhul kui voolukontakti esiserv langeb kokku gaasisuudmiku omaga, siis voolukontakti kaugus koosneb traadi väljaulatusest e jääkpikkusest (*electrode stickout – ESO*, USAs *electrode extension*-) ja keevituskaare pikkusest, mida näiteks lühikaarkeevitusel loetakse u 1,5–2 mm.



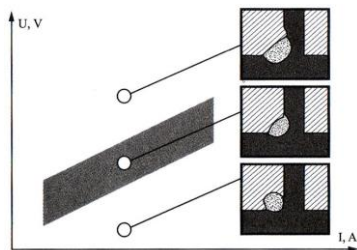
Joonis 8.18. Voolukontakti kauguse mõju keevitusvoolule, kaare pingele ja õmbluse ristlõikele:  
 A – voolukontakt kaugusel 10 mm, B – optimaalne voolukontakti kaugus 20 mm, C – voolukontakt kaugusel 30 mm. Traadi etteandekiirus 8,8 m/min

Voolukontakti kauguse mõju kaare tunnusjoontele on analoogne keevitusvoolu suuruse mõjuga. Voolukontakti kaugenedes keevitusvool väheneb ja tekib nn pikem kaar, püstoli lähenedes vool kasvab ja tekib nn lühem kaar.

### Kaarepinge mõju

Kaarepingest sõltub traadi siirdeviis keevitusvanni ja ka kaare võimsus.

Kaarepinge mõjutab oluliselt keevisõmbluse ristlõiget ja defektide tekkimise tõenäosust (joonis 8.19).

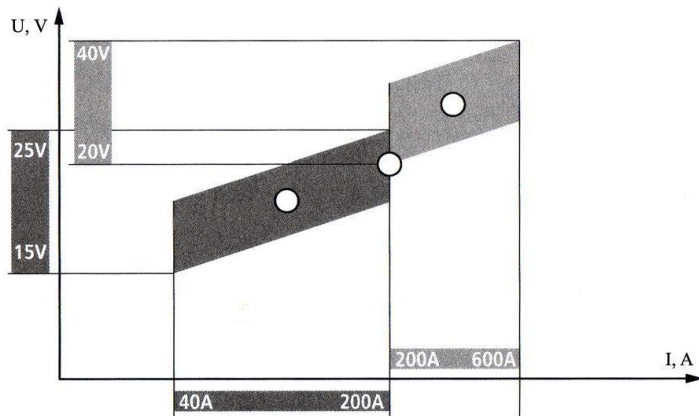


Joon 8.19. Kaarepinge mõju nurkõmbluse ristlõike kujule

Liiga kõrge kaarepinge korral võib tekkida nurkõmbluse juure läbikeevitamatus defekt ja sisselõike defekt. Kui kaarepinge on liiga madal, siis tekib liiga suure kumerusega e tugevdusega õmblus, mis ei ole aktsepteeritav, eriti väsimusele töötavate liidete puhul.

Soovitav on, et pinge ja vool oleksid valitud parameetrite akna piirides (joonis 8.20).





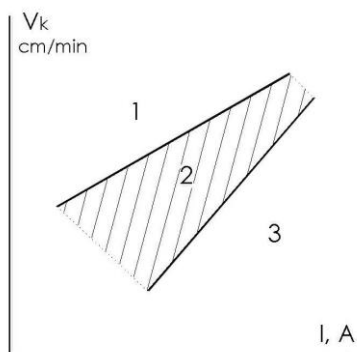
Joonis 8.20. Keevitusparameetrite aken lühikaarkeevitamisel (tume) ja pihustuskaarega (hall) keevitamisel

Jooniselt lähtub, et ei ole ühte ainuõiget pinge-voolu kombinatsiooni ja parameetrid võivad muutuda küllaltki laias vahemikus, näitamata on vahekaare ala, mida mõnede autorite arvates tuleks vältida. Voolukontakti kauguse mõju keevitusvoolule on elimineeritud adaptiivsete masinate juures. Lühikaarkeevitusel on soovituslik voolukontakti kaugus 10 traadi läbimõõtu e 10–15 mm, pihustuskaarega keevitades 15 traadi läbimõõtu e 17–20 mm. Keevitusprotse-duuri (WPS) koostamisel tuleb fikseerida voolukontakti kaugus teatud tolerantsiga.

### Keevituskiiruse mõju

Keevituspüstoli liikumise kiirusel e keevituskiirusel on oluline mõju õmbluse kujule ja keevitusdefektide tekkele. Keevituskiirus sõltub õmbluse tüübist, keevitusasendist ja keevituse sooritustehnikast läbimite keevitamisel. Seetõttu on andmed teatmekirjanduses lünklikud või vastuolulised.

Kui mitte muuta traadi etteandekiirust ja kaarepinget, siis esialgu kasvab läbikeevituse suurus keevituskiiruse kasvades. Liiga suure keevituskiiruse puhul väheneb läbikeevituse suurus ja võivad tekkida defektid nii sisselõigete kui ka servade kokkusulamatuse näol. Liiga väikestel keevituskiirustel, kui üritatakse keevitada paksu läbimit, võib keevismetall valguda keevituskaare ette ja keevituskaar põleb sula keevismetalli peal, mille tulemusena väheneb läbikeevitus ning võib tekkida servade kokkusulamatuse defekt. Kogenud keevitaja valib sobiva keevituskiiruse, tagades kaare põlemise keevitusvanni peal või eesmisel osal. Liiga suure keevituskiiruse korral võib kaar põleda õhupilus detailide vahel ja nii saadakse negatiivne tulemus.



Joonis 8.21. Keevituskiiruse piirkonnad: 1 – liiga väike keevituskaare võimsus – liitevea oht, 2 – soovituslik piirkond; 3 – liiga suur kaarevõimsus ja keevismetalli valgumine kaare ette

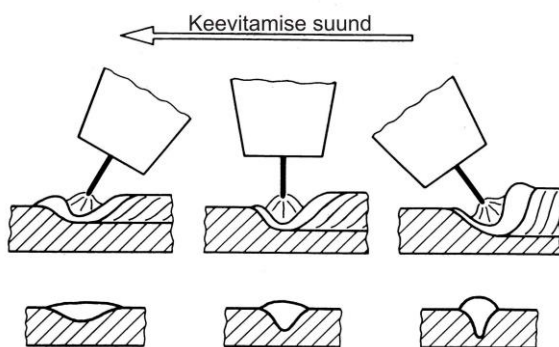


Masin- ja robotkeevituse evitamisel on sageli levinud arusaam, et tuleks keevitada võimalikult suure võimsusega kaarega ja suure kiirusega. Optimaalsest suurema keevituskiiruse korral ei jõua eralduda õmbluse pinnale lahustunud gaasid ja võivad tekkida defektid gaasipooride näol. Suure keevituskiiruse korral ei jõua tardunud keevismetall jahtuda ja oksüdeerub, tekitades poore.

### Keevitamise sooritustehnika

Keevitamisel kasutatakse 3 sooritustehnikat (joonis 8.22):

- tõukav tehnika (*forehand*),
- vedav tehnika (*backhand*),
- püstine tõukav (*vertical*).

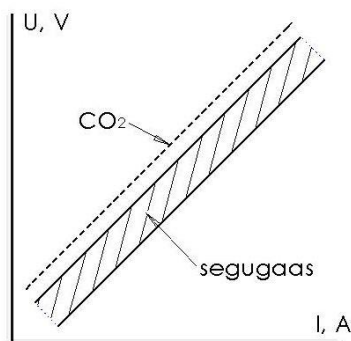


Joonis 8.22. Keevitamise sooritustehnikad ja nende mõju õmbluse ristlõikele

Keevitustehnikast sõltub läbikeevituse suurus ja keevisõmbluse ristlõike kuju, mida saab teoreetiliselt muuta keevituspüstoli kaldenurka muutes. Vedava tehnika korral suunatakse keevituskaar õmbluse kuumadele servadele, mille tulemusena saadakse suurem läbikeevitus. See tehnika ei sobi paksema terasplaadi või suurte nurkõmbluste keevitamisel püstasendis ülalt alla, kus tuleb kasutada tõukavat tehnikat. Soovitatav on keevitusprotseduuri spetsifikaadil fikseerida proovikehade keevitamisel kasutatud keevitustehnika, et tagada tulemuste korratavust. Keevitajad peavad olema koolitatud erinevate tehnikatega keevitamiseks.

### Kaitsegaasi mõju

Kaarepinget mõjutab kasutatav kaitsegaas (joonis 8.23).



Joonis 8.23. Keevituskaare tunnusjooned erinevate kaitsegaaside korral

## Väljundahela induktiivsus

Tavaliselt on vooluallika väljundahelasse lülitatud induktiivpool või reaktor, mille keerdude arvu muutmisega on võimalik muuta induktiivtakistust ja mõjutada traadi siirdeprotsessi. Suuremal pooli keerdude arvul e induktiivsusel väheneb lühiste arv sekundis, suureneb kaare põlemisaeg, mis muudab keevitusvanni temperatuuri kõrgemaks ja metalli vedelvoolavamaks. Nii võidakse saavutada tasasem ja ühtlasem üleminek õmbluselt detaili pinnale.

### 8.3. MIG/MAG-keevituse kaitsegaasid

MIG/MAG-keevituse kaitsegaas mõjutab:

- keevismetalli keemilist koostist;
- keevismetalli tõmbetugevust ja löögisitkust;
- elektroodimetalli siirdeviise erinevate kaaretüüpide korral;
- pritsmete teket;
- keevituskaare stabiilsust;
- keevisõmbluse ristlõike kuju ja läbikeevituse suurust;
- keevismetalli voolavust;
- keevitussuitsu (kahjulike aerosoolide ja ühendite) eraldumist;
- keevitustootlikkust, keevituskiirust;
- keevituskaare kontsentreeritust (energia jaotumist);
- kaare kiirgust, seostatuna lainepikkuse ja energiakadudega;
- lisametalli märgamisvõimet ja sujuvat üleminekut õmbluselt põhimetallile (*weld toe*).

Kaitsegaas tagab stabiilse keevituskaare ja ühtlase elektroodimetalli siirde, mõjutab keevitusprotsessi kasutegurit. Lisaks mõjutab kaitsegaasi koostis keevituskaare süütamispinget ja soojuse ülekannet kaarelt keevitusvanni. Suurema soojusjuhtivuse ja soojusmahtuvuse korral kantakse rohkem soojust keevitusvanni, sulametalli temperatuur tõuseb ja metalli pindpinevus väheneb, mistõttu saavutatakse sujuv üleminek põhimetallile. Kui tõuseb soojusülekanne kaarelt, siis sulatatakse paremini detailide servad ja välditakse liitevigade tekkimist. Kaitsegaasi või segugaasi korral mõjutavad komponentide füüsilised omadused oluliselt keevitamise tulemit. Erinevate metallide keevitamisel on soovitatav kasutada optimaalse koostisega kaitsegaase. Vaatleme kaitsegaasi üksikute komponentide mõju segugaasi omadustele.

#### Ioniseerimisenergia eV

Ioniseerimisenergia e-potentsiaal  $eV$  on vajalik elektroodilt elektronide eraldamiseks ja ionide moodustamiseks gaasi aatomist. Kaare süütamine ja stabiilsus sõltuvad ioniseerimisenergiast. Mida madalam on ioniseerimisenergia, seda madalamal pingel keevituskaar süttib ja seda stabiilsem see on. Madala ioniseerimisenergia argooni kasutamisel on kaare süüdatavus hea, kuna elektronid eralduvad kergemini. Heeliumil on ioniseerimisenergia kõrgem, mistõttu on kaare süütamine raskem ja kaar ise ebastabiilsem. Kaare stabiilseks hoidmiseks on vaja tagada piisav energiatase e kaare pinget.

## Soojusjuhtivus

Soojusjuhtivus mõjutab soojuskadusid keevituskaare radiaalsuunas tsentrist väljapoole, aga ka keevituskaare soojusülekanne. Kuna Ar soojusjuhtivus on ca 3 korda väiksem kui CO<sub>2</sub> ja O<sub>2</sub>, siis saadakse nn sõrmekujuline põkkõmbeluse ristlõige, mis on tingitud sellest, et keevituskaar koosneb kahest tsoonist: keskel on kõrge temperatuuriga, äärtel madalama temperatuuriga ala. Hea soojusjuhtivusega CO<sub>2</sub> korral kuumutatakse detailide servi ühtlasemalt, mistõttu keevisõmbelus on ühtlase laiusena ja väiksema läbikõmbelusega.

Heelium on hea soojusjuhtivusega gaas ja juhib hästi soojust eemale kaare südamikust. Saadakse laiem keevisõmbelus. Sama efekt esineb segugaaside Ar-H<sub>2</sub>, Ar-CO<sub>2</sub> kasutamisel.

## Gaaside dissotsieerumine ja rekombineerumine

Mitmeatomilised gaasid dissotsieeruvad keevituskaare kõrges kuumuses. Kui gaasi molekulis on mitu aatomit, siis dissotsieerumiseks on vaja rohkem energiat kui üheaatomiliste gaaside kasutamisel: nii väheneb mõnevõrra keevituskaare poolt keevitusvanni siirduv soojushulk. Edasi puutuvad keevitusprotsessi käigus ioniseerunud gaasid kokku detailide suhteliselt jaheda pinnaga, moodustuvad uued molekulid (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), mille tulemusena eraldub täiendavalt soojust detailide pinnal. Sellist nähtust tuntakse rekombinatsiooni efekti nime all ja see suurendab läbikõmbeluse suurust.

## Kaitsegaasi reaktiivsus ja oksüdeerimispotentsiaal

Kaitsegaas võib olla inertne, kuid juba väikeste oksüdeeriva gaasi lisandite korral muutuvad nii keevitusprotsessi iseloom kui ka saadud keevisliite omadused. Oksüdeeriva komponendi olemasolul segugaasis tekivad keevismetalli pinnal räbutilgad, keevismetalli Mn ja Si sisaldus on väiksem kui keevitustraadil. Inertsele kaitsegaasile aktiivse komponendi lisamine suurendab keevituskaare stabiilsust. Keevitustraadilt keevitusvanni siirduvate metallitilgad vähenevad. Inertgaasile (Ar) lisatud väikesed hapniku või süsihappegaasi kogused vähendavad keevismetalli pindpinevust ja võimaldavad saada nõgusaid nurkõmbelusi või parandada põkkõmbeluste üleminekut keevismetallile.

## Gaasi puhtus

Süsinikteraste ja vase keevitamisel on kaitsegaasis lubatud küllaltki suur lisandite hulk. Al ja Mg on lisandite sisalduse suhtes tundlikumad. Ti ja Zr keevitamisel on kaitsegaasi puhtusele veelgi suuremad nõuded.

## Kaitsegaasi tihedus ja soojusmahtuvus

Kaitsegaasi tihedus mõjutab keevitusvanni gaasikaitset. Õhust raskemad gaasid (Ar, NO<sub>2</sub>) kaitsevad paremini keevisõmbelust. Õhust kergema kaitsegaasi (nt He) lisamisel tuleb suurendada kaitsegaasi voolu. Gaaside soojusmahtuvus võib erineda oluliselt ja mõjutada läbikõmbeluse suurust.

Kaitsegaaside ja nende komponentide omadused on toodud tabelis 8.2.

Gaaside omadused

Gaas	Tihedus kg/m <sup>3</sup>	Dissotsieerumisenergia eV/molekul	Ioniseerimisenergia eV/molekul	Gaasi omadused
Ar	1,784		24,6	inertne
CO <sub>2</sub>	1,977	4,3	14,4	oksüdeeriv
He	0,178		24,6	inertne
O <sub>2</sub>	1,429	5,1	13,6	oksüdeeriv
N <sub>2</sub>	1,251	9,8	14,5	passiivne
H <sub>2</sub>	0,09	4,5	13,6	taandav

### Mitmekomponendilised segugaasid

Keevituspraktikas kasutatakse enamikul juhtudel kas kahe- või kolmekomponendiliste gaaside segusid e segugaase. Iga komponendil on teatav mõju segugaasi omadustele. Levinud on järgmised gaasisegud:

Ar/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> saab kasutada erinevate MAG-kaaretüüpide korral. Universaalsem.

Ar/He/CO<sub>2</sub> – väikese, alla 5% süsihappegaasi sisaldusega segugaas kindlustab austeniitsete roostevabade teraste keevitamisel hea õmbluse korrosioonikindluse ja tiheduse.

Ar/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> sobib roostevaba terase keevitamiseks lühikaare ja pihustuskaare piirkonnas. Ei saa kasutada süsinikteraste keevitamisel vesinikpragude riski tõttu.

Tänapäeval on saadaval väga erinevaid segugaase nii tavakeevitamiseks, robotkeevitamiseks kui ka kõrgtootlikuks MAG-keevituseks. Järgnevalt vaatleme erinevate gaaside komponentide mõju keevitusprotsessidele.

**CO<sub>2</sub>** on aktiivgaas, reageerib põhimetalliga seda oksüdeerides:

- kaare stabiliseerimine toimub metalli oksüdeerimise kaudu;
- kõrge ioniseerimispotentsiaal, vajalik kõrgem kaare pinget, kaasneb suurem soojusisestus (kaare energia);
- gaasi dissotsieerumine (endotermiline)  $\leftrightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2\text{O}_2$ , vajab energiat dissotsieerudes;
- ruumala suureneb kuumutamisel, saadakse parem keevitusvanni kaitse;
- rekombinatsiooni efekt (eksotermiline)  $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$  keevitusvanni pinnal, vabaneb soojust, saadakse suurem läbikeevitus.

**O<sub>2</sub>** on aktiivgaas, on tugev oksüdeerija, räbu tekitaja:

- kaare stabiliseerimine toimub metalli oksüdeerimise kaudu;
- madal ioniseerimispotentsiaal ja madalam kaare pinget, väiksem soojusisestus;
- vähendab keevismetalli pindpinevust ja soodustab sulametallitilkade siiret peentilkadena, keevise pinna karedus kasvab;
- võib tekitada liitumisvea defekt, eriti ruumiasendites keevitamisel tingituna keevismetalli madalast viskoossusest.

**H<sub>2</sub>** on aktiivgaas ja keemiliselt taandav:

- kõrge ioniseerimispotentsiaal, vajalik on kõrgem kaare pinget, kaasneb suurem soojusisestus;

- keevituskaare kokkusurumine, saadakse suur energiatihedus, eriti kasulik ruumiasendites keevitamisel;
- kaasneb pooride tekke oht, sõltub põhimetallist.

**Ar** on inertgaas, ei reageeri põhimetalliga:

- õhust raskem, hea keevitusvanni kaitse;
- madal ioniseerimispotentsiaal, kergendab keevituskaare süütamist.

**He** on inertgaas, ei reageeri põhimetalliga:

- õhust kergem, vajalik suurem gaasi vool;
- suurem ioniseerimispotentsiaal, raskem kaart süüdata ja kõrgem kaarepinge kui Ar;
- laiendab keevituskaart ja väheneb liitevea defekti oht;
- suur soojusjuhtivus suurendab soojuse ülekannet kaarest tootesse;
- parandab detailide märgamist ja läbikeevitust;
- võimalik tõsta keevituskiirust.

**N<sub>2</sub>** on väheaktiivne, keemilised reaktsioonid põhimetalliga toimuvad ainult kõrgetel temperatuuridel:

- käitub inertselts ainult madalatel temperatuuridel;
- on austeniidi tekkimise soosija ja pidurdab ferriidi teket austeniit- ja dupleksterastes.

Kuidas mõjutab üksikute gaaside lisamine keevitusprotsessi? Näiteks CO<sub>2</sub> lisamine juba väikestes kogustes parandab kaare süütamist võrreldes puhta Ar kasutamisega. Teiselt poolt, mida kõrgem on gaasi ioniseerimisenergia, seda kõrgemat pinget on vaja kasutada. Nii kasvab keevituskaare võimsus, kuna He lisamisel argoonile on vaja kasutada kõrgemat kaare pinget. Selle tulemusena kasvavad läbikeevituse suurus ja keevituskiirus. Kui võrrelda kaare pinget keevitamisel CO<sub>2</sub> või segugaasis Ar+20% CO<sub>2</sub>, siis segugaasi kasutamisel on kaare pinget mõnevõrra madalam. See on tingitud sellest, et vaatamata Ar mõnevõrra kõrgemale ioniseerimisenergiale (15,8 eV Ar, 14,4 eV CO<sub>2</sub>), siis on väiksem energiavajadus tingitud asjaolust, et Ar ei vaja lisaenergiat gaasi dissotsieerumiseks. Roostevaba terase keevitamisel argoonile väikestes kogustes aktiivgaaside (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) lisamisel paraneb märgatavalt keevituskaare stabiilsus. Paljuaatomiliste gaaside lisand segugaaside koostises suurendab kaare energiat gaaside rekombinatsiooni efekti kaudu. Oksüdeerivad komponendid segugaaside koostises (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) põhjustavad õmbluse pinnakihi elementide (Mn, Si) väljapõlemist ja keevismetalli mehaaniliste omaduste langust võrreldes puhta inertgaasi kasutamisega. Oksüdeeriva komponendi lisamisel paraneb keevitusvanni voolavus, mis võib parandada üleminekut põhimetallilt õmblusmetalli, kuid samaaegselt piirata paksema materjali keevitamist ruumiasendites. Teatud tüüpi roostevabade teraste keevitamisel, nn dupleksteraste korral on soovitatav kasutada lisandina kaitsegaasis väikestes kogustes lämmastikku. Lämmastik lahustub keevitusvannis ja parandab austeniit-ferriitstruktuuri teket. Lisades kaitsegaasi suurema soojusjuhtivusega komponente, nagu He, paraneb õmbluse servade kokkusulamine, keevituskiirus, keevitusvanni degaseerimine jm.

Praktikas kasutatavad MIG/MAG-keevituse kaitsegaasid

Algselt kasutati süsinikteraste keevitamisel CO<sub>2</sub> kui kõige odavamat ja hästi kättesaadavat kaitsegaasi. Kuna kaitsegaasi kulud moodustavad summaarsetest kuludest keevitamisel ainult 4%, siis gaasi hind ei ole määrav. Sel juhul ei ole võimalik keevitada suure tootlikkusega pihustusrežiimis, samuti ei ole õmbluste kvaliteet tänapäeval aktsepteeritav. Puhta CO<sub>2</sub>

kasutamisel tekib palju pritsmeid  $d > 1,0$  mm, mis keevituvad õmbluse kõrval detailide pinnale ja mille eemaldamine lihvmasinatega või piikvasaratega on töömahukas.

Tänapäeval kasutatakse keevitamisel segugaase Ar + CO<sub>2</sub>. Levinuim segugaas Eestis on Ar + 18–20% CO<sub>2</sub>, mis võimaldab märgatavalt tõsta keevituskiirust (15–30%) ja vältida jämedate pritsmete tekkimist. Segugaasi kasutamisel tekkivate pritsmete keskmine suurus on alla 0,3 mm ja nad on traatharjaga hõlpsasti eemaldatavad detailide pinnalt. Robotkeevitusel ja väikemehhaniseerimisvahendeid kasutades on soovitatav kasutada segugaasi Ar + 8% CO<sub>2</sub>, mis võimaldab võrreldes segugaasiga Ar + 20% CO<sub>2</sub> tõsta keevituskiirust 10–12%. Kuna segugaaside kasutamisel eraldub palju keevitaja tervisele kahjulikku osooni O<sub>3</sub>, siis on soovitatav kasutada NO lisanditega segugaase, mis on tuntud Mison tootenimetuste all.

Pihustuskaare või impulsskaarega keevitades on võimalik suurendada keevitustootlikkust ja kiirust, lisades segugaasile He või ka O<sub>2</sub>. Nii soovitatakse kasutada Linde segugaase tootenimetuste Corgon He 30 (10% CO<sub>2</sub> + 30% He + 60% CO<sub>2</sub>) või Corgon He 25S (25% He + 3,1% O<sub>2</sub> + 77,9% Ar). Austeniitse roostevaba terase keevitamisel tuleb kasutada standardi EN 1011-2 soovitusel segugaasi Ar + CO<sub>2</sub>. Al keevitamisel saab keevituskaare võimsust ja keevituskiirust tõsta 20, 30 või 50% He lisamisega argoonile. Vaja on keevituskaare pinget tõsta ja kaitsegaasi hulka suurendada. Linde gruppi kuuluva AS Eesti AGA poolt tarnitavate kaitsegaaside nimistu ja tootenimetuste koostis on toodud tabelis 8.3.

Tabel 8.3

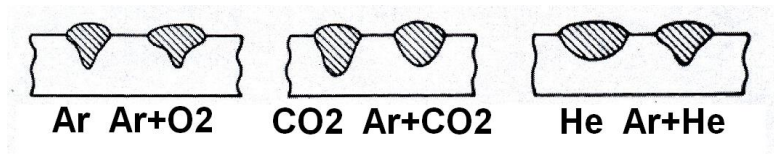
MIG/MAG-keevituse kaitsegaasid

Kaitsegaasi tootenimetus	Süsinik- ja madallegeerterased	Austeniitsed roostevabad terased	Al ja sulamid
Mison 8 Ar + 8% CO <sub>2</sub> + 0,03% NO	X		
Mison 18 Ar + 18% CO <sub>2</sub> + 0,03% NO	X		
Mison 25 Ar + 25% CO <sub>2</sub> + 0,03% NO	X		
Mison He 30 Ar + 30% He + 0,03% NO	X		
AGAMIX 20 Ar + 20% CO <sub>2</sub>	X		
Süsihappegaas CO <sub>2</sub>	V		
Mison N2 Ar + 30% He + 1,8% N <sub>2</sub> + 0,03% NO		X	
Mison 2He Ar + 30% He + 2% CO <sub>2</sub> + 0,03% NO		X	
Argoon Ar		V	X
Mison Ar Ar + 0,03% NO			X

X – soovitatav kaitsegaas

V – võib kasutada mõningatel juhtudel

Kaitsegaasi koostise mõju keevisõmbluse ristlõikele iseloomustab joonis 8.24.



Joonis 8.24. Kaitsegaasi koostise mõju keevisõmbluse ristlõike kujule

Keevituse kaitsegaasid on rühmitatud standardi ISO 14175 järgi ja praktikas kasutatakse tingtähistuste süsteemi, mis mõnevõrra erineb varasemast standardis EVS EN 439 toodust. On muutunud Mison-tüüpi segugaaside tähistus. Kaitsegaaside tähistus koosneb rühma ja alarühma tunnusest, millele sidekriipsu järel lisandub segugaasi koostise tähis ja sidekriipsuga eraldatud sisaldus mahuprotsentides numbrina.

Vaatleme mõningate levinuimate segugaaside tähistust:

1. Segugaas 75% Ar ja 20% CO<sub>2</sub>: tähis: M21-ArCO-20.
2. Segugaas argoonipõhine 5% vesiniku lisandiga: tähis R1-ArH-5.
3. Mison Ar koos 0,003% NO: tähis: Z –Ar+NO-0,03.
4. Mison 2 (Ar+2% CO<sub>2</sub>): tähis: Z-ArC+NO-2/0,03.

Tabel 8.4

Kaitsegaaside tähistus standardi EVS EN ISO 14175 järgi

Tähis		Gaasi komponendid ja nende sisaldus (%)					
Rühm	Alarühm	Oksüdeerivad		Inertsed		Taandavad	Madala reaktiivsusega
		CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	He	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
<b>I</b>	1			100			
	2				100		
	3			Jääk	0,5≤He≤95		
<b>M 1</b>	1	0,5≤CO <sub>2</sub> ≤5		Jääk <sup>a</sup>		0,5≤H <sub>2</sub> ≤5	
	3		0,5≤O <sub>2</sub> ≤3	Jääk <sup>a</sup>			
	4	0,5≤CO <sub>2</sub> ≤5	0,5≤O <sub>2</sub> ≤3	Jääk <sup>a</sup>			
<b>M 2</b>	0	5≤CO <sub>2</sub> ≤15		Jääk <sup>a</sup>			
	1	5≤CO <sub>2</sub> ≤15		Jääk <sup>a</sup>			
	2		3<O <sub>2</sub> ≤10	Jääk <sup>a</sup>			
	3	0,5≤CO <sub>2</sub> ≤5	3<O <sub>2</sub> ≤10	Jääk <sup>a</sup>			
	4	5≤CO <sub>2</sub> ≤15	0,5<O <sub>2</sub> ≤3	Jääk <sup>a</sup>			
	5	5≤CO <sub>2</sub> ≤15	3<O <sub>2</sub> ≤10	Jääk <sup>a</sup>			
	6	5≤CO <sub>2</sub> ≤15	0,5<O <sub>2</sub> ≤3	Jääk <sup>a</sup>			
<b>M 3</b>	7	15<CO <sub>2</sub> ≤25	3<O <sub>2</sub> ≤10	Jääk <sup>a</sup>			
	1	25<CO <sub>2</sub> ≤50		Jääk <sup>a</sup>			
	2		10<O <sub>2</sub> ≤15	Jääk <sup>a</sup>			
	3	25<CO <sub>2</sub> ≤50	2<O <sub>2</sub> ≤10	Jääk <sup>a</sup>			
	4	5<CO <sub>2</sub> ≤25	10<O <sub>2</sub> ≤15	Jääk <sup>a</sup>			
	5	25<CO <sub>2</sub> ≤50	10<O <sub>2</sub> ≤15	Jääk <sup>a</sup>			

Tabeli 8.4 järg

<b>C</b>	1	100					
	2	Jääk	$0,5 \leq O_2 \leq 30$				
<b>R</b>	1			Jääk <sup>a</sup>		$0,5 \leq H_2 \leq 15$	
	2			Jääk <sup>a</sup>		$15 \leq H_2 \leq 50$	
<b>N</b>	1						100
	2			Jääk <sup>a</sup>			$0,5 \leq N_2 \leq 5$
	3			Jääk <sup>a</sup>			$5 < N_2 < 50$
	4			Jääk <sup>a</sup>		$0,5 \leq H_2 \leq 10$	$0,5 \leq N_2 \leq 5$
	5					$0,5 \leq H_2 \leq 50$	Jääk
<b>O</b>	1		100				
<b>Z</b>	Segugaasid, mis sisaldavad tabelis märkimata gaase või mille kogused ületavad tabelis toodud piirväärtusi <sup>b</sup> .						

Märkus <sup>a</sup> Argooni võidakse osaliselt või täielikult asendada heeliumiga

Märkus <sup>b</sup> Kaks segugaasi ühe ja sama tähisega Z ei ole vahetuskõlblikud.

## 8.4. MAG-keevituse keevitustraadid

MAG-keevitusel kasutatakse väikese läbimõõduga (0,6–2,4 mm) tõmbamise teel saadud madalsüsinikterasest traati, mis on enamasti kaetud 0,1–0,3 mm paksuse vasekihiga. Vase ülesandeks on parandada traadi tõmbamist läbi tõmbesilma, vähendada hõõrdumist traadi etteandmisel MAG-seadme peavooliku kanalis, kergendada voolu ülekannet voolukontaktilt traadile, parandada mingil määral traadi korrosioonikindlust. Rohkem kui 0,2% vase sisalduses on kahjulik, kuna Cu eraldub tera piiridel ja kutsub esile terase haprust või kuumpragusid. Kuna Cu pinne võib traadi etteandmisel traadi pealt eralduda ja samuti eraldub kahjulikke gaase, mis halvendavad liite omadusi, siis on sageli otstarbekas kasutada vasetatud traati. Keevismetalli desoksüdeerumiseks on keevitustraa ti legeritud Si ja Mn, aga samuti Al, Ti ja Zr.

Traadi tõmbamine võib toimuda kuivalt või märjalt. Märjtõmbamisel traadi toorik söövitatatakse ja kaetakse Cu, mille järel toimub tõmbeprotsess emulsioonide lisamisega. Kuivtõmbamisel esimese läbimi järel tehakse tõmbamine väikese deformatsiooniga ja selle järel traat vasetatakse ja lõpuks kalibreeritakse. Lõõmutust ei kasutata.

### Täistraatide klassifitseerimine

MAG-keevituse täistraatide liigitus ja tähistus on toodud standardis EN 440 ja kirjanduses [3]. Tähistus koosneb puhta õmblusmetalli mehaaniliste omaduste ja traadi tähisest, mis põhineb keemilisel koostisel.

Keevitustraadid tähisega G2Si1 ja G2Ti leiavad keevitamises kasutamist ainult segugaasides, kuna nende Si ja Mn sisaldus on liiga väike keevitamiseks CO<sub>2</sub>-s. Traadid G3Si1 ja G4Si1 sobivad nii puhta süsihappegaasi kui ka segugaasi jaoks.

Tähis G2Ti kasutatakse roostes ja värvitud terase keevitamiseks, samuti peenterateraste keevitamisel. Konstruktsiooniteraste keevitamisel on Soomes levinuim traat tähisega G3Si1. Traate G3Ni1 ja G3Ni2 kasutatakse miinustemperatuuril töötavate konstruktsioonide keevitamisel, kus nõutakse suurt löögisitkust.

Traadid G2Mo ja G4Mo on ette nähtud Mo legeritud teraste, näiteks mark 16Mo3, keevitamiseks.



## Keevitustraadi tehnoloogilised omadused

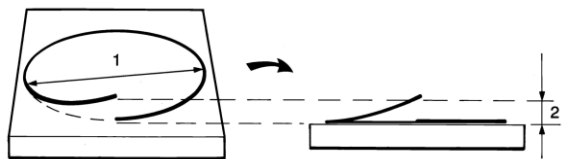
Lisaks keevitustraadi keemilisele koostisele ja mehaanilistele omadustele eristatakse veel nõudeid tema jäikusele ja keerdumisele, mida hinnatakse keerdumisläbimõõtu (*cast diameter*) ja spiraali tõusu (*helix size*) abil.

Elektrilise kontakti seisukohalt keevituspüstolis on tähtis, et traadil oleks teatud kõverus ja nii saadakse volukontaktis elektriline kontakt kolmes punktis. Selleks peaks olema vabalt keritud traadi spiraali läbimõõt 400–1200 mm (*cast diameter*).

Traadi vabakeerdumust saab hinnata järgmiselt: traadist lõigatakse välja 1,5–2 m pikkune lõik, asetatakse põrandale ja mõõdetakse ära ühe keerdunud spiraali läbimõõt ning traadi otsa kõrgus ühe traadikeeru kohta (joonis 8.25). Keerdumus peaks olema umbes 700 mm. Kui keerdumus väheneb, näiteks 1000 mm-lt 300 mm-le, siis hõõrdejõud traadi etteandmisel kasvab kuni 2 korda. Traadi keerdumus mõjutab traadi mahakerimist poolilt ja hõõrdumist etteandmisel traadi kanalis. Robotkeevitusel, kus kasutatakse sirgeid keevituspüstoleid, võib väike keerdumus (250–300 mm) parandada voolu ülekannet kontaktilt traadile.

Traadi ühe spiraali tõus ei tohiks ületada 25 mm. Suurem tõus võib põhjustada traadi otsa suurt pendeldamist ja raskendada keevitamist. Hõõrdumine traadi ja traadi kanali vahel võib suureneeda, mis omakorda võib soodustada vasekihi eraldumist traadilt.

Eri keevitustraadi tarnijate puhul võivad tekkida probleemid vasekihi paksuse ja adhesiooniga traadi pinnal. Kui vasekiht koorub kergelt traadilt maha, siis ummistab ta traadi kanali ja keevitamine on häiritud.



Joonis 8.25. Traadi keerdumuse ja jäikuse määramine

## Täidistraadid

Viimastel aastatel on märgatavalt kasvanud MAG-keevitus täidistraadiga e pulbertraadiga, mille osatähtsus arenenud tööstusmaades moodustab 20–25% kõigist lisamaterjalide hulgast. Eriti on levinud täidistraadid laevaehituses. Täidistraat on torujas elektrood, mille südamik moodustavad analoogselt keevituselektroodidega desoksüdeerivad, legerivad, räbutekitavad, gaasitekitavad ained ja keevituskaare stabiliseerijad ning ioniseerivad ained. Tegemist on justkui „tagurpidise“ elektroodiga. Võrreldes täistraadiga on voolujuhtiv ainult traadi torujas kest, mistõttu sama traadi välisläbimõõdu ja keevitusvoolu juures kasvab voolutihedus elektroodis kuni 60%, vastavalt suureneb ka pealesulatustegur ja minnakse üle nn pihustuskaarele väiksematel voolutugevustel. Keevituskaar ja läbikõõritus muutuvad laiemaks, mistõttu väheneb paksema plaadi keevitamisel liitevea ehk servade kokkusulamatusdefekti tõenäosus. Eralduvad gaasid kaitsevad keevitusvanni paremini ümbritseva keskkonna eest. Tekkiv räbu toetab keevisõmblust ja parandab keevisõmbluse kuju, mistõttu enamasti sobib kõigile keevitusasenditele.

*Täidistraatide eelised täistraatide ees on:*

- suurem keevituskiirus, eriti keevitamisel ruumiasendites kuni 30–100%;
- rutiiltäidistraadiga saab keevitada pihustuskaarega ruumiasendites;
- vähem pritsmeid ja kulutusi pritsmete eemaldamiseks;

- väiksem liitevea defekti oht, parem liite kvaliteet;
- vähem tundlik mustuse suhtes detailide servadel, väiksem pooride tõenäosus;
- sobivad keevitamiseks odavama kaitsegaasiga – süsihappegaasiga;
- saab keevitada piiratud juhtudel ilma kaitsegaasi kasutamata;
- kannatab rohkem tõmbetuult kui täistraat, saab sageli keevitada välitingimustes;
- hästi mehhaniseeritav keevitus robotite ja väikemehhaniseerimise vahenditega.

*Täidistraatide puudused võrreldes täistraatidega on:*

- 2–3 korda kõrgem hind;
- eraldub rohkem kahjulikku keevitussuitsu;
- tundlikumad niiskuse imavuse suhtes ja pooride tekke risk õmbluses suurem.

Klassikaline täidistraatkeevitus kaitsegaasi kasutamisega kuulub MAG-keevituse protsesside rühma koos tunnusnumbriga 136. Väike osa täidistraadist (umbes 1–2%) leiab kasutamist ilma kaitsegaasita, kuna nendest traatide täidistest eraldub piisavalt gaase. Seetõttu kuulub selline protsess rohkem elektroodkeevituse rühma ja kannab tunnusnumbrit 114. Ilma kaitsegaasita MAG-täidistraatide valik on väike ja valmistatud liited on madalate mehaaniliste omadustega. Ilma kaitsegaasita keevitamine leiab väga piiratud kasutamist ka seetõttu, et eraldub rohkem mürgiseid ühendeid. Täidistraate valmistatakse õmblusega või mitte, kasutades valtsimise ja tõmbamise survetöötlemist. Õmbluseta traati iseloomustab paksem sein, mistõttu nad mahutavad 12–14% täidist kogu traadi massist. Eeliseks on, et puudub liitekoht, mille kaudu võib täitesse sattuda niiskust. Osa traati valmistatakse põkkõmblusega ja õhema seinapaksusega. Täidise osatähtsus kasvab 18–25%. Katteliitega õhukesesenaalne täidistraat sisaldab 30–40% täidist ehk nii suur on traadi nn täiteaste. Kuna metallist voolujuhtiv osa on väiksema ristlõikega, siis saavutatakse suurem voolutihedus A/mm<sup>2</sup> ja osaliselt ka seetõttu suurem pealesulatustegur ehk tootlikkus.

Täidistraatide omadused olenevalt täidise tüübist

Täidistraadid jagunevad räbu moodustavateks ja räbu mittemoodustavateks metalltäidisega täidistraatideks.

Rutiiltäidisega täidistraate iseloomustab:

- stabiilne keevituskaar ja vähe pritsmeid, traadi siirdeviis väikeste või keskmiste tilkadena;
- hea servade kokkusulamine ja liitevea puudumine;
- väiksem läbikeevituse sügavus võrreldes täistraadiga;
- hea õmbluse pinna kvaliteet ja räbu eemaldatavus;
- gaasisuletiste tekkimise oht, mis võib tekkida mustusest traadil või detailide servadel;
- kiiresti tarduva räbuga traadid sobivad hästi paksu materjali keevitamiseks, kasutades juuretuge;
- keevismetalli madalamad omadused miinustemperatuuridel sõltuvalt traadi legerimisest Ni, Ti, B;
- ei kasutata juurelábimi keevitamisel ilma juuretoeta.

Aluselise täidisega täidistraate iseloomustab:

- metalli siire suurte tilkadena, õmbluse pind suuremate konarustega võrreldes rutiiltäidisega;
- keevitamisel CO<sub>2</sub> rohkem pritsmeid kui segugaasis Ar + CO<sub>2</sub>;

- vajalik heade dünaamiliste omadustega vooluallikas;
- soovitatav kasutada impulssvoolu ja õmbluse eemaldatavat juuretuge (keraamilist, räbustiga);
- head keevitusmetalli mehaanilised omadused, eriti sitkusomadused;
- sobib külmpragude tekkele kalduvate teraste keevitamiseks;
- kontrollida keevitusvoolu polaarsust traadi tootja juhiste järgi (sageli päripolaarne vool);
- võib kasutada välitingimustes tuule kiirustel kuni 5 m/s.

Metallpulbertäidisega täidistraate iseloomustab:

- ei sisalda räbu tekitavaid aineid, kuid õmbluse pinnale tekivad MnSi tilgad;
- lühikaare piirkohas keevitades vähem pritsmeid kui keevitades täistraadiga;
- sobib hästi juureõmbluse keevitamiseks;
- pihustuskaare piirkond algab väiksematel voolutugevustel kui täistraadiga keevitamisel;
- parem keevituskaare taassüüdatavus, vähem eraldab keevitussuitsu;
- sobib hästi robotkeevituseks.

Täidistraati toodetakse läbimõõduga 1,0, 1,2; 1,4 ja 1,6 mm. Levinuim on traat läbimõõduga 1,2 mm.

Rutiiltäidistraadid jagunevad kahte rühma:

- 1) asendikeevituse traadid, kiiresti tarduva räbuga;
- 2) allasendis keevitamise traadid, räbu aeglaselt tarduv, sobib alumiste nurkõmbluste keevitamiseks.

Metalltäidistraadid leiavad enamasti kasutamist tootlikul nurkõmbluste keevitamisel allasendis. Mõned traadimargid sobivad hästi asendikeevituses lühikaarega, samuti torude keevitamisel. Erinevate tootjate täidistraadid võivad oma keevitusomadustelt märgatavalt erineda.

## Kokkuvõte

1. MIG/MAG-keevitusel valitakse keevitatava materjali paksuse järgi kaare tüüp e elektrooditraadi siirdeviis keevitusvanni.
2. Tootlikkust ja läbikeevituse sügavust saab tõsta pihustuskaarega keevitamisega ja segugaasi kasutamisega.
3. MAG-keevituse peamisteks parameetriteks on kaarepinge ja traadi etteandekiirus, mis mõjutavad keevisõmbluse kuju, aga ka voolukontakti kaugus.
4. Keevitamise sooritustehnika muutmisega – vedava või tõukava tehnikaga on võimalik juhtida keevisõmbluse ristlõike kuju.
5. Impulssvoolu kasutamine võimaldab juhtida elektrooditraadi siirdemehhanismi ja vähendada kujumuutusi.
6. Keevisõmbluse ristlõiget ja selle kuju mõjutab terve rida parameetreid, millest suurim mõju on kaarepingel ja traadi etteandekiirusel e keevitusvoolul.
7. Valitud liiga kõrge kaarepinge võib põhjustada läbikeevitamatuset ja sisselõike defekti, liiga madal pingeline liigkumera pealispinnaga keevisõmblusi.
8. Kaitsegaasi omadused mõjutavad oluliselt keevitamise tulemust ja kvaliteeti. Argooni-põhiste segugaaside kasutamisel tuleb kaarepinget langetada.
9. Keevitraatide valik on piiratud ja tuleb arvestada kasutatava kaitsegaasiga. Masin- ja robotkeevitusel tuleb arvestada traadi jäikuse ja keerduisega.
10. Kaitsegaasid on rühmitatud koostise ja omaduste järgi ning kasutatakse uut segugaaside tähistust.
11. Täidistraatide suure valiku juures tuleb arvestada iga traaditüübi iseloomulike omadustega. Majanduslik efekt ei avaldu mitte niivõrd keevitustootlikuse kui kvaliteedi paranemises.

## 9. UUEAEGSED KAARKEEVITUSE VOOLUALLIKAD JA TÄIUSTATUD KEEVITUSPROTSESSID

Keevituse vooluallikate ja keevitusprotsesside arengutendentsideks võib lugeda järgmist:

1. Kasutatakse invertertehnoloogial põhinevaid digitaalse juhtimisega vooluallikaid.
2. MIG/MAG-protsesside täiustamine ja elektrooditraadi siirdeprotsessi juhtimine mikroprotsessorite ja tarkvara abil.
3. Kitsa õhupiluga protsesside edasiarendus (MIG-kitsaspilukeevitus, TIG-kitsaspilukeevitus).
4. Mitme elektrooditraadiga keevitus, nn mitmetraadiprotsessid.
5. Kombineeritud protsesside ( hübriidkeevitus = laser + MIG-protsess, TIG-protsess) kasutamine.
6. Laserkeevituse kasutamine.
7. Mehaaniliste keevitusmeetodite kasutamine:

### 9.1. Digitaalsed keevituse vooluallikad

Tänapäevastes vooluallikates kasutatakse invertertehnoloogiaid töösagedusega 5–100 kHz ja digitaaljuhtimist protsessori abil (DSP – *digital signal processor*). Keevituspärametreid ja elektroodimetalli siirdeprotsessi juhitakse vastava tarkvara abil, mille kohta on eelnevalt kogutud infot elektroodimetalli siirdeprotsessi kiirfilmimise abil. Vooluallikas on ühildatav perifeeriaseadmetega, näiteks traadi etteandemehhanismiga, võimalik vastastikune infovahetus. Liidese e interfeisi kaudu on võimalik salvestada ja protokollida kasutatud keevituspärametreid. Vooluallikas võib olla varustatud lisafunktsioonidega keevitamise alustamiseks ja lõpetamiseks (tabel 9.1).

Vaatleme uueaegsete vooluallikate põhilisi funktsioone:

**Sünergiline juhtimine** (*synergic*). Üldjuhul sisestatakse materjali tüüp (süsinikteras, roostevaba teras, Al), kaitsegaasi tüüp, traadi läbimõõt, materjali paksus või nurkõmbluse kõrgus. Kasutatakse masinasse programmeeritud keevituspärametreid. Eraldi potentsio-meetriga on võimalik muuta keevituskaare pikkust ja keevitusvoolu kuni 10%. Tuntud kui nn ühe juhtnupuga reguleerimine.

**Adaptiivne juhtimine** (*adaptive control*) – juhtimine, kus keevituspüstoli kauguse e voolukontakti kauguse muutused keevitamise ajal ei mõjuta keevitustulemust. Digitaalsetes vooluallikates mõõdetakse pidevalt voolukontaktist väljaulatava traadi osa elektritakistust ja juhtimissüsteem kompenseerib takistuse muutused.

**Kaugjuhtimine** (*remote control*) – keevituspärametrite reguleerimine viiakse üle keevituspüstolile.

**Aeglane alustus** (*creep start*) – (joonis 9.1), kus keevituskaare süütamine toimub väiksemal voolul, edasi vool kasvab kas lineaarselt või astmeliselt kuni nimiväärtuseni. Kasutatakse robotkeevitusel ja jämeda traadiga keevitamisel, Al-keevitamisel.

**Kaare kuumsüütamine** (*hot start*) – (joonis 9.2), kus keevitamise alustamisel antakse lühiajaline tugev vooluimpulss mõne sekundi jooksul. Kasutusel Al-keevitamisel, saab vältida pritsmete tekkimist kaare süütamisel ja alustuskohas pooride, kokkusulamatuse defekti teket.

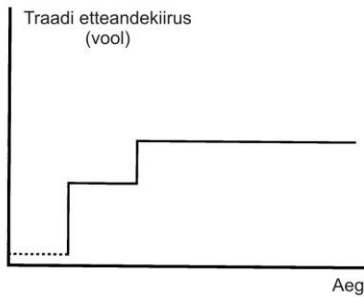
**Lõpetuskraatri täitmine** (*crater fill*) joonisel 9.3, kus keevitusvoolu ja kaarepinge vähendamine toimub sujuvalt (kuni 5 sekundi jooksul) keevitamise lõpul. Keevitatakse täis keevisõmblusest madalam keevituskraater.

**Kaare järelpõlemine** traadi kinnijäämise vältimiseks (*burn back*) joonisel 9–4. Keevitus-traadi ots võib keevitamise lõpetamisel sukelduda keevitusvanni ja sinna kinni jääda. Traadi etteandmine praktiliselt lõpetatakse enne pinge väljalülitamist lühikeseks ajaks (0–1 sekundit)

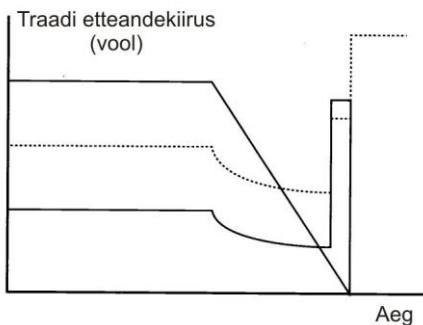
Tabel 9.1

Vooluallikate lisafunktsioone

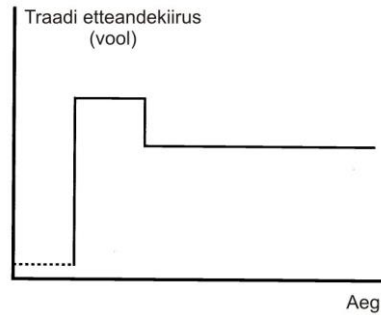
Keevitamise etapp	Funktsiooni nimetus	Funktsiooni ingliskeelne nimetus	Keevitusprotsess
Keevitamise alustamine	Aeglane alustus	<i>Creep start</i>	MIG
	Gaasi eelvool	<i>Gas pre-flow</i>	MIG, TIG
	Kuumsüütamine	<i>Hot start</i>	MIG, MMA, TIG
	Kõrgsagedussüütamine	<i>HF start</i>	TIG
	Kontaktisüütamine	<i>Lift arc</i>	TIG
	Voolu tõus	<i>Slope up</i>	TIG, MIG
	Pehme start	<i>Soft start</i>	TIG
Keevitamise ajal	Impulssvooluga keevitus	<i>Pulsed MIG welding</i>	MIG
	Kaarepikkuse kontroll	<i>Arc length control</i>	MIG
	Astmeteta induktiivsuse seadistamine	<i>Stepless inductance setting</i>	MIG
	Sünergiline juhtimine	<i>Synergy lines</i>	MIG, MMA
	Impulssvooluga TIG-keevitus	<i>Pulsed TIG</i>	TIG
	Voolu tõus	<i>Slope up</i>	TIG
	Forsseeritud kaar	<i>Arc force</i>	MMA
	Voolu bilanss, perioodide suhe	<i>Current balance</i>	TIG
	Tagasisidega keevitus-parametrite juhtimine	<i>Feedback controlled parameter setting</i>	MIG, TIG, MMA
Keevitamise lõpetamine	Lõpetuskraatri täitmine	<i>Crater filling</i>	MIG
	Voolu langus	<i>Slope down</i>	MIG, TIG
	Kaare järelpõlemine	<i>Burn back time setting</i>	MIG
	Lõpetusvoolu impulss	<i>Shake of pulse</i>	MIG
	Gaasi järelvool	<i>Gas post flow</i>	MIG, TIG



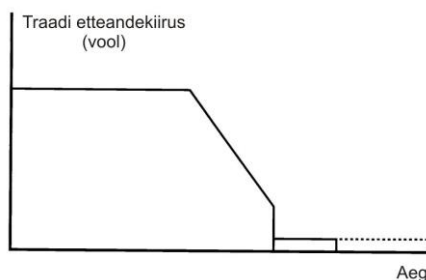
Joonis 9.1. Aeglane alustusvool



Joonis 9.3. Lõpetuskraatri täiskeevitamine



Joonis 9.2. Keevituskaar kuumsoütamine (*hot start*)



Joonis 9.4. Metallilga eemaldusimpulss keevitamise lõpetamisel

## 9.2. Täiustatud MAG-keevitusmeetodid

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

- õhukese materjali (alates 0,3 mm) keevitamist,
- kvaliteetse juureõmbluse e esimese keevituslõbimi keevitamist, näiteks torude keevitamisel,
- keevitada suure detailidevahelise õhupilu korral,
- paksu materjali keevitamist suure lõbikeevituse sügavusega,
- keevitusprotsessi stabiilsust keevituspüstoli ja voolukontakti kauguse muutudes.

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

1. Täiustatud lühikaarkeevitus järgmiste kaubamärkide all:

- CMT,
- Cold Arc,
- Fastroot,
- STT,
- RMD jt.

2. Forsseeritud pihustuskaar:

- Force Arc,
- Rapid Arc.

3. Impulssvoolu kasutamisega ja vooluimpulsside juhtimisega:

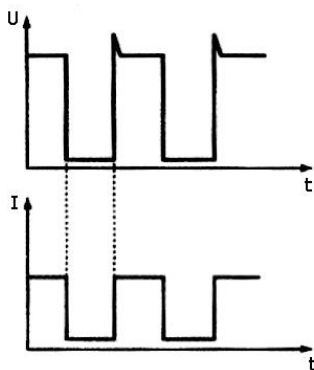
- tavaimpulssvool,
  - kaksikimpulssvool,
  - erinevate vooluimpulsside kombinatsioonid.
4. Vahelduvvoolu kasutamine.
  5. Adaptiivsed protsessid.

### 9.2.1. CMT-meetod

Nimetus on tulnud ingliskeelsest lühendist CMT – *Cold Metal Transfer* ja tähistab nii MIG/MAG-keevituse uut arendust e nn külркеevitust kui ka kaarjootmist. Elektroodimetalli siire keevitusvanni toimub ilma pinget ja keevitusvoolu rakendamata. Nii tagatakse eriti väike soojussisestus, mis võimaldab protsessi kasutada õhukese metalli keevitamisel ja kaarjootmisel, kus sageli on MIG/MAG-keevituse kasutamine võimatu.

Metallitilga siirdemehhanism keevitusvanni erineb tavaprotsessist lühikaarrežiimil. Traadi etteandmine on katkendlik, ja kui tekib lühis traadi otsa ning keevitusvanni vahel, siis traadi etteandmine lõpetatakse ja traat tõmmatakse natuke tagasi, mille abil metallitilk eemaldatakse traadi otsast. Keevitusvoolu väärtus läheb nulli ja metalli siire toimub ilma vooluta. Protsess kordub. Sekundis tekib *ca* 70 tilka.

Kuna metallisiirde ajal keevitusvoolu ei ole rakendatud, siis ei esine suuremat lühisvoolu ja nii jääb kaare energia ja soojussisestus väikeseks. Ei teki pritsmeid. Traadi etteandmise kiirus ja reverseerimine toimub suure sagedusega, mida võimaldab keevituspüstolisse ehitatud hea dünaamikaga ajam. Traadi edasi-tagasi liikumiste kompenseerimine on peavoolikus olemas traadi varu nn puhvri näol.



Joonis 9. 5. Keevitusvool ja kaarepinge CMT-meetodil

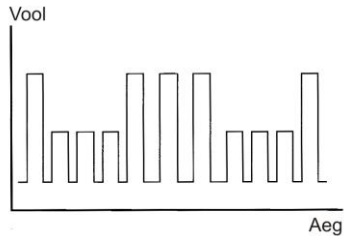
CMT-protsessi kasutatakse õhukese (alla 0,8 mm) kuumtsingitud pleki liitmiseks, aga ka paksema (5 mm) ilma pindeta teraspleki liitmiseks, eriti keevitusrobotite abil, näiteks autotööstuses.

### 9.2.2. MAG-keevitus mitme vooluimpulsiga

Kirjanduses tuntud kui MAG-keevitus kaksikimpulssvooluga (*double-pulsed* MIG/MAG, *thermal pulsed* MIG/MAG).

Kasutatakse lahendusi (joonis 9.6), kus lisaks keevitusvoolule antakse ka traadi etteandmisele pulseeriv liikumine. Nii saab Al keevitusel hästi juhtida läbikeevituse sügavust.

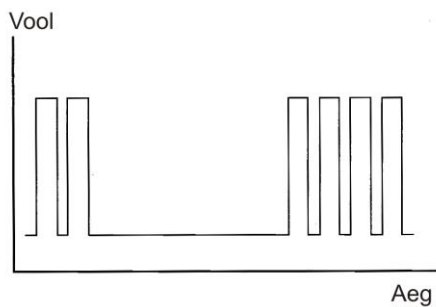
Kaksikimpulssidega keevitades vahelduvad perioodiliselt erineva võimsuse ja sagedusega vooluimpulssid. Samas taktis impulssidega muutub keevituskaare pikkus ja kõrgema impulsi ajal kaar pikeneb. Nii saab parandada ja ühtlustada voolamist keevitusvannis. Väheneb õmb-luse pealispinna soomuselisus.



Joonis 9.6. Kaksikimpulssvoolu lainekuju

### Tsükliline impulssvool

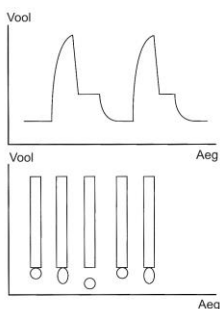
Arendatud Jaapanis, kus lisaks alalisvoolule rakendatakse korrapäraselt tsüklilist impulssvoolu. Vooluimpulsside ajal keevituse soojussisestus kasvab ja keevitusvann kuumeneb rohkem ning toimub sula metallilga siire. Alalisvoolu komponendi rakendamise ajal keevitusvann jahtub.



Joonis 9.7. Tsükliline impulssvool

### Järelvooluimpulssvoolu kasutamine

Euroopas arendatud lahendus, kus põhivooluimpulsile järgneb veel väiksema suurusega vooluimpulss, mis eraldab lõplikult sula metallilga traadi otsast. Vähenevad pritsmed ja õmb-luse pealispind läheneb kvaliteedilt TIG-keevitusel saavutatule.



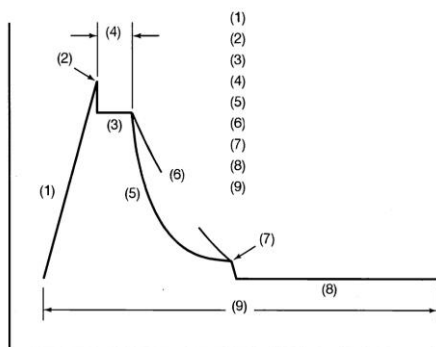
Joonis 9.8. Järeimpulssvoolu põhimõtteline kuju



### 9.2.3. Muudetava impulssvoolu kasutamine

Laialdaselt kasutatakse impulssvoolu, mille lainekuju kirjeldab joonis 9.9 [30].

Nimetatud lainekujule võib anda lisaimpulse. Keevituskaare energiat ja keskmist keevitusvoolu iseloomustatakse laine all oleva ala pindalaga. Lainekõverat iseloomustavad järgmised parameetrid, mis on skeemil tähistatud numbritega.



Joonis 9.9. Impulssvoolu parameetrid

1 – impulssvoolu tõusu kiirus (*front flank – up rate*). Määrab aja, mille jooksul keevitusvool tõuseb baasvoolust (*background current*) tippvooluni (*peak current*). Mõjutab sulametallilga moodustumist elektroodi otsas. Kui voolu tõus on järsem, siis keevituskaart loetakse jäigemaks (*arc stiffness, rigid arc, hard arc*) ja tema häält mürisevaks. Väiksem voolutõus annab pehmema häälega või pehmema keevituskaare (*softer arc, soft arc*).

2 – voolu ülevise, ülevõnge (*over shoot*), esineb lühiajaliselt enne tippvoolu e maksimumvoolu saavutamist, väljendatakse sageli protsentides tippvoolust. Üleviske suurendamist seostatakse keevituskaare jäigemaks muutmisega ja elektroodilt eralduva metallilga väiksema kõvalekaldega liikumisel keevitusvani. Soodustab sulametallilga eraldumist traadi otsast nn Pinchi jõu toimel.

3 – tippvool, maksimumvool (*peak current*). Vooluallikal reguleeritakse voolutugevus suuremaks kriitilisest pihustusvoolust (*spray transition current*). Tippvoolu rakendamise ajal eraldub elektroodi otsast sulakeevismetalli tilk. Tippvoolu kasvades suureneb keskmine keevitusvool ja läbikeevituse sügavus.

4 – tippvoolu aeg (*peak current time*). Seostatakse elektroodi otsas moodustuva metallilga suurenemisega. Aja pikenedes metallilga suurus kasvab ja suureneb läbikeevituse suurus. Tavaliselt arvestatakse, et ühe tippvoolu impulsi jooksul eraldub üks sulametalli tilk. Alumiiniumi keevitamiseks väljatöötatud masinatel (*Air Liquide/SAF*, meetodil *Spray Model*) võib eralduda ka kuni 10 metallilka.

5 – vooluimpulsi languse aeg (*tail out time*) iseloomustab voolu languse kiirust. Põhimõtteliselt on kõver eksponentsiaalne. Pikemal ajavahemikul suureneb sulametallilga voalavus, ta märgab paremini keevisõmbluse servi ja see muudab õmbluse ülemineku põhimetallile sujuvamaks. Keevituskaare häält muutub pehmemaks.

6 – vooluimpulsi vähenemise kiirus. Saab muuta voolu languskõvera kuju.

7 – vooluaste (*step off current*). Vooluaste kuni baasvoolu saavutamiseni. On sageli vajalik keevituskaare stabiliseerimiseks roostevaba terase ja Ni sulamite keevitamisel.

8 – baasvool, alusvool (*background current*). Madalam voolu väärtus kaaretsükli jooksul. Tavaliselt põleb keevituskaar, kuid elektroodi metalli siiret ei toimu. Voolu suurenedes kasvab keskmine keevitusvool ja läbikeevituse sügavus.

9 – vooluimpulsside sagedus (*pulse frequency*). Sageli tuntakse kaaretsükli pikkuse (*arc cycle time*) nime all. Sageduse tihenedes keskmine voolutugevus suureneb ja elektroodi otsast siirduvate metallitilkade suurus väheneb vastupidiselt väljundahela induktiivsuse muutusele. Kui impulsside sagedus väheneb, siis keevituskaar ja keevisläbim muutuvad laiemaks.

#### 9.2.4. Adaptiivne MIG/MAG-keevitus

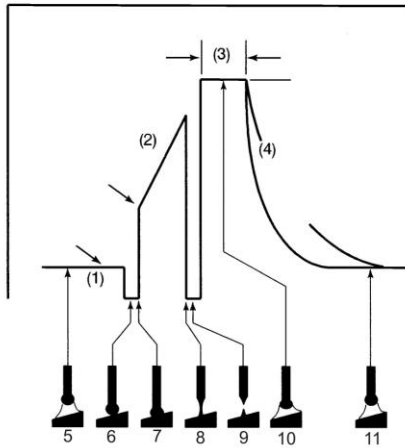
Keevituskaare pikkuse juhtimiseks olenevalt voolukontakti kaugusest kasutatakse adaptiivjuhtimise põhimõtteid, mis on kirjeldatud [31]. Juhul kui voolukontakti kaugus väheneb e keevitaja lähendab keevituspüstolit detailile, siis on vaja keevituskaarele lisada energiat ja kompenseerida kaarepinge langust. Voolukontakti kaugenedes on vaja vähendada keevitusvoolu laine energiat. Nii muudetakse keevituskaar stabiilseks, kasutades optimaalse kujuga voolu impulssilainet ja juhtides viimast tarkvara abil. Kaare pikkuse automaatreuleerimiseks saab kasutada nii impulsside sagedust, tippvoolu, aja kui ka baasvoolu muutmist.

Eeltoodud põhimõtet on rakendatud poolautomaadil Minarc MIG<sup>TM</sup> Adaptive 180, kus eraldi kaare pikkuse seadistamise nupu abil saab muuta kaare pikkust ja ka nurkõmbluse kuju. Kui juhtnupp on asendis „-1 kuni -9“, siis on tegemist lühikese keevituskaarega, saadakse kumer nurkõmblus. Lülitades asendisse „0 kuni +9“, saame pikema keevituskaare, mille tulemusena saadakse nõgus nurkõmblus. Keevitusvoolu ja kaare võimsuse hoidmisel konstantsel väärtusel kasutatakse erinevaid tagasiside lahendusi.

#### 9.2.5. STT-meetod

STT<sup>TM</sup>-meetod (*surface tension transfer*) [32] on lühikaarkeevituse edasiarendus keerulise lainekujuga impulssvoolu kasutamisega. Meetod sobib hästi torude juureõmbluse keevitamiseks, kus moodustub tasane pealispind ja väikese kumerusega vastasvallik. Asendab torude juurekeevitusel TIG-keevitust ja võimaldab kuni 4 korda suuremat keevituskiirust. Välditakse MAG-keevituse tüüpilist defekti – servade kokkusulamatust e liiteviga. Meetodit iseloomustab madal soojussisestus, mis võimaldab seda kasutada nii õhukese süsinikterase, roostevaba terase kui ka Ni, ränipronksi keevitamiseks minimaalsete keevitusdeformatsioonide ja keevituspritsmetega. Kasutatakse invertervooluallikat ja tagasisideahela abil juhitakse impulssvoolu komponentide muutmise teel keevitusvoolu ja elektroodimetalli siirdeprotsessi. Traadi etteandekiiruse muutmise teel muudetakse tootlikkust, kuid vooluimpulsside kuju ja sageduse muutmisega saab suurendada või vähendada keskmist keevitusvoolu. Teljestikus „pinge – vool“ ei ole erinevalt tavavooluallikatest tegemist klassikalise püsivpinge ega ka püsivvooluga vooluallika tunnusjoontega. Poolautomaadil Invertec STT rakendatakse adaptiivset ja sünergilist juhtimist, kus on olemas traadi etteandekiiruse reguleerimise võimalus, kuid puudub kaare pingereuleerimise nupp.

STT-meetodit kirjeldab põhimõtteliselt skeem joonisel 9.10, kus on tähistatud tsükli erinevad perioodid:



Joonis 9.10. Keevitusvoolu lainekuju STT-meetodil

1 ja 5 – baasvool, mille toimel tekib elektroodi otsas sulametallitilk, mis läheb kontakti sulakeevitusvanniga;

6 – baasvoolu vähendatakse sellisele tasemele, et välditakse metallitilga enneaegset eraldumist;

2 ja 7 – vool tõuseb kiirelt tasemeni, kus Pinchi elektromagnetjõud tekitavad sulametallitilga ja elektroodi ülejäänud osa vahel väiksema läbimõõduga osa nn kaela. Vooluallikas seirab pinget ja aega ning võrdleb seda etteantud väärtusega. Lineaarne voolutõus väldib keevituspritsmete tekkimist;

8 – metallitilk on eraldumas elektroodi otsalt ja vooluallikas alandab voolu baasvooluni. Metallitilga sfääriliselt hoidvad pindpinevusjõud vähenevad järsult ja sula metallitilk siirdub sulasse keevitusvanni. Juhitav siirdeprotsess väldib keevituspritsmete teket;

9 – vooluallikas tõstab voolu maksimumväärtuseni, baasvoolul taassüttib keevituskaar ja hakkab tekkima uus sulametallitilk elektroodi otsas. Vertikaalselt alt üles mõjuvad reaktiivjõud suruvad metallitilga tagasi ja takistavad metallitilga eraldumist. Saadud vooluimpulsi energia tõstab keevitusvanni temperatuuri ja parandab sulametalli vedelvoolavust, tagades nii õmblusmetalli sujuvama ülemineku detailide pinnale;

3 ja 10 – taastub tippvoolul kaare pikkus ja plasmajoa jõud suruvad sula keevitusvanni elektroodi otsast kaugemale;

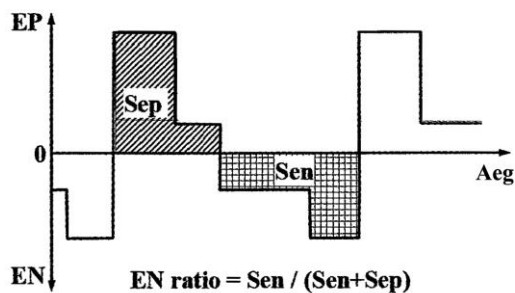
4 ja 11 – voolu languskõvera kaudu antud energia annab hiljem eralduvale metallitilgale suurema kiiruse ja parandab sujuvat üleminekut õmbluselt detaili pinnale. Torude juurekeevitusel antakse minimaalne aeg voolu langetamiseks.

#### 9.2.6. Vahelduvvoolu impulssidega MIG-keevitus

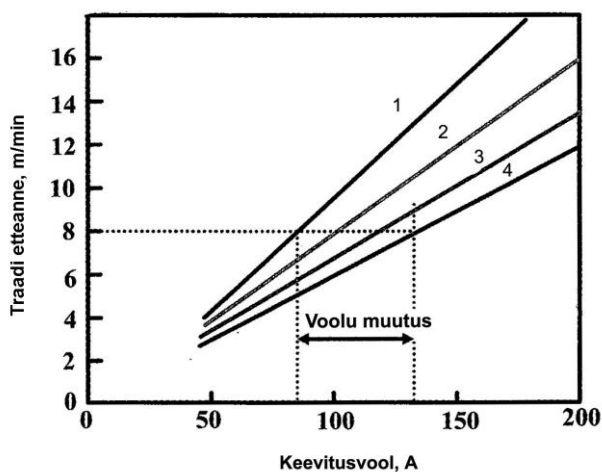
Ebasümmeetrilise lainekujuga vahelduvvooluga keevitusmeetod on välja töötatud ja patenteeritud Jaapanis OTC kontserni ettevõttes Daihen Corporation kaubamärgi DW 300 all [31]. Meetod on tuntud nimetuse AC MIG Welding Process all ja põhineb lühikese kestuse ja tugevusega vahelduvvoolu lisamisega alalisvoolule (joonis 9.11). Elektroodi negatiivse polaarsusega impulsi kasutamine suurendab läbisulatust ja tootlikkust, positiivne laineimpulss suurendab keevituskaare liikuvust ja võimaldab ületada keevituskaarega laiemat õhupilu. Positiivse vooluimpulsi ajal purustatakse Al pinnal esinev oksiidikile. Elektroodi negatiivse polaarsuse ajal (EN) keevitustraat kuumeneb ja sulab 30–50% kiiremini kui positiivse polaarsuse korral. Sula metallitilga siire toimub voolu positiivse polaarsuse ajal. Analoogselt

TIG-keevitusega on võimalik muuta läbikuumituse suurust ja pinna oksiidist puhastusefekti mõju. Joonisel 9.12 on näidatud keevitusvoolu muutus, kui traadi etteandekiirus on püsiv, kuid muudame suhet EN. Asümmeetrilise kujuga vahelduvvoolu (AC) impulsside kasutamisel on võimalik ühe ja sama traadi etteandekiiruse juures vähendada keskmist keevitusvoolu suurust, muutes negatiivse vooluimpulsi pindala  $S_{en}$  suhet summaarsesse vooluimpulsside pindalasse  $S_{en} + S_{ep}$ .

Meetod sobib õhukeseks (0,8 mm) ja keskmise paksusega (6 mm) süsinikteraste, roostevaba terase ja Al keevitamiseks kontrollitud soojussisestusega. Eraldub väidetavalt vähem kahjulikke keevitussuitsu. Vahelduvvoolu kasutamine Al keevitamisel võimaldab vähendada keevitusdefekte. Meetod sobib hästi erineva paksusega, näiteks 6 mm ja 2 mm plaadi omavahel robotkeevituseks.



Joonis 9.11. Negatiivsete vooluimpulsside EN kasutamine, mida iseloomustab impulsside aluse pindala suhe EN ratio



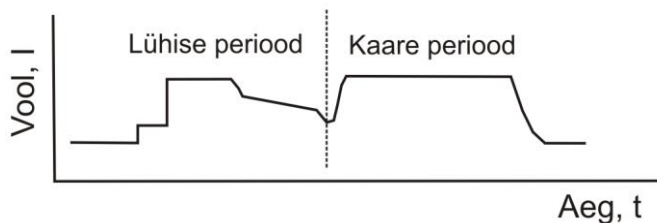
Joonis 9.12. EN suhte mõju keevitusvoolule: 1 – EN = 0, alalisvoolu EP kasutamine, 2 – EN = 10%, 3 – EN = 20%, 4 – EN = 40%

### 9.2.7. FastROOT-meetod

FastROOT on sünergilise juhtimisega modifitseeritud lühikaar-keevitusprotsess, mille käigus kontrollitakse digitaalselt vooluallika keevitusvoolu ja -pinget. Protsessi käigus jälgitakse lühiste teket kaares ja kontrollitakse metallitilkade ülekannet traadilt keevitavanni.

Kemppi sünergilisi FastMig<sup>TM</sup>-seadmeid võib täiendada juureõmbluse keevitamise tarkvaraga FastROOT<sup>TM</sup>, mis tõstab juureõmbluse esimese keevituslähimi keevitamise kiirust

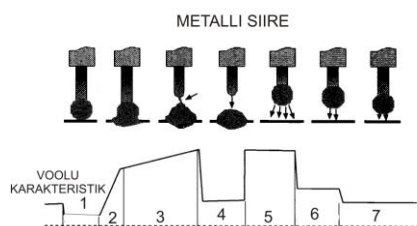
võrreldes traditsioonilise MAG-protsessiga kuni 10% ja TIG-protsessiga kuni 3 korda. Soojussisestus väheneb 10–20%, mistõttu meetod sobib hästi õhukese pleki robotkeevituseks minimaalsete deformatsioonidega. Meetod võimaldab keevitada kõigis keevitusasendites ka suurendatud õhupilu korral detailide vahel. Põhimõtteliselt ei ole tegemist impulssvooluga keevitamisega, vaid optimeeritud keevitusvoolu lainekujuga, mis on näidatud skemaatilisel joonisel 9.13. Keevitustsükli saab iseloomustada lühise ja kaare perioodiga. Lühise perioodil voolu abil kuumutatakse keevitustraat kuni sulametallitilga tekkimiseni ja kontakti tekkimiseni traadi otsa ja keevitusvanni vahel. Selle perioodi lõpus tõstetakse 2. astmega kestusega 5–6 ms keevitusvoolu ja keevitusvõimsust, mida hoitakse teatud aeg maksimaalsel tasemel. Voolu aeglase vähenemise vahemikus eraldub elektromagnetjõudude toimel sulametallitilk. Pärast seda suurendatakse keevitusvoolu ja toimub keevituskaare taas-süttimine (kaare periood). Voolutõusu astme suurus lühise perioodil mõjutab keevitusvanni kuju läbikeevituse suurus. Pärast keevitustsükli lõppu taastub keevitusvoolu baasvool ja metallitilkade siire kordub. Kasutatud sobiv voolu lainekuju lubab saada stabiiliseeritud keevituskaare ja pritsmeteta tulemuse. Meetod on leidnud laialdast kasutamist torustike, spiraalsoojusvahetite ja naftapuurtormide, aga ka õhukeste plekist elektrikappide tootmisel.



Joonis 9.13. Keevitusvoolu kuju FastROOT-meetodil

#### 9.2.8. RMD- ja Pro-Pulse meetodid

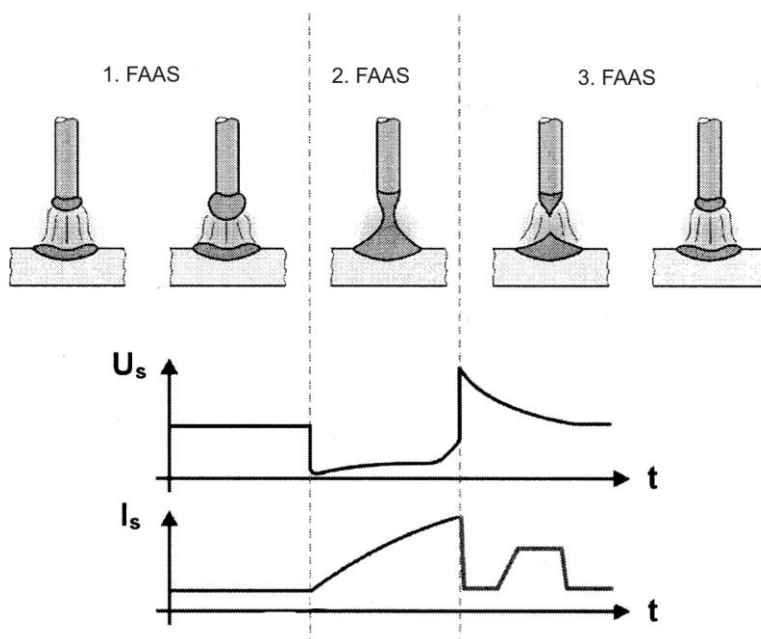
- Kompanii Miller Electric Mfg.Co on spetsiaalselt torustike keevitamiseks välja töötanud multiprotsessidega masinad, kus kasutatakse programmeeritavaid sünergilise juhtimisega keevitusmeetodeid järgmiste kaubamärkide all [32]: RMD (*Regulated metal deposition*) ja Pro-Pulse. Tegemist on lühikaarprotsessidega, kus tarkvara abil juhitakse elektroodi siirdeprotsessi. Keevitusprotsessi juhitakse põhimõtteliselt ühe juhtimisnupu abil, kus minimeeritakse voolukontakti e keevituspüstoli kauguse mõju keevitusprotsessile. Meetodi eeliseks on kvaliteetsed, hea õmbluse servade kokkusulatamisega ja paksemad keevituslähimid. Saab keevitada kõigis keevitusasendites ja ei ole vaja keevitaja pikemat treeningut ning väljaõppe aega võrreldes impulssvooluga MAG-keevitamisega.



Joonis 9.14. Elektroodimetalli siire ja keevitusvoolu kuju RMD-meetodil

### 9.2.9. EWM-Cold Arc<sup>R</sup>-meetod

Modifitseeritud lühikaarkeevitus minimaalse soojussisestuse ja keevitusdeformatsioonidega, kus kasutatakse uut tüüpi heade dünaamiliste omadustega keevitusinverterit ja väga kiiret keevitusprotsessi digitaalset juhtimist koos tagasidega [33]. Kasutatakse õhukese lehe (alates 0,3 mm) ja tsingitud pleki robotkeevituseks, aga samuti õhukese teraslehe (0,2–2,0 mm) ja erinevate metallide MAG-jootmiseks. Leiab laialdast kasutamist robotkeevitusel (Al-teras, Mg-teras) autotööstuses. Meetod võimaldab edukalt keevitada suuri õhupiluga (kuni 6 mm) detaile väheste pritsmete, minimaalsete keevitusdeformatsioonide ja õmbluse hea väliskujuga. Pinge ja voolu kõverad antud meetodil on toodud 9.15, kust on näha, et lühisvool on suhteliselt madal ja pärast elektroodi ning keevitusvanni lühise tekkimist langeb järsult keevitusvool ning edasisel kaare süütamisel lisatakse suhteliselt madal täiendav vooluimpulss. Õhukese teraslehe ja tsingitud pleki jootmisel kasutatakse Cu Si, Cu Al jt pronkstraati ja kaitsegaasina Ar või gaasisegu 99% Ar +1% CO<sub>2</sub>.



Joonis 9.15 Cold Arc-protsess

### 9.2.10. EWM-Force Arc<sup>R</sup>-meetod

Meetod on kaare pingelt ja keevitusvoolu suuruse poolest MAG-lühikaare ja pihustuskaare vahele jääv piirkond (vt joonis 8.1), kus kasutatakse lühemat keevituskaart suurema plasmajoa survega. Kasutades heade dünaamiliste omadustega invertervooluallikaid, saadakse eriti stabiilne ja otse suunatud keevituskaar. Kaare pikkuse lühenedes ei teki pritsmeid. Vooluallikas kontrollib väga lühikeste ajavahemike järel pinget ja voolu ning keevituskaare pikkuse muutumisel hoitakse neid optimaalsel tasemel. Lisaks saab keevitada suurte voolukontakti kaugustel, tagades suure läbikeevituse sügavuse. Välistatud on keevitusdefektid, nagu siselõiked ja poorsus.

Force Arc-meetod võimaldab keevitada sügava läbikeevitusega ja optimaalse kujuga T-liiteid. Põhimõtteliselt on võimalik keevitada T-liidet ühelt poolt täieliku läbikeevitusega. Näiteks saab keevitada 10 mm paksuseid plaate T-liites, jättes nende vahele 2 mm õhupilu ühelt poolt koos teisel pool õmblust vastasvalliku moodustamisega. Meetod võimaldab keevitada hästi kitsastes tingimustes, kus ei ole võimalik püstolit lähendada detailidele .

### 9.3. Kõrgtootlikud keevitusprotsessid

MAG-keevitusprotsesside edasiarendamisel on paksema materjali keevitamisel põhieesmärgiks keevituskaare võimsuse tõstmine ja läbikeevituse suurendamine, õhema materjali korral keevituskiiruse suurendamine. Maailmas on tuntud palju patenteeritud ja erinevate kaubamärkidega kaitstud kõrgtootlikke MAG-protsesse: Rapid processing, High Speed welding, Hi-DEP, TIME. Erinevalt tavaprotsessist kasutatakse pihustuskaarest suuremaid voolu ja pinge väärtusi, mille tulemusel keevituskaar hakkab pöörlema või selliseid keevitusparameetrite kombinatsioone (pinge-traadi etteandekiirus), mida ei ole varem kasutatud. Samuti võib oluliselt erineda kaitsegaasi koostis. Kasutatakse juhitavaid invertervooluallikaid. Rääbustis keevitamisest on üle võetud 2 traadi, 2 voolukontakti ja 2 erineva vooluallikaga keevitusprotsess, mis on tuntud kui MAG-tandemkeevitus. Kõrgtootlike keevitusprotsesside eelised on:

- suur tootlikkus, kuni 25 kg/h,
- saab ühe läbimiga keevitada nurkõmblusi kõrgusega 2,5–12 mm,
- keevituskiirus, kuni 2–3 m/min,
- ühtlane läbikeevitus,
- saab juhtida keevitõmbluse ristlõike kuju,
- vähe pritsmeid,
- väikesed deformatsioonid.

#### 9.3.1. RAPID ARC- meetod

Kuulub gaasikompanii AGA poolt patenteeritud tooterühma Rapid Processing alla ja on välja töötatud 1990ndate aastate alguses. On mõeldud keevituskiiruse tõstmiseks kuni 100–200 cm/min forsseeritud lühikaare režiimil (*forced short arc*). Kasutatakse suuremat traadi etteandekiirust, suurt traadi väljaulatust ehk voolukontakti kaugust ja pihustusrežiimist madalamat kaare pinget, kaitsegaasiks kasutatakse segugaasi, millel on hea soojusjuhtivus ja madal osüdeerumispotentsiaal koostisega 9,2% Ar + 8% CO<sub>2</sub> + 0,003% NO tuntud kaubamärgi Mison 8 all. Pikem traadi väljaulatus püstolist suurendab traadi elektritakistust, mille tõttu voolutugevus langeb ja väljaulatuv traadiosa kuumeneb. Kasvab traadi sulamiskiirus ja tootlikkus. On võimalik kasutada olemasolevaid MAG-seadmeid.

Võrreldes tavalise MIG/MAG-lühikaarkeevitusega kasvab keevituskiirus 2–3 korda, keevitustootlikkus e pealesulatustegur suureneb kuni 2 korda ja soojussisestus väheneb 10%.

#### 9.3.2. RAPID MELT™-meetod

Kuulub AGA kaubamärgi Rapid Processing alla ja võimaldab suurendada pealesulatustegurit kuni 25 kg/h. Madalamatel kaarepingetel on tegemist forsseeritud pihustuskaarega, kõrgematel kaarepingetel pöörleva keevituskaarega. Traadi etteandekiirus on tunduvalt suurem kui tavalise MAG-keevituse puhul. On nõutavad võimsad vooluallikad ja suure kiirusega traadi etteandemehhanismid. Kaitsegaasiks kasutatakse gaasisegu 92% Ar + 8% CO<sub>2</sub>. Meetod sobib suurte nurkõmbluste (a = 12mm) ja põkkliidete täiteläbimite keevitamiseks või pealekeevitamiseks. Kasutatakse vedelikjahutusega erikonstruktsiooniga keevituspüstoleid ajamiga püstolil.

Kuna RAPID MELT-meetod kasutab suurt keevituskaare võimsust, on soovitatav kasutada masinkeevitust keevitustornide või robotite abil.

### 9.3.3. TIME-meetod

TIME-meetodi (*Transferred Ionized Molten Energy*) patenteeris 1984. aastal J. Church ja see põhineb 4-komponendilise kaitsegaasi kasutamisel ja suurel traadi etteandekiirusel (kuni 50 m/min).

Tööstuslik rakendus algas 1990. a pärast vastava IIW dokumendi kirjastamist. Meetodit on edasi arendatud Jaapanis. Võimaldab tõsta pealesulamistegurit kuni 30%, samuti tootlikkust ja läbikeevituse suurust.

Patendiga on kaetud järgmised gaaside sisalduse piirkonnad:

Ar = 40–70%

He = 25–60%

CO<sub>2</sub> = 3–10%

O<sub>2</sub> = 0,1–1,0%

Tavalise MAG-keevitusega võrreldes on eeliseks suurem keevituskaare energiatihedus ja sulatusvõimsus, eriline läbikeevituse profiil, mis kõik on tingitud plasma tekkimise intensiivsusest keevituskaares. Meetod sobib pikkade suure ristlõikega keevisliidete valmistamiseks. TIME-meetod võib olla käsikeevitus, mehhaniseeritud keevitus või automaatkeevitus.

Erinevate materjalide jaoks soovitatakse eri segugaase:

- süsinik ja madallegeerterased:

65% Ar + 26,5% He + 8% CO<sub>2</sub> + 0,5% O<sub>2</sub>

- kõrgtugevate, näiteks parendatud teraste jaoks soovitatakse:

44% Ar + 52% He + 3,8% CO<sub>2</sub> + 0,14% O<sub>2</sub>

- roostevabade teraste jaoks:

41,6% Ar + 55% He + 3,2% CO<sub>2</sub> + 0,14 O<sub>2</sub>

Võrreldes traditsioonilise MAG-keevitusega kasutatakse jämedamat keevitustraati  $\varnothing 1,6$  mm tavaprotsessi 1,2 mm vastu, keevitusvool kasvab 1,5–2 korda, kaarepinge on kõrgem (42–46 V) ja keevituskiirus kuni 2 korda suurem. Paksema plaadi (nt 20 mm) pökk-keevitusel on võimalik vähendada keevituslähimite arvu kuni 3 korda.

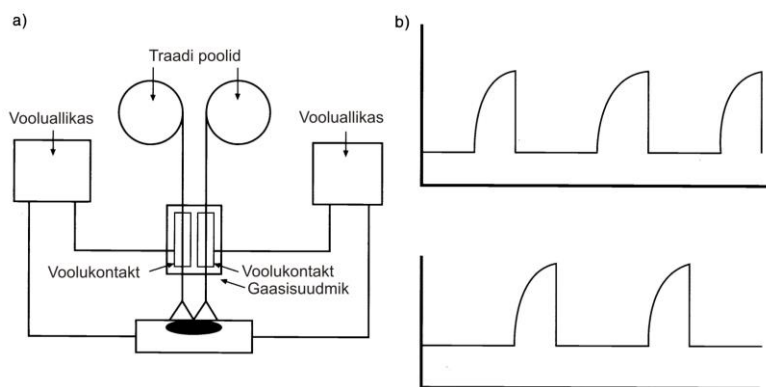
TIME-meetodi edasiarendust kahe keevitustraadi kasutamisega pakub Fronius International GmbH [29], mis on tuntud TIME Twin kaubamärgi all. Kasutatakse kahte vooluallikat, kahte eraldi traadi etteandemehhanismi, eraldi voolukontakte. Vedelikjahutusega voolukontaktid, mille kaugust detailide pinnalt saab eraldi reguleerida, asetsevad ühises gaasisuudmikus. Üheaegselt põleb kaks keevituskaart, millest igaühe võimsus võib olla erinev. Keevituskiirus võrreldes hariliku MAG-keevitusega kasvab 2–3 korda, saadakse kvaliteetne ja pritsmeteta õmblus. Kasutatakse 4-komponendilist kaitsegaasi. Hea soojusjuhtivusega He lisamine segugaasile tõstab keevituskaare sulatusvõimet ja võimaldab tõsta keevituskiirust. Erinevate sulamite keevitamisel kasutatakse optimaalse CO<sub>2</sub> või O<sub>2</sub> sisaldusega gaaside segusid. Keevitusmeetodit iseloomustab kõrge pealesulatustegur – üle 10 kg/h. Kahe keevitustraadi üheaegne kasutamine võimaldab paremini juhtida keevitusvanni ja eemaldada sealt lahustunud gaase ning nii vältida pooride teket. Alumiiniumi keevitamiseks kasutatakse impulssvoolu. Tuleb märkusena lisada, et termin „twin-keevitus“ tähendab tavaliselt nii MAG-keevitusel kui ka rübustis keevitamisel lahendust, kui kasutatakse kahte keevitustraati, ühte ühist vooluallikat ja ühte ühist voolukontakti. Kaubamärgi nimetus on mõnevõrra eksitav.



### 9.3.4. Tandem-MAG-keevitus

Tandemkeevitus töötati välja keevitamiseks rübustis, mis hiljem on Saksamaal edasi arendatud tööstuslikuks MAG-keevituseks. Tandemkeevitust iseloomustab kahe keevitusstraadi, kahe traadi etteandemehhanismi, kahe eraldi vooluallika, kahe voolukontakti ja ühe ühise gaasisuudmiku kasutamine. Saksa firma Cloos GMBH on välja töötanud kiirkeevituse seadmed keevitusrobotile ja mehhaniseeritud keevitamiseks. Põleb kaks elektrooniliselt juhitud impulssvooluga tekitatud keevituskaart. Keevitusprotsessi optimeerimisel juhitakse ja sünkroniseeritakse mõlemat keevituskaart. Meetodi eeliseks on kuni 5 korda suurem keevituskiirus ja kvaliteetne keevisliide võrreldes tavalise MAG-keevitusega.

Alumiiniumi tandem-MIG-keevitusel kasutatakse kahte keevitusstraati üksteisest 4–10 mm kaugusel, sageli ka üksteise suhtes 10-kraadise nurga all. Mõlemal traadil kasutatakse erinevate parameetritega keevitusvoolu (pinge, traadi etteandekiirus, impulssvoolu parameetrid). Impulssvoolu kasutamisel eri aegadel eralduvad metallitilgad ei sega üksteist. Nurkõmbluste keevitamisel võib keevituskiirus tõusta kuni 3 korda võrreldes tavakeevitusega.



Joonis 9.16. Tandemkeevituse skeem. Voolukõverad erinevatel elektroodidel

Meetodi eelised:

- suur kaare võimsus ja voolutugevus kuni 900 A pidevvoolul ja 1500 A impulssvoolul;
- suur keevituskiirus, näiteks nurkõmblusel  $a = 8$  mm kuni 80 cm/min, plekist paksusega  $t = 2\text{--}3$  mm põkkõmblustel kuni 6 m/min;
- suur tootlikkus, pealesulatustegur kuni 24 kg/h;
- väike soojussisestus;
- stabiilne keevituskaar;
- saab kasutada robotitel koos servajälgimissüsteemiga.

### 9.3.5 Twin-keevitus

Twin-MIG/MAG-keevitus on kahe keevitusstraadiga rübustikeevituse edasiarendus, kus keevitusvanni kaitseks kasutatakse kaitsegaasi. Kasutatakse kahte keevitusstraadi pooli, mida juhitakse eraldi etteandemehhanismide abil keevituspüstolis-keevituspeas olevasse ühisesse voolukontakti, kasutatakse ka ühist gaasisuudmikut.

Kasutatakse üht suure võimsusega impulssvooluallikat, kuid erinevaid traadi etteandemehhanisme.

Saab suurendada keevituskiirust 1,5–2,0 m/min ja soojussisestust vahemikus 2,7–6,5 kJ/mm. Keevitamine toimub tavaliselt allasendis. Probleme võib tekkida tardunud keevitusvanni gaasikaitsega, kuna keevituskiirus suur. Meetod leiab tööstuses piiratud kasutamist.

### 9.3.6. Kitsaspilukeevitus (*narrow gap welding*)

Plaatide paksusega 25–300 mm sobib nn kitsaspilukeevitus, kus õmbluse servad on paralleelsed ja kasutatakse alusplaati või on kergelt kaldu U-servadega. Paralleelsete servadega detaile on lihtne ja odav valmistada, kuid probleemid tekivad keevismetalli kokkutõmbumisest ja kahanemisest, mis vähendavad allesjäänud pilu laiust. Soovitav on kasutada U-servakuju.

Sääst seisneb energia ja lisametalli kokkuhoius, lüheneb keevitusaeg, kuna õhupilu on väiksem. Samuti on väiksemad servade ettevalmistamise kulud, väiksem kuumutatud ala ja väiksem kõverdumine. Kasutatakse täppisjuhitavaid keevituspäid. Kasutatakse MIG-, TIG- kui ka räbustis keevitust.

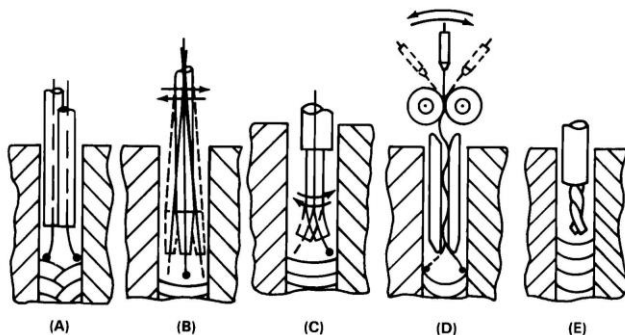
Probleem on selles, kuidas täpselt positioneerida MAG-keevituspead õhupilus, et tagada servade sulatamine. Kasutatakse erinevaid lahendusi, mida kirjeldab joonis 9.17

Skeemil A kasutatakse kahte keevitustraati ja volukontakti nn tandemlahendusena ning iga traat on suunatud ühele servale, sulatab ühe serva, ja nii tekivad ülekattega läbimid.

Skeemil B kasutatakse ühte traati, millele antakse ostsilleeruvad võnkeliikumised. Selleks kasutatakse mehaanilist ajamit. Leiab kasutamist harva. Võidakse tarvitada painutatud kõverat volukontakti ja võngutatakse seda.

Skeemil C keevitustraadi otsa võngutatakse umbes 15 kraadi ja liigutatakse edasi-tagasi.

Skeemil D tekitatakse lainekujuline keevitustraati enne andmist etteanderullidele, mis väljudes volukontaktist võngub kitsas õhupilus ühelt servalt teisele. Skeemil E kasutatakse kahte kokkukeeratud traati.



Joonis 9. 17. Kitsaspilu MAG-keevitus

Kitsaspilu TIG-keevitus (*narrow gap TIG-welding*) – lühend NG-TIG.

Kasutatakse U-servavahemikuga kuni 20 mm paksuste põkkõmbluste keevitamiseks õhupiluga 6–8 mm paksuseinaliste torude, mahutite reaktorite keevitamisel. Keevitussvanni juhitakse traati vastava keevituspea abil ja kasutatakse impulssvoolu.

### TIG-külmtraatkeevitus

Mehhaniseeritud keevitamisel juhitakse traadi etteandemehhanismi abil kaare piirkonda keevitusvanni esiosasse keevituskaare ette keevitustraati. Traadile voolu ei rakendata. Traadi etteandekiirus on väiksem kui MIG/MAG-keevitusel. Sobib käsitsi kui ka torude mehhaniseeritud keevitamiseks, näiteks orbitaalkeevituseks.

### TIG-kuumtraatkeevitus

Eelmise meetodi edasiarendus, kus traati kuumutatakse seda läbiva elektrivooluga ja traadi takistuse tõttu traat kuumeneb. See kiirendab traadi sulamist ja saab suurendada traadi etteandekiirust. Kuumutatakse tavaliselt vahelduvvooluga ja voolu suurus on umbes pool keevitusvoolust. Traati juhitakse keevitusvanni tagaosasse või keevituskaare taha.

### TIG-orbitaalkeevitus

Torude põkkliidete ja toruplaatide keevitamiseks kasutatakse toru ümber kinnitatavat tangidekujulist seadet. Torukujulistes tangides oleva ajami abil liigub keevituspea ümber toru. Keevitusparameetreid ja elektroodi kaldenurka kontrollitakse tarkvara abil.

### Laserhübriidkeevitus e hübriid-MAG-keevitus

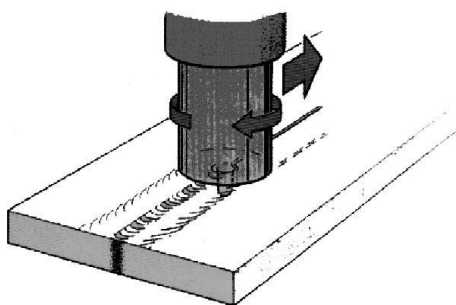
Kombineeritakse kahte keevitusprotsessi – laserkeevitust ja MIG/MAG-keevitust. Soojuslikult kontsentreeritud laserikiir sulatab kitsalt põhimetalli servi ja servavahemikku sildab keevitustraati. Nii on võimalik keevitada suurema õhupiluga detaile.

Hübriidkeevitus on edasi arendatud alumiiniumi robotkeevituseks. Tööstuslikud seadmed on saadaval Froniuse tootevalikus [29]. Kasutatakse laserit võimsusega 4000 W ja erikonstruktsiooniga keevituspead, kus on integreeritud nii laseri optika kui ka MIG/MAG-põlet. On teateid protsessi kasutamisest ka teiste materjalide keevitamiseks. Vaatamata laseri kõrgele hinnale on majanduslik efekt võimalik tänu kuni 6 korda suuremale keevituskiirusele.

Hübriidkeevitus on leidnud kasutamist autotööstuses, kuid tehnoloogiast on huvitunud ka konteinerite ja torujuhtmete valmistajad.

### 9.3.7. Vastakhõõrdkeevitus e otshõõrdkeevitus

Mehaaniline keevitusmeetod, kus liidetavate materjalide servad viiakse otsfreesitaolise tööriista hõõrdumise teel vastu liidetavate detailide servi plastsesse olekusse, on leiutatud 1991. a TWI poolt ja tuntud kui vastakhõõrdkeevitus (*friction stir welding*).



Joonis 9.18. Vastakhõõrdkeevituse põhimõte

Pöörlev tööriist kuumutab liidetavate detailide servi temperatuurini kuni  $0,8 T_{sul}$ , näiteks alumiiniumi korral kuni 400–500 °C, kus metall läheb üle plastsesse olekusse. Tööriista esiserva all olev metall siirdub hüdrostaatilise surve all tahapoole ja paigutub ümber, moodustades liite.

Leiab kasutamist plastsete metallide, nagu Al, Cu, Zn, Mg, kui ka segaliidete Al–teras saamiseks. Liite esipinnal on näha tööriista hõõrdumisjäljed, liite lõpus moodustub süvend või ava. Leiab kasutamist alumiiniumist kergkonstruktsioonide valmistamiseks. Tänapäeval võidakse kasutada autotööstuses robotkeevitusena, kusjuures saadakse suur keevituskiirus, mis ulatub kuni 2 m/min. Probleemiks oli esialgu tööriista lühike tööaeg, mis võimaldas keevitada kuni 1000–2000 meetrit õmblust. Tänapäeval, pärast lennukiehituses kasutatavate kuumustugeva turbiiniterase kasutamist, on tööriista tööiga märgatavalt kasvanud.

*Vastakhõõrdkeevituse eelised kaarkeevituse protsesside ees on:*

- vähenevad valmistuskulud ja valmistusaeg, mis võivad võrreldes Al MIG-keevitusega väheneda kuni 5 korda;
- ei ole vaja kasutada lisametalli ega katsegaasi;
- keevisliite parem kvaliteet, kuna vähenevad või üldse ei esine keevitusdefekte ja mehaaniliste keevitusparameetrite ohjamine on lihtne;
- materjali kalestumise tõttu head keevisliite mehaanilised omadused;
- suur toodete mõõtmete ja kuju täpsus;
- saab valmistada mõõtmetelt pikki konstruktsioone;
- keskkonda ei eraldu mürgiseid ühendeid.

*Vastakhõõrdkeevituse puudused on:*

- vajadus kinnitada detaile jäigalt pinki;
- detaili tekib läbiv ava, mille vältimiseks on vaja kasutada lõpetusplaate;
- tööriista lühike tööiga, suured kulutused;
- eripinkide kõrge hind.

## Kokkuvõte

1. Keevitusinverterite kasutamine võimaldab keevitusparameetrite digitaalset juhtimist ja salvestamist ning tööd hõlbustavate lisafunktsioonide kasutamist.

2. Uued MAG-keevitusmeetodid põhinevad kas tarkvaraga juhitava või impulssvoolu kasutamisel.

3. Tänapäevased MAG-keevitusmeetodid võimaldavad hästi keevitada õhukest materjali ja tagada seejuures hea juure läbikeevituse ning sujuva ülemineku õmbluselt põhimetallile.

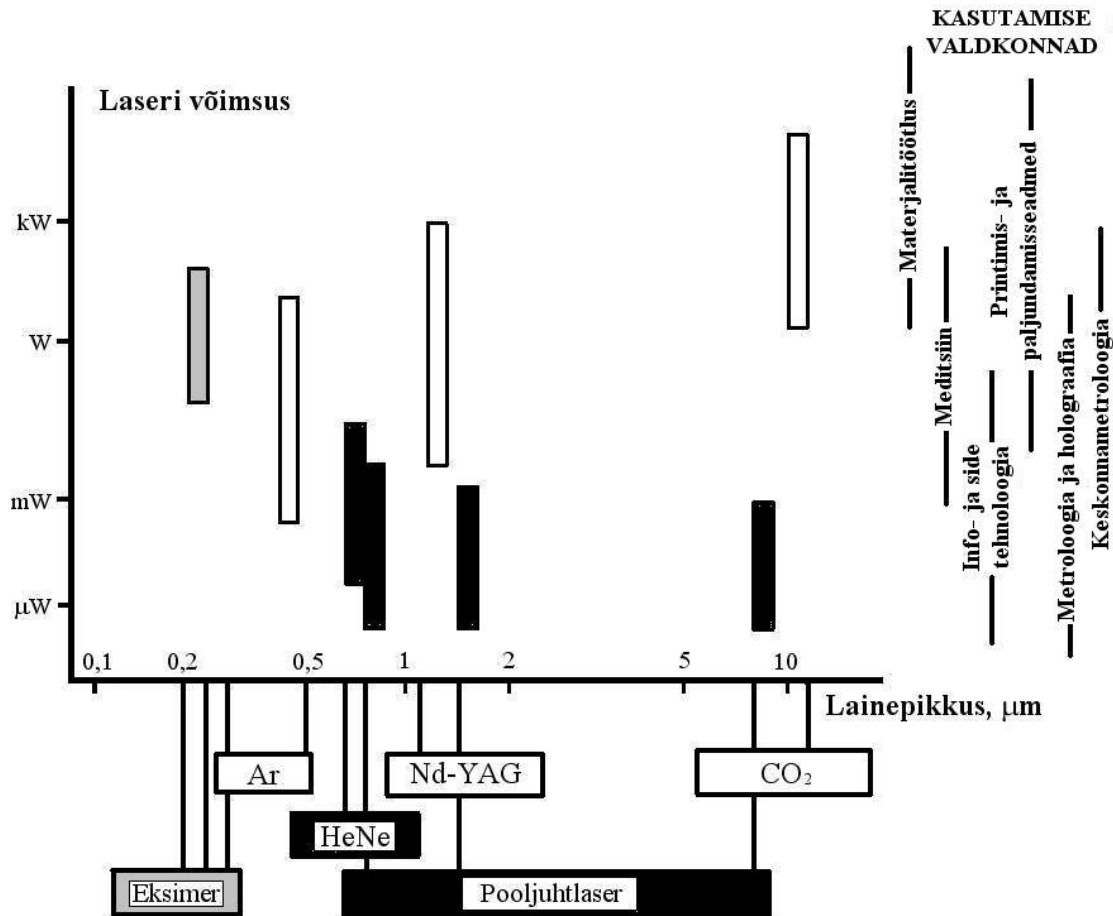
4. Kõrgtootlikud MAG-protsessid põhinevad suurte keevitusvoolude ja eriliste segu-gaaside kasutamisel.

5. Plastsete materjalide (Al, Cu) kõrgtootlikuks ja defektivabaks keevitamiseks sobib mehaaniline vastak- e otshõõrdkeevituse meetod (*stir friction welding*).

# 10. LASERLÕIKAMINE JA LASERKEEVITUS

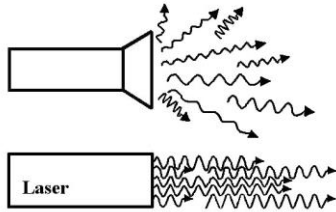
## 10.1. Lasertöötlemise põhimõte

Materjalide lasertöötlemine (*laser material processing*) põhineb kontsentreeritud ja võimendatud laserikiire soojuslikul toimel ning leiab kasutamist materjalide lõikamisel, puurimisel, keevitamisel, termotöötlemisel. Valguskiire allikaks on optiline kvantgeneraator ehk laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*).



Joonis 10.1. Laserite kasutusvaldkonnad olenevalt lainepikkusest

Erinevalt tavavalgusallikatest, mille kiirgusvoog moodustub väga suure hulga elementaar-kiirgurite (aatomite, ioonide, molekulide) kaotilistest mikrosähvatustest ja mida iseloomustab valguse suur hajumine, mittekoherentsus ning polükromaatilisus (joonis 10.2), ühildavad laserid üksiksähvatused ühistaktis võnkuvaks valguslaineiks. Viimane on tava- valgusest oluliselt koherentsem, monokromaatiline, intensiivne ja suunatav. Laseri valgus langeb väga kitsaste lainepikkuste vahemikku ja kõik lained on ühes faasis. Tingituna suurest võimsustihedusest (kuni  $10^6 \text{ W/mm}^2$ ) toimub töötlemisel materjalide lokaalne sulatamine või isegi aurustumine.



Joonis10.2. Laserikiirgus ja tavavalgus

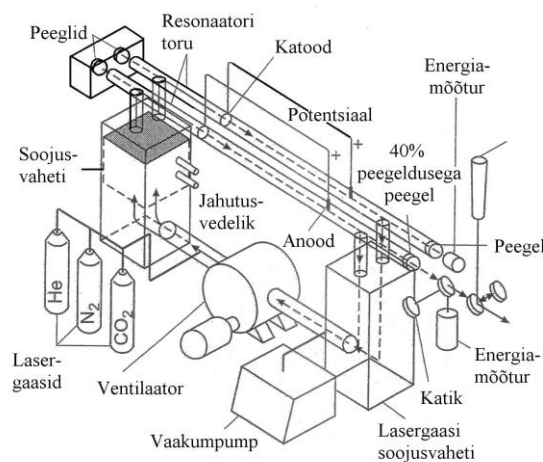
## 10.2. Tööstuslaserite liigitus

Kiirgusaine oleku järgi liigitatakse laserid järgmiselt:

- 1) gaaslaserid,
- 2) tahkislaserid,
- 3) dioodlaserid e pooljuhtlaserid,
- 4) vedeliklaserid.

Laserkeevitamisel kasutatakse tootmises põhiliselt gaaslasereid ( $\text{CO}_2$ ) ja tahkislasereid (Nd:YAG), kuid tänapäeval kasvab kiiresti ka dioodlaserite osatähtsus.

Gaaslaseritena kasutatakse põhiliselt  $\text{CO}_2$ -lasereid (joonis 10.3). Kahe peegli vaheline resonator on täidetud gaasiseguga järgneva mahusuhtega:  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:2:10$ . Madal-surveline gaaslahendus süüdatakse kahe kõrgpingelise elektroodi vahel. Lämmastiku aatomid ergastatakse ja nad annavad võnkumisenergia üle  $\text{CO}_2$  aatomitele. Heelium kui kõrge soojusjuhtivusega gaas jahutab gaaside segu ja ühtlasi stabiliseerib protsessi. Kiirguse emissiooni jätkamiseks gaasisegu regenereeritakse. See toimub tsirkulatsiooni teel soojusvahetites kompressorite abil. Suure väljundvõimsusega laserikiir fookustatakse ja juhitakse peeglite abil. Kaitsegaas (He või Ar/He-segu) kaitseb läätseid ja keevismetalli. Saab keevitada terasplaati paksusega kuni 26 mm. Raskusi esineb kiirguse peegeldumisega alumiiniumi ja magneesiumi, kulla, hõbeda ning vase keevitamisel.

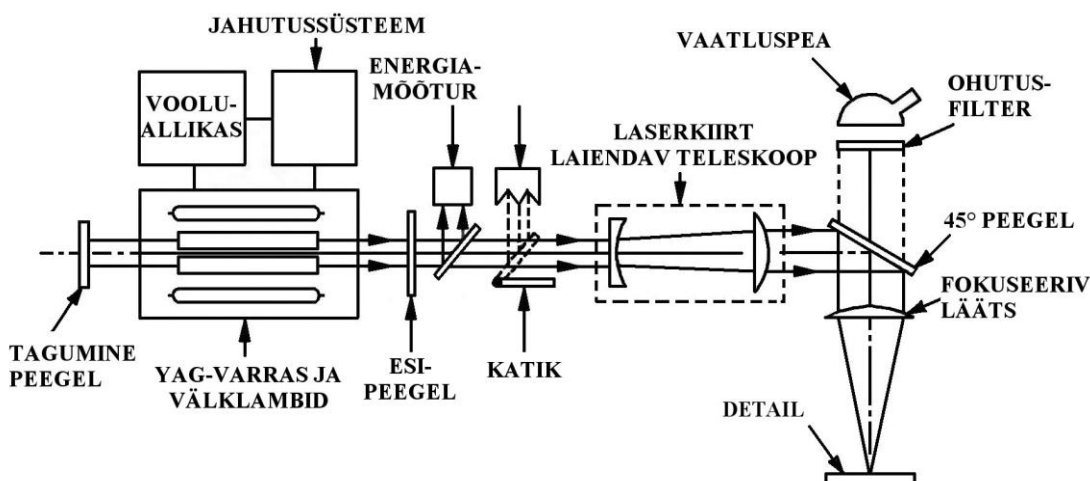


Joonis 10.3. Gaaslaser

CO<sub>2</sub>-laserid jagunevad oma konstruktsioonilt 3 põhirühma, millest keevitamiseks ja lõikamiseks kasutatakse pikivoolamisega alalisvoolu või kõrgsagedusvoolulasereid (*rapid-longitudinal-flow laser*). CO<sub>2</sub>-lasereid iseloomustab suur lainepikkus – 10,6 μm, hea laserikiire kvaliteet (madal moodi väärtus), suur võimsus – kuni 40 kW, suured mõõtmed. Kõige uuemad gaaslasereid, mis on tuntud kui difusioonjahutatavad (*diffusion-cooled slab lasers*), eristuvad hea laserikiire kvaliteedi, kompaktsuse ja odavate ekspluatatsioonikuludega.

Tahkislasereite aktiivosa on valmistatud YAG-kristallist (*Yttrium-Aluminium-Garnet*) (rubiin, neodüüm-ütrium-alumiinium-granaat e. lühidalt ND:YAG, ND:glass), millele on lisatud neodüümi (Nd<sup>3+</sup>) või ütterbiumi (b<sup>3+</sup>) ioone, kus ioonidel on laseraktiivse keskkonna roll. Tänapäeval on kasutusel põhiliselt ND:YAG-laserid, kuid tulevikus ilmselt Yb:YAG-laserid. Tahkislasereid iseloomustab väiksem lainepikkus – 1,06 μm, võimsus on piirides 30–5000 W. Impulssrežiimis on võimalik saavutada hetkelist võimsust kuni 100 kW. Ergastamiseks kasutatakse tavaliselt impulsslampi. Väiksem lainepikkus võimaldab kasutada kiudoptilisi kaableid ja fookustada tavaliste läätsede abil ning sobib seetõttu hästi robotkeevituseks. Saab kasutada selliste raskelt keevitatavate materjalide keevitamiseks, nagu Ta, Zr, Inconel jt. Teraste keevitamisel on materjali paksus kuni 6 mm.

Nd:YAG-lasereite puuduseks loetakse madalat kasutegurit – 4 %. Uutel diodergastumisega laseritel on kasutegur kuni 10 %, paremat laserikiire kvaliteeti ja pikemat diodide tööiga kui impulsslampidega laserid.



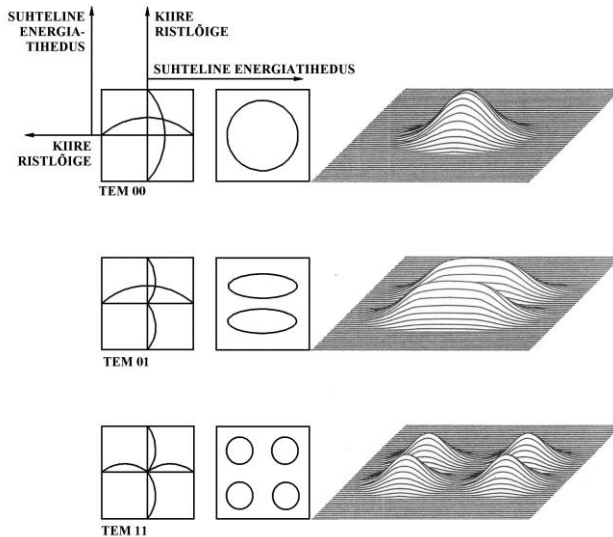
Joonis 10.4. Neodüümlaseri tööpõhimõte

Diodlaserid kuuluvad pooljuhtlaserite rühma ja nende aktiivosa on valmistatud GaAs. Eeliseks loetakse kõrget kasutegurit – kuni 35 % ja väikeseid mõõtmeid. Puuduseks loetakse väikest laserikiire võimsustihedust ( $10^3 \text{ W/cm}^2$ ) ja väiksemat läbikeevituse suurust. Eeliseks on pikem tööiga võrreldes lamplaseritga (10 000 tundi vs 1000 tundi). Esialgu on diodlaserid veel kallid ja halva kiire kvaliteediga, s.t on raske kiirt efektiivselt kontsentreerida. Diodlasereid iseloomustab lainepikkus  $\lambda = 808 \text{ nm}$ , võimsus kuni 200 W ning kiire ülekande peeglite abil.

Ketaslasereites (*disc laser*) kasutatakse Yb kristalle, lainepikkus on 940 nm. Kettad on läbimõõduga kuni 10 mm ja paksusega 150–300 μm. Kasutusel alates 2004. aastast. Eeliseks on hea kasutegur – kuni 20%, kompaktsus, madal keevituse soojussisestus.

### 10.3. Laserikiire kvaliteet ja laserikiire-materjali koosmõju

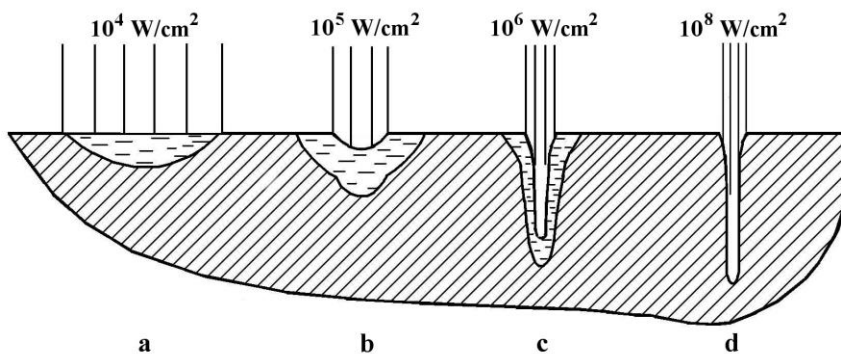
Laserikiire kvaliteeti hinnatakse fookustamise abil ja mõõdetakse moodiga –  $TEM_{mn}$  (*transverse electromagnetic mode*). Hinnatakse kiirguse intensiivsuse jaotust kahes ristivas tasapinnas. Kordaja  $m$  näitab sügavike (orgude) arvu X-telje suunas ja kordaja  $n$  – Y-telje suunas (joon 10.5). Kõige kvaliteetsem laserikiir on moodiga  $TEM_{00}$ , kus kiirgus on jaotunud mõlemas suunas sümmeetriliselt Gaussi kõvera järgi.



Joonis 10.5 Laserikiire mood

### Laserikiire-materjali koosmõju

Laser- ja elektron(kiir)keevitusel sõltub keevitusvanni ristlõike kuju rakendatud energiatihedusest. Väikestel energiatihedustel ( $\sim 10^4 \text{ W/cm}^2$ ) neeldub kogu soojus toote pinnas. Tekib analoogselt teiste keevitusprotsessidega iseloomulik poolsfääriline keevitusvann (joonis 10.6).

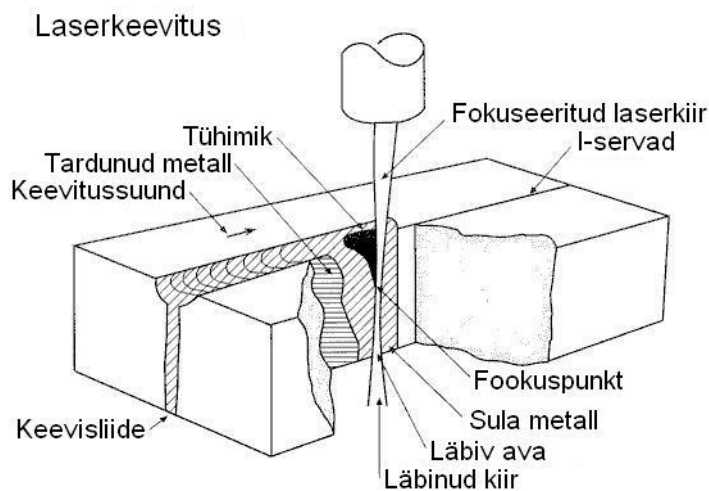


Joonis 10.6. Keevitusvanni ristlõige olenevalt laserikiire energiatihedusest

Edasisel energiatiheduse kasvul (nt.  $10^6 \text{ W/cm}^2$ ) muutub oluliselt keevivanni moodustumise mehhanism ja vanni kuju. Keevitatav metall aurustub laserikiire all, surudes sula keevismetalli välja keevivanni keskosast ja moodustades nn kraatri. Metalliaurud vähendavad vedela metallikihi paksust kiire all, parandades nii metalli sulatamist keevivanni



põhjas. Laserikiire võimsuse suurenedes tekib gaasikanali ava läbimõõduga  $\varnothing = 0,1-0,5$  mm, mille ümbert sulametall voolab põhiliselt vastupidiselt keevitussuunale. Sulakeevismetall voolab laserikiire liikumisel kraatri esiseinast vastaspoolele. Toime sõltub nii metalliaurude surve kanalile kui ka sulametalli pindpinevusest. Kuna keevitamise käigus laserikiir mõjub gaasikanali esiseinale, tekib seal kõrgem temperatuur ja järelkult suurem gaaside surve, mis surub vedelat metalli keevisvanni tagaossa. Keevisvannile mõjuvad kapillaarjõud olenevalt temperatuuri gradiendist. Kuna gaasikanali esiseinal on temperatuur kõrgem, siis seal vähenavad pindpinevusjõud ja sulametall voolab kraatrist tahapoole. Seoses metalli aurustumisega ja kraatri tekkimisega omandab keevitusvanni ristlõige nn lukuaugu kuju ja inglise keeles kutsutakse sellist keevitusrežiimi *keyhole welding*. Kui kraater läbib metalli, siis võib protsessi nimetada läbistavaks keevituseks. Kui ei teki läbivat ava, siis kutsutakse seda sügava läbisulatusega keevitamiseks (*deep penetration welding*). Avade puurimisel on vaja suurendada energiatihedust sellisel määral, et on ainult materjali aurustumine.



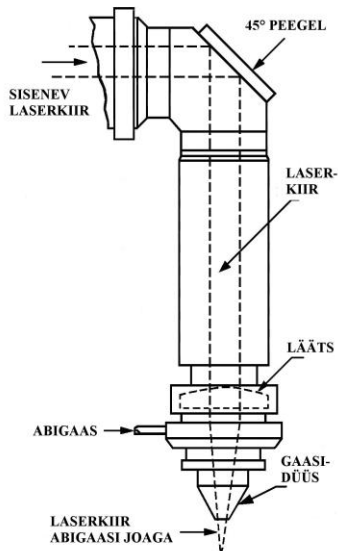
Joonis 10.7. Läbistav e *keyhole*-keevitus

## 10.4. Tööstusliku laserseadme põhiosad

Laserseadme põhiosad on:

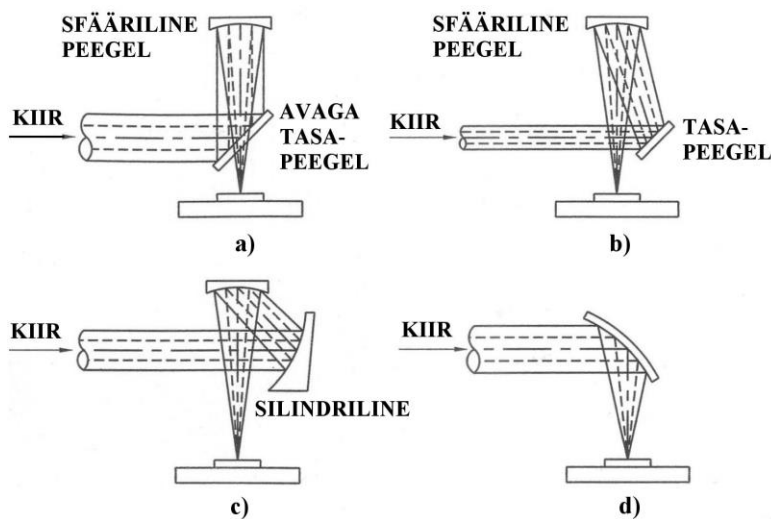
1. Laser, mis sisaldab:
  - laserikiirguse allikat,
  - toiteallikat,
  - jahutussüsteemi,
  - gaasivarustuse süsteemi (CO<sub>2</sub>-laserid).
2. Laserikiire manipuleerimise ehk juhtimise ning fokuseerimise süsteem.
3. Toote või laserpea käsitlemise seade (robot või CNC-töölaud).

Laserikiire manipuleerimiseks kasutatakse CO<sub>2</sub>-laseritel peegleid ja fokuseerimiseks läätsi või peegleid.



Joonis 10.8. Laserikiire fokuseerimine

Laserikiire punkti läbimõõt on võrdeline optilise süsteemi fookuskaugusega. Sageli suurendatakse enne fokuseerimist laserikiire läbimõõtu, mille korral saab kasutada suurema fookuskaugusega optikat. Liiga väikese fookuskauguse korral võivad metallaurud ja pritsmed kahjustada optikat. Nd:YAG-laseritel käsitletakse laserikiirt läätsede ja peeglite, samuti fiiberoptilise kaabli abil. Kaabli pikkus võib ulatuda saja meetrini.



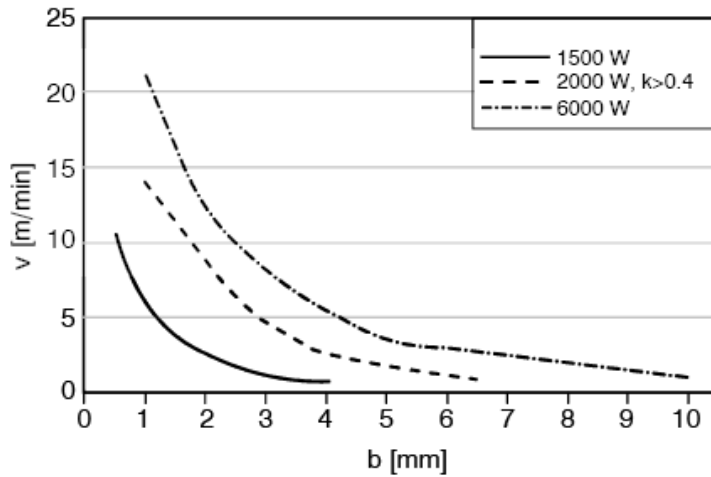
Joonis 10.9. Laserikiire fokuseerimiselahendusi

## 10.5. Laserkeevituse parameetrid

Laserkeevituse põhiparameetrid on: laseri võimsus  $P$  (W), laseri intensiivsus  $I$  ( $W/cm^2$ ) ja keevituskiirus  $v$  (m/min).

## Laseri võimsus

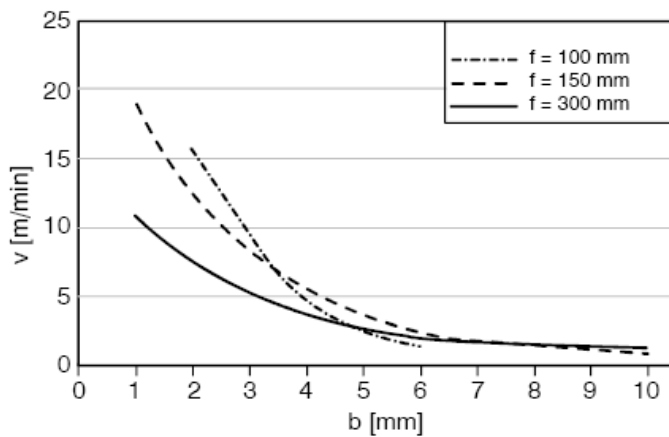
Laseri võimsus mõjutab keevituskiirust ja läbikeevituse suurust (joon 10.10). Suurem kiirus vähendab keevitussügavust ja annab kitsama keevisõmbluse.



Joonis 10.10. Keevituskiiruse, laseri võimsuse ja läbikeevituse sügavuse vahelised seosed [27]

## Laserikiire fookuskaugus $f$

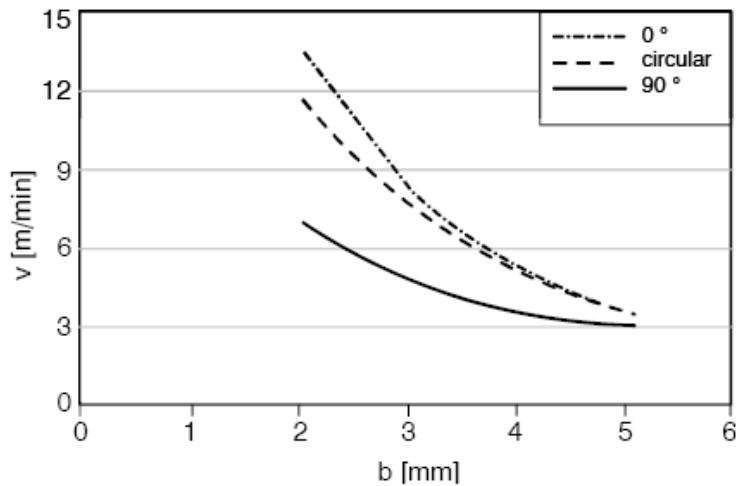
Saavutatav fookustäpi läbimõõt ja läbikeevituse sügavus sõltuvad laserikiire kvaliteedist. Fookustäpi läbimõõt on määratud fokuseeriva optika fookuskaugusega. Väike fookustäpi läbimõõt võimaldab suurema energiatiheduse ja võimalikult suure keevituskiiruse. Kui fookuskaugus on lühike ja fookus väike, siis saavutatakse suurim keevituskiirus väikese keevitussügavuse juures, nagu on näha joonisel 10.11.



Joonis 10.11 Keevituskiiruse, läbikeevituse sügavuse ja fookuskauguse vahelised seosed [27]

## Laserikiirgus polarisatsioon

Laserkeevitamisel lineaarse polarisatsiooniga laservalgusega saavutatakse suurim keevituskiirus, kui polarisatsioon on paralleelne ettenihke suunaga [27], joonis 10.13.



Joonis 10.13. Keevituskiiruse ja keevitussügavuse sõltuvus polarisatsioonist

**Keevisõmbluse kuju ja läbikeevituse sügavus** (keevitatava materjali paksus) sõltuvad järgmistest parameetritest:

- 1) laserikiirguse võimsusest ja intensiivsusest;
- 2) laserikiire kontsentreeritusest ehk moodist;
- 3) optilise süsteemi fookuskaugusest;
- 4) fookustäpi läbimõõdust;
- 5) keevituskiirusest;
- 6) plasmagaasi vooluhulgast;
- 7) kaitsegaasi kasutamisest ja vooluhulgast.

**Laserkeevituse eelised** elekterkaarkeevituse ees on järgmised:

- 1) minimaalne soojussisestus (energiasisestus) metalli servade sulatamiseks, vähenevad termomõjutsooni laius ja keevitusdeformatsioonid;
- 2) suurem keevituskiirus ja tootlikkus;
- 3) keevitatavate metallide valik on suur, saab keevitada erinevaid metalle ja plaste;
- 4) protsessi juhtimine arvuti ja arvjuhtimise (CNC) süsteemide abil. Tootmises laialdaselt kasutatav.

**Laserkeevituse puudused:**

- 1) toodete koostamise täpsuse ja positsioneerimise kõrged nõuded. Vaja kontrollida fookuspunkti asukohta;
- 2) keevitatava materjali paksus limiteeritud;
- 3) suuremate laserite kasutamisel vaja kasutada plasmagaasi;
- 4) võimalik pooride ja oksiidsuletiste defektide tekkimine tingituna metalli kiirest tardumisest;
- 5) kallid seadmed toodete või laserikiire positsioneerimiseks ja käsitlemiseks – 40–60% laserseadme hinnast.

## 10.6. Laserlõikamine

Lõikamine toimub üheaegselt suure võimsustihedusega ( $> 10^4$  W/mm<sup>2</sup>) laserikiire ja abistava gaasijoa-lõikegaasiga. Laserikiir mõjub nagu lineaarne soojusallikas, mis töötab läbistaval režiimil. Lõikegaasi poolt puhutakse sulanud metall lõikest (*kerf*) välja. Teatud juhtudel juhitakse lõiketsooni hapnikku. Tekitatakse intensiivne metalli põlemine (*combustion cutting*, *exothermic cutting*). Nii saab lõigata paksemat metalli.

**Laserpuurimine** on laserlõikamise protsess, võimaldades saada avasid läbimõõduga 2,5 µm kuni 1,5 mm. Materjali paksus on kuni 6 ava läbimõõtu. Avade puurimiseks metalli kasutatakse impulssrežiimis töötavaid Nd:YAG-lasereid. Keraamika, komposiitide, kummi ja plastide puurimisel kasutatakse CO<sub>2</sub>-lasereid.

Laserlõikamine võimaldab lõigata õhukest materjali väga täpselt ja kvaliteetse lõikepinnaga.

Laserlõikamisel eristatakse (vt. tabel 10.1):

- 1) hapniklaserlõikamist;
- 2) gaaslaserlõikamist;
- 3) lasersublimatsioonlõikamist.

Hapniklõikamisel saadakse u 40% energiast laserikiirest ja 60% eksotermilisest põlemisprotsessist. Hapnikujoa surve (kuni 7 baari) kindlustab, et pritsmed ei lendaks vastassuunda lõikepea optikale. Hapniklaserlõikamine on enim levinud ja suure kasuteguriga. Lõikekiirus sõltub suurel määral lõikehapnikku puhtusest. Näiteks kui hapniku puhtusastet tõsta 99,62%st kuni 99,7%ni, siis lõikekiirus kasvab 17%.

Metallide lõikamiseks kasutatakse nii CO<sub>2</sub>-lasereid kui ka Nd:YAG-lasereid, mis töötavad pidev- või impulssrežiimis. Impulssrežiimis töötavad laserid sobivad väga õhukese materjali, samuti teravate nurkadega kontuuride lõikamiseks. Laserlõikamisel kasutatavad gaasid on toodud tabelis 10.2.

Tabel 10.1

Laserlõikamise protsesside iseloomustus

Protsessi nimetus	Iseloomustus
Hapniklaserlõikamine, laserpõletuslõikamine ( <i>laser beam combustion cutting, exothermic cutting</i> )	Laserikiir kuumutab metalli süttimistemperatuurini. Materjal põleb hapnikujoas ja lõikeproduktid puhutakse välja lõikepinnast hapniku survega.
Gaaslaserlõikamine, lasersulatuslõikamine ( <i>laser beam fusion cutting</i> )	Materjali sulatab laserikiir ja puhutakse välja lõikegaasi (N <sub>2</sub> , Ar, He, suruõhk) poolt. Lasergaas kaitseb samuti lõikepea optilist süsteemi.
Lasersublimatsioonlõikamine ( <i>laser beam sublimation cutting</i> )	Materjal aurustab laserikiir ja puhutakse lõikest välja lõikegaasi (N <sub>2</sub> , Ar, He) poolt. Lasergaas kaitseb samuti lõikepea optilist süsteemi.

Laserlõikamisel kasutatavad gaasid

Lõikegaas	Materjal	Märkused
Suruõhk	Alumiinium Plastid Puit Komposiidid Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Klaas	Head tulemused paksusel kuni 1,5 mm
Hapnik	Süsinikteras Roostevaba teras Vask	Hea pinnakvaliteet, kiirus, paks oksiidikiht. Hea pinnakvaliteet paksustel kuni 3 mm.
Lämmastik	Roostevaba teras Alumiinium Ni-sulamid	Oksiidikihita puhtad lõikeservad, paksustel kuni 3 mm.
Argoon	Titaan	Võib kasutada hea kvaliteedi saavutamiseks

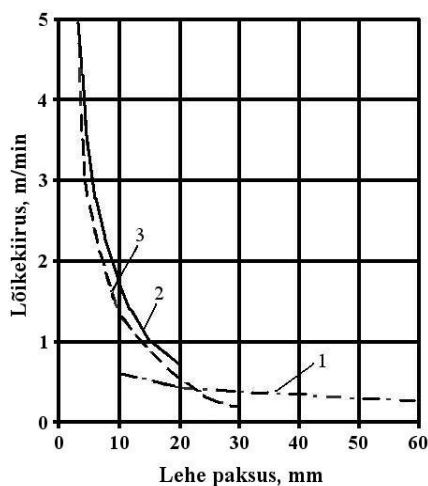
Laserlõikamist mõjutavad parameetrid [29]:

1. Masina parameetrid (fookuskaugus  $f$ , düüsi läbimõõt  $d$ ).
2. Laseri parameetrid (võimsus  $P$ , impulsi töö  $A$ ).
3. Töödeldav materjal.
4. Protsessi parameetrid (lõikekiirus  $v$ , gaasi surve  $p$ , fookuspunkti kaugus  $h$ ).

Laserikiire fookuse asetus:

- õhukese pleki (süsinikterase) lõikamisel – fookus asetseb tooriku pinnal ,
- roostevaba terase lõikamisel – fookuspunkt asetseb tooriku sees, 2/3 kaugusel töödeldava tooriku paksusest,
- alumiiniumi sulamite lõikamisel – fookus asetseb tooriku sees, täpselt 1/3 kaugusel töödeldava tooriku paksusest.

Laserlõikamise võrdlus teiste meetoditega on toodud joonisel 10.14.



Joonis 10.14. Lõikekiirus erinevatel meetoditel: 1 – gaaslõikus, 2 – plasmalõikus, 3 – laserlõikus

Graafikutelt on näha, et teraslehe paksustel alla 3–5 mm on laserlõikamise kiirus praktiliselt võrdne plasmalõikamisega, kuid paksuste vahemiku 5–10 mm korral on laserlõikamine mõnevõrra kiirem. Majanduslikus mõttes see ei kompenseeri suuremaid investeerimiskulutusi. Laserlõikamise eeliseks plasmalõikamise ees on toodete suurem täpsus ja väiksemad kujumutused. Laserlõikamisel tuleb arvestada jooksvate kuludega masina ekspuaterimisel. CO<sub>2</sub> laserlõikesüsteemi jooksvad 1500 W laseri kasutamisel võivad tunnis USA hindade järgi olla sõltuvalt lõigatavast materjalist 9–25 USD [18]. Sellest kulutused elektrienergiale moodustavad süsinikteraste ja roostevaba terase lõikamisel 20%, optikasüsteemile normaalse ekspuaterimise korral *ca* 20%, lasergaasile 10%, fookuseerivale optikale 11%, lõikegaasile 35%.

## Kokkuvõte

1. Laserkeevitusel kasutatakse põhiliselt gaas- ja tahkislaseid, lõikamisel gaaslasereid.
2. Laserikiire kvaliteeti hinnatakse moodiga.
3. Laserkeevituse põhiparameetrid on laseri võimsus, kiire intensiivsus, keevituskiirus, samuti mõjutab tulemust laserikiire fookustatus ja polarisatsioon.
4. Laserlõikamist kasutatakse väikeste avade ja erinevate materjalide kontuurlõikamiseks, kasutades erinevaid lõikegaase.

# 11. KEEVITUSTÖÖDE KVALITEEDITAGAMISE SÜSTEEM

Kvaliteediteooria järgi loetakse keevitamist eriprotsessiks, millest johtub, et kõik tegevused peavad toimuma kindlate ja heakskiidetud kirjalike protseduuride järgi. Kvaliteeditagamise keevitustootmises saavutatakse vastavate kvaliteedisüsteemide abil. Valmistatud keevisliidete kvaliteeti saab hinnata tõhusate kontrollmeetodite rakendamisega, mis on ka üks kvaliteeditagamise komponente. Ettevõtte usaldust saab tõendada kvaliteedisüsteemide arendamise ja evitamise kaudu. Levinud on kvaliteedijuhtimissüsteemid ISO 9000 ja ISO 9001 järgi, kuid keevitustootmises on välja töötatud omad kvaliteedisüsteemid, mis on toodud standardite ISO 3834 sarjas. Põhimõtteliselt võib keevituse kvaliteedisüsteem olla standardite ISO 9000 või ISO9001 üks osa. Ainult viimati mainitud standardi evitamine ettevõttes ei ole tavaliselt keevitustootmiseks piisav. Kui ettevõttes kaalutakse keevituse kvaliteedisüsteemi loomist, siis alati tekib küsimus, et mida see annab ettevõttele. Kvaliteedisüsteemi olemasolu tõendab ettevõtte suutlikkust valmistada kvaliteetselt ja tähtjaks keevistooteid. Nii tellijad kui ka riiklikud jm järelevalveorganid saavad kindluse, et evitatud kvaliteedisüsteemi korral on kõik keevitustootmise etapid kontrolli all ja tagatakse stabiilne toodete kvaliteet, et valmistusprotsess on ka tagantjärgi jälgitav ning tuvastatav. Kvaliteedisüsteemi evitamine on kasulik nii tootjale kui ka tellijale järgnevatel põhjustel:

1. Avatud turgude korral on järsult kasvanud konkurents ettevõtete vahel. Kvaliteedisüsteemi olemasolu võib olla eelduseks tellimuste saamisel. See võib olla eeltingimuseks osalemiseks riigihangetel, aga ka kohalike omavalitsuste projektides.
2. Viimaste aastakümnete jooksul on karmistunud keevistoodete kvaliteedinõuded ja seetõttu on vaja kvaliteedile pöörata rohkem tähelepanu.
3. Kvaliteedisüsteemi olemasolu korral vähenevad alltöövõtjate inspekterimised ja peatöövõtjate kontrollimised, mis parandab tootmise rütmilisust.
4. Kvaliteedisüsteemi pidev arendamine tõstab ettevõtte võimekust keerukamate toodete valmistamisel.
5. Teatud toodete, näiteks survemahutite, tootmisel on kvaliteedisüsteemi olemasolu tootmise alustamise eeltingimus.

## 11.1. Keevituse kvaliteedisüsteemi osad

Metallidest valmistatud keevistoodete ja keeviskonstruktsioonide valmistamisel sulakeevituse meetodil on sageli otstarbekam kasutada standardi EVS ISO 3834 sarja vastava osa järgi koostatud ja sertifitseeritud kvaliteedisüsteemi. Tootele esitatavate nõuete järgi eristatakse kvaliteedinõudeid kolmel tasemel. Lihtsamate toodete valmistamisel on soovitatav kasutada elementaarseid nõudeid vastavalt standardile ISO 3834-4. Keerukama toodangu valmistamisel on soovitatav kasutada standardseid kvaliteedinõudeid standardi ISO 3834-3 järgi. Vastutusrikaste ja kõrge ohuastmega toodete valmistamisel kasutatakse laiendatud nõuetega kvaliteedisüsteemi ISO 3834-2. Ettevõtte kvaliteedisüsteemide arendamisel oleks loogiline alustada madalamate kvaliteedinõuete tasemest ja samm-sammult siirduda kõrgematele nõudmistele.

Põhilisi kvaliteedisüsteemi koostisosasid iseloomustatakse skemaatiliselt joonisel 11.1. Selgub, et elementaarsete kvaliteedinõuete korral on nõutav ainult atesteeritud keevitajate



olemasolu. Standardsete ja laialdaste kvaliteedinõuete korral lisandub veel keevitusprotseduuri spetsifikaadi WPS (*welding procedure specification*) e keevitustehnoloogilise kaardi, keevitustööde koordinaatori (*welding coordination personnel*), erinevate juhendite ja protseduuride, dokumentatsiooni koostamise nõue.

Kvaliteedisüsteemi evitamine võib toimuda kolmes järgus.

**Esimesel etapil** toimub olemasoleva olukorra kaardistamine. Eesmärgiks on saada põhjalik ja objektiivne pilt olukorrast ettevõttes. Kui antakse ilustatud pilt, siis seatakse edaspidises tegevuses madalad eesmärgid ja kasu projekti evitamisest ei ole ootuspärane.

Soovitav on sellel etapil kaasata sõltumatuid eksperte väljastpoolt. Tegevusse tuleb hõlmata ettevõtte kõik organisatsioonilised struktuurid ja edukaks teostamiseks on vajalik ettevõtte juhtkonna toetus kogu tegevuse jooksul. Projekti alustamiseks korraldatakse kõiki osapooli hõlmav alustuskoosolek, kus kinnitatakse tegevuste ja koolituste ajagraafik. Koolituse maht sõltub nii personali arvust, toodangu liigist, ettevõtte töökultuurist. Tuleb kaaluda, kas koolitust planeerida eraldi inseneride jaoks koos tugistruktuuridega ja eraldi tööliste jaoks.

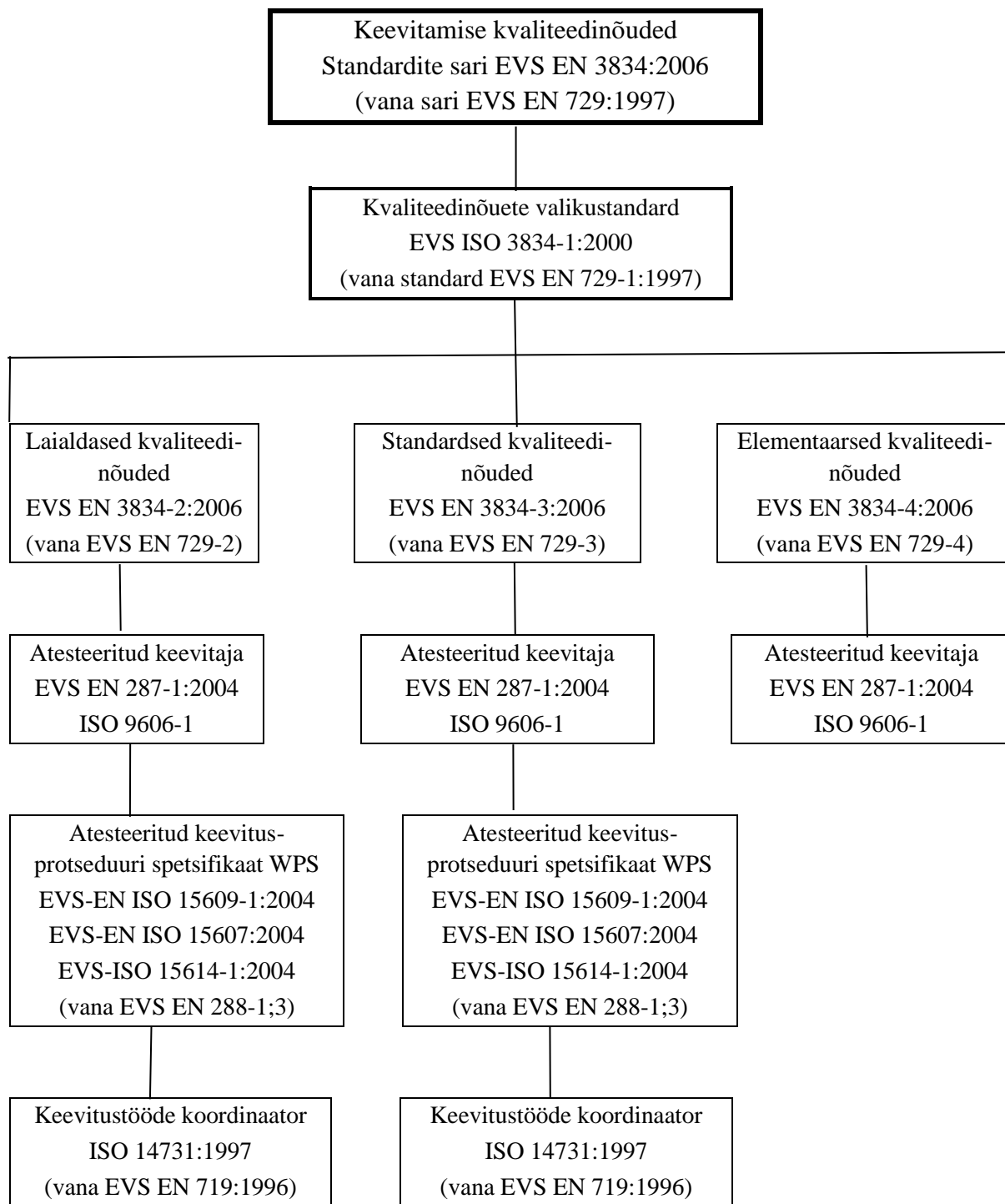
Esimese etapi põhiline tulem on puuduste ja arendamist vajavate osade, protsesside ja protseduuride tunnustamine ja kirjalik fikseerimine. Tegevuste ja koolituste aluseks võetakse standardi ISO 3834 põhisisu punktid. Töö käigus täpsustatakse projekti ajagraafikut.

### **Teine etapp**

Eesmärgiks on ajagraafiku plaanimine kõikide parendamist ja arendamist vajavate toimingute tarvis ning selle elluviimine. Etapi kestus võib ulatuda 6–18 kuuni ja selle lõpus ollakse valmis ettevõtte sertifitseerimiseks. Koostatakse vajalik dokumentatsioon, juhendid, protseduurid, kvaliteediandmestik, mille koolituse kaudu võtab omaks ettevõtte personal ja mida rakendatakse tootmises.

### **Kolmas etapp**

Auditi käigus kontrollitakse kvaliteedisüsteemi sisu, juhtimise toimimist ja vastavust. Antakse aeg puuduste kõrvaldamiseks, millele järgneb järelaudit ja kvaliteedisüsteemi sertifitseerimine ning vastava tunnistuse väljaandmine. ISO 3834 sertifikaadi toimimist võib perioodiliselt kontrollida sertifitseerija ja väljastatud sertifikaat kehtib 3 aastat.



Joonis 11.1. Keevituse kvaliteedisüsteemi põhiosad ja standardid

## 11.2. Kvaliteedisüsteemi põhinõuded

Vaatleme standardseid kvaliteedinõudeid eri punktide kaupa.

Nõuete ja kvaliteedinõuete ülevaatus

Tootja peab koostama ülevaate lepingu tehnilistest nõuetest ja standardite ning seadusandlike aktide nõuetest. Selgitatakse välja, kas enne keevitustööde alustamist on teave piisav ja

kättesaadav. Tootja ja tellija kooskõlastavad kõik muudatused projektis, näiteks insenerlike lahenduste, tootmisprogrammi, maksumuse osas.

Nõuete ülevaatus tehakse tellimuse saamisel või siis tehniliste nõuete ülevaatus ajal, mida tavaliselt tehakse tootmise planeerimisetapis.

Nõuete ülevaatus sisaldab järgmisi punkte:

- a) kasutatav tootestandard koos laiendatud nõuetega,
- b) seaduste ja määruste nõuded,
- c) tootja poolt määratud nõuded,
- d) tootja suutlikkus täita eeltoodud nõudeid.

**Nõuete tehniline ülevaatus sisaldab:**

- a) nõudeid keevitatavate põhimaterjalide spetsifikatsioonidele ja keevisliidete omadustele,
- b) keevisõmbluste kvaliteedi ja aktsepteerimise nõudeid,
- c) keevisõmbluste asukohta, nende keevitamise järjestust ning hinnangut keevitamiseks ligipääsetavuse, inspekteerimise ja mittepurustava kontrolli kohta,
- d) keevitamise, mittepurustava kontrolli ja termotöötamise protseduurid,
- e) keevitusprotseduuri atesteerimise meetodeid,
- f) keevisõmbluste, materjalide jm jälgitavuse ja identifitseerimise nõudeid,
- g) kvaliteedikontrolli korraldamist, k.a sõltumatu katsetusametuse kaasamist,
- h) personali kvalifikatsiooni,
- i) allhanke teostamist,
- j) inspekteerimist ja kontrolli,
- k) keeviste järeltermotöötlust,
- l) keevisõmbluste servakujude ja liidete lõpetamise analüüsi,
- m) töökojas ja väljas tehtud keevisõmblusi,
- n) keskkonnatingimusi (keevitamine väga madalatel temperatuuridel ja kaitse muude halbade keskkonnatingimuste eest),
- o) mittevastavuste käsitlemise korda ja protseduure.

Ettevõttel on soovitatav lepingu- ja tehniliste nõuete läbivaatuse tulemuste fikseerimiseks töötada välja ühtne vorm tabeli kujul, kus näidatakse ülevaatus punktid koos standardite, normatiivaktide vajadusega või ilma ja märkustega. Soovitatav on kasutada infotehnoloogilisi lahendusi.

## Alltöövõtt

Kui kasutatakse alltöövõtja teenuseid, siis peab tootja esitama infonõude temale kõigi nende standardipunktide osas. Alltöövõtja töötab peatöövõtja vastutusel ja täidab standardi nõudeid.

## Keevituspersonal

Tootjal peab olema küllaldane ja kompetentne personal keevitustootmise plaanimiseks, tegemiseks ja järelevalveks. Keevitajad ja keevitusoperaatorid peavad olema atesteeritud vastavate Euroopa standardite kohaselt. Teraste keevitamisel peavad keevitajad olema atesteeritud standardi EN 287-1, alumiiniumi keevitamisel standardi ISO 9606-2 järgi.

## Keevitustööde koordineerimise personal

Tootjal peab olema pädev koordineerimise personal ehk keevitustööde koordinaator(id), kes vastutavad kvaliteedi eest. Nende ülesanded ja vastutus peavad olema selgelt määratletud. Keevitustööde koordinaatori ülesanded ja kohustused on toodud standardis ISO 14731. Kui ettevõttes on mitu koordinaatorit, siis määratakse üks peakoordinaator.

## Seadmed

Tootja peab esitama nimekirja seadmetest, mida on vaja detailide servade faasimiseks, painutamiseks, ette- ja järelkuumutuseks, nimekirja koostamis- ja kinnitusrakistest, kraanadest, purustava ja mittepurustava kontrolli seadmetest. Näidatakse kraanade maksimaalne tõstejõud, maksimaalsed võimalikud keevistoodete mõõtmed kõnealuses töökojas, mehhaniseeritud ja automaatkeevituse seadmete tehnilised võimalused, ahjudes kuumutatavate toodete suurimad mõõtmed, painutus- ja valtsmasinate võimalused.

Vooluallikate osas antakse iga keevitusprotsessi kohta masinate arv. Nähakse ette seadmete hooldamise plaanid, et tagada keevitusprotseduuri spetsifikaadis (WPS) toodud parameetrite järgimist keevitamise käigus.

## Keevitamine ja sellega seotud tegevused

Tootja koostab tootmisplaani, mis sisaldab konstruktsiooni valmistamise järjekorda osade või alamkoostudena ja lõppkoostamise korra. Tuuakse viited keevitusprotseduuride ja nende atesteerimise, keevisõmbluste keevitamise järjekorra jaoks, käsitletakse koostude ning nende osade identifitseerimist ja tähistamist.

Määratakse keevitajad ning vajadusel tootmiskatsete korraldamise meetodid. Nähakse ette meetmed keevituskoha kaitsmiseks tuule ja vihma eest välitingimustes keevitamisel. Koostatakse protseduurid põhimaterjalide ja keevitusmaterjalide (elektroodid, traadid, räbustid) ladustamise ja ettevalmistamise osas. Nii tagatakse nende identifitseerimine ja välditakse nende kahjustumist ladustamise ajal.

Keevitamise ajal kontrollitakse:

- keevitusparameetrite vastavust WPS-is toodule;
- keevisõmbluse juure avamist, ettekuumutuse ja läbimitevahelist temperatuuri;
- keevisõmbluse keevitamise järjestust kihtide kaupa;
- keevitusmaterjalide (nt elektroodide) õiget kasutamist;
- keevitusdeformatsioonide ohjamist;
- konstruktsiooni ja selle osade mõõtmeid.

Pärast keevitamist inspekteeritakse ja kontrollitakse liidete vastavust hindamiskriteeriumitele (aktsepteerimiskriteeriumitele) järgnevat katsetamistega ja koostatakse protokollid:

- visuaalne kontroll;
- mittepurustav ja purustav kontroll;
- konstruktsiooni kuju ja mõõtmed;
- termotöötamise protokollid ja tulemused.

## Inspekterimine ja kontroll

Kvaliteedisüsteemis tuleb ette näha nii inspekterimist kui ka kontrolli tootmise erinevatel etappidel. Inspekterimise või katsetamise kohtade asukohad, sagedus sõltuvad tarnelepingust (kontraktist), tehnilisest spetsifikatsioonist või toote rakendusstandarditest, keevitusprotsessist ja keeviskonstruktsiooni tüübist. Enne keevitamise alustamist kontrollitakse järgmist:

- keevitajate atesteerimistunnistuste ja keevitusprotseduuride sobivust;
- põhimaterjalide ja lisametallide identifitseerimist;
- servade ettevalmistust, liite koostamist ja sildamist.

## Mittevastavuste ohjamine ja keevisliidete defektide parandamine

Kui tootja parandab ise keevitusvead, siis peavad töökohal olema käepärast parandamise ehk remontkeevituse protseduurid. Pärast keevitusvigade parandamist tuleb teha uus inspekterimine ja katsetamine algsete tehniliste nõuete järgi.

Tuleb rakendada meetmed võimalike defektide tekkimise vältimiseks tulevikus.

## Identifitseerimine ja jälgitavus

Kui on nõutud, siis peab kogu tootmisprotsess olema jälgitav ja identifitseeritav. Nõudmisel peavad olema kättesaadavad dokumendid tootmisplaanide, keevisõmbluste asukoha, NDT-protseduuride, keevitusmaterjalide ja põhimaterjalide ning paranduskeevituste kohtade identifitseerimiseks. Peavad olema tagantjärgi tuvastatavad keevitajate ja operaatorite nimed ja kasutatud keevitusprotseduurid kõnesolevate õmbluste kohta.

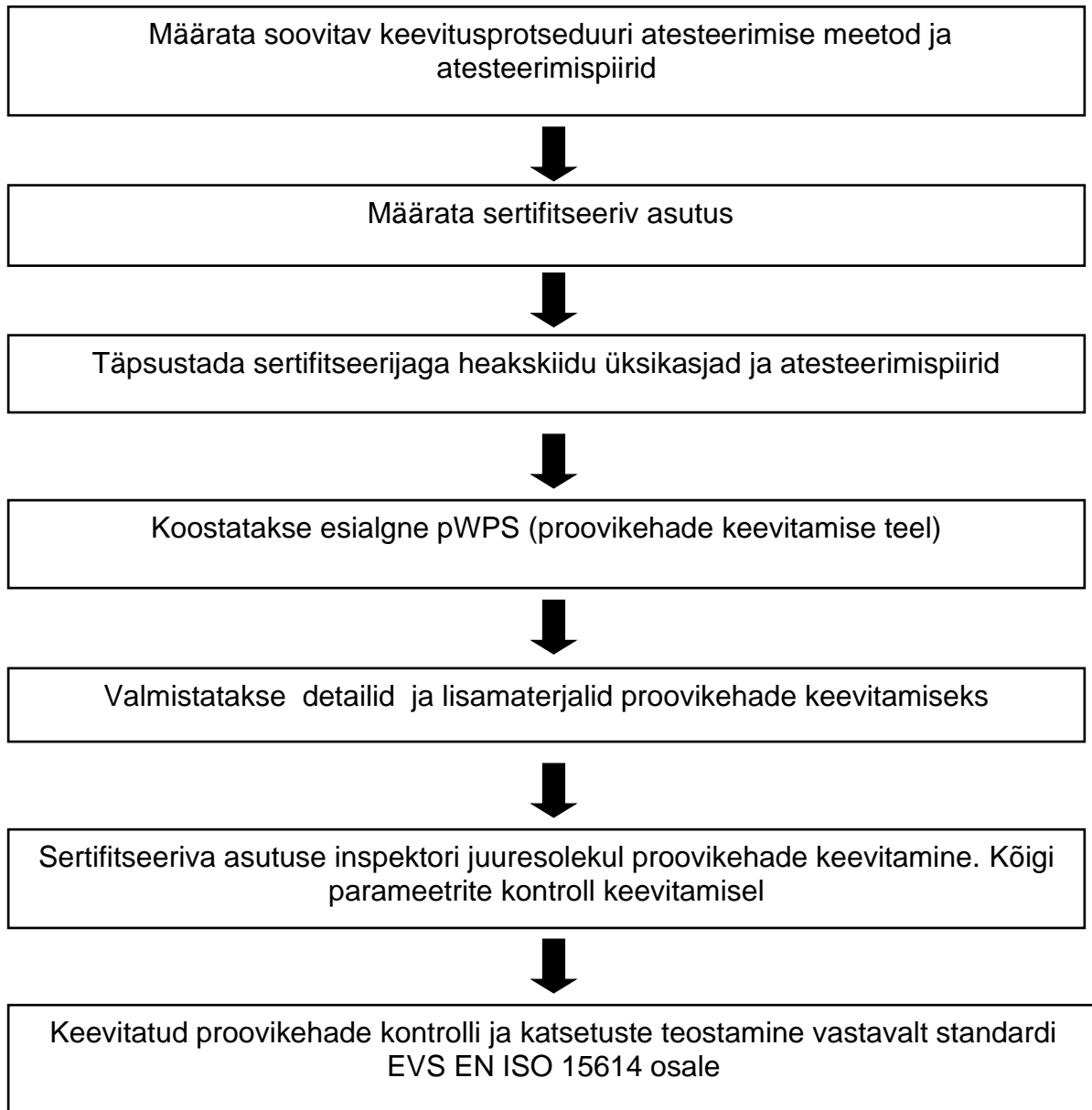
## Kvaliteediandmestik

Kui on vaja, siis koostatakse töö lõpetamisel kvaliteediandmestik, mis sisaldab dokumentatsiooni eelnevate käsitletud punktide osas. Dokumentatsioon sisaldab veel toote joonmõõtmete määramise protokolle, keevitusvigade parandamise protseduure ja muid protokolle või raporteid, mida nõutakse lepingus või seadusaktides. Kvaliteediandmestikku tuleb säilitada vähemalt viis aastat, kui puuduvad muud nõuded.

### 11.3. Keevitusprotseduuri spetsifikaadi koostamine ja atesteerimine

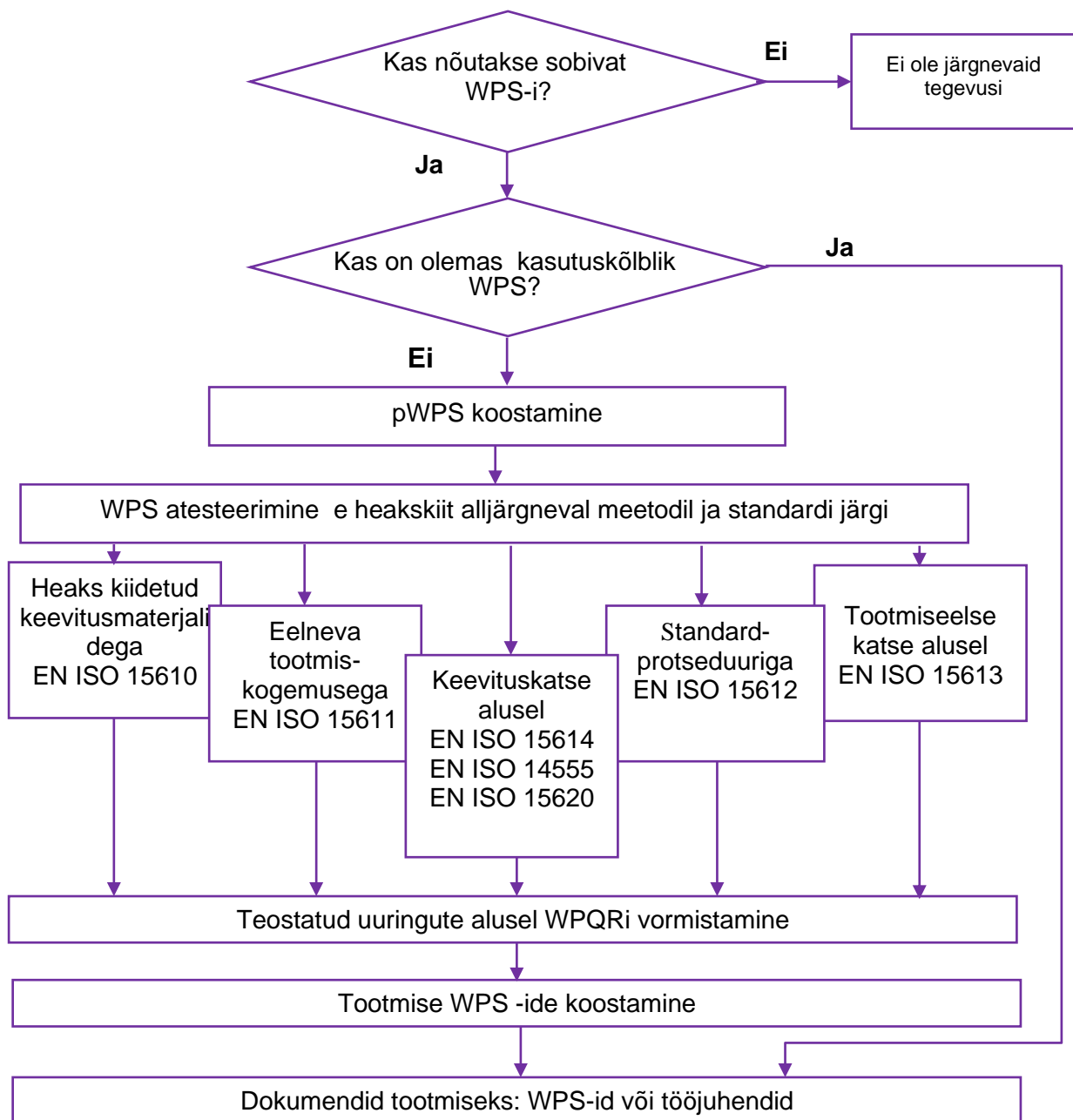
Keevituse kvaliteedisüsteemis on oluline roll keevitusprotseduuridel e keevitustehnoloogilistel kaartidel, lühendiga tähistatud WPS-idel (*welding procedure specification*), mis vormistatakse soovitatavalt standardites toodud vormide järgi. Keevitusprotseduuri spetsifikaadi sisu ja näide on toodud [3]. Kõigepealt koostatakse esialgne keevitusprotseduuri spetsifikaat – pWPS, millele järgneb tema atesteerimine e heakskiit (mõnede autorite poolt nimetatud ka sertifitseerimine e kvalifitseerimine) erinevate meetodite abil tunnustatud sertifitseerimisasutuse poolt. Põhiosa neist meetoditest põhineb keevitatud proovikehade katsetamisel. Positiivsete katsetulemuste põhjal kinnitab tunnustatud asutus protseduuri ja koostatakse keevitusprotseduuri heakskiidu protokoll (*welding procedure qualification report* – WPQR). Nende kahe dokumendi olemasolul saab koostada tööjuhendid WPS-ide vormis juba erineva paksusega detailide, teoreetiliselt ka erinevate liidete jaoks. Tegevused keevitusprotseduuri koostamiseks ja atesteerimiseks on toodud skemaatiliselt joonistel 11.2 ja 11.3.

## Keevitusprotseduuri atesteerimise järjestus EN ISO 15614 järgi



Joonis 11.2. Voodiagramm tegevustest keevitusprotseduuri heakskiidul e atesteerimisel

Enne esialgse WPS-i koostamist tuleb analüüsida keevistoote jooniseid ja olemasolevaid spetsifikaate. Kui on otsustatud, millist WPS-i heakskiidu meetodit kasutatakse (vt joonis 11.3), siis tuleb arvestada atesteerimispiiridega nii materjalirühmade kui ka paksuste osas, liitetüüpide, keevitusasendite jne osas. Nii saab ühe atesteerimiskatsega katta küllaltki erinevaid liiteid ja materjali paksusi.



Joonis 11.3. Keevitusprotseduuri atesteerimise meetodid

Kui valmistatavad liited vastavad oma tüüpidelt standardsetele, näiteks nurkõmblused, tähistatuna FW, faasitud servadega T-liited e T-liited põkkõmblustega (*T-joint with butt weld*), põkkõmblused – BW, siis saab teatud juhtudel kasutada katselisest meetodist erinevaid ja vähem töömahukaid ning kulukamaid meetodeid. Tavaliselt on siin piirangud nii materjalirühmadega kui ka paksuste osas. Näiteks protseduuri atesteerimist tootmiseelse katse järgi (EN ISO 15613) tuleb kasutada siis, kui katselise meetodi proovikehade kuju ja mõõtmed ei väljenda adekvaatselt tegelikke keevitatud liiteid või kui on erilised nõuded jääkpingete, temperatuurimõjude jaoks. Teatud juhtudel võidakse kasutada uurimis-katsetusastutuste või instituutide väljatöötatud WPS-e, mida kutsutakse standardseteks protseduurideks. Juhtudel, kui suudetakse tõestada eelneva aasta jooksul tehtud edukat teatud liidete keevitamist, siis on võimalik eraldi lähenemine eelneva tootmiskogemuse põhjal. Tootestandard või järelevalveasutus määrab, millist atesteerimismeetodit kasutada. Eestis on senini põhiliselt kasutatud katselist meetodit, põhimõtteliselt saab kasutada ka teisi atesteerimismeetodeid.

## 11.4. Keevitusprotseduuri katseline atesteerimine standardi EN ISO 15614-1 järgi

Valmistatakse standardsed plaadid mõõtmetega 350x150 mm või torud pikkusega minimaalselt 150 mm proovikehade keevitamiseks.

Protseduuri koostamisel tuleb arvestada erinevate õmbluste ja liidete atesteerimispiiridega.

Enne esialgse keevitusprotseduuri koostamist tuleb teha eeltöö, arvestades nii praegu kui ka tulevikus keevitatavaid terasemarke, liitetüüpe, materjali paksust, keevitusasendeid. Nii võib pärast keevituskatsete läbimist koostada uusi WPS-e atesteerimispiirides. Vaatleme oluliste muutujate mõju atesteerimispiiridele.

### Materjali paksus

Proovikeha paksus valitakse selline, et katsega oleks kaetud võimalikult sobiv materjali paksuste vahemik.

Näitena tuuakse tabelis 11.1 atesteerimispiirid põkkõmbluse ja T-liite kohta

*Tabel 11.1*

Atesteerimispiirid põkkõmbluse ja läbikeevitatud T-liite jaoks

Proovikeha materjali paksus, mm	Atesteerimispiirid paksuse järgi	
	Ühe läbimiga õmblus	Mitme läbimiga õmblus
$t \leq 3$	0,7 t kuni 1,3 t	0,7 t kuni 2 t
$3 < t \leq 12$	0,5 t (min 3 mm) kuni 1,3 t	3 mm kuni 2 t
$12 < t \leq 100$	05 t kuni 1,1 t	0,5 t kuni 2 t
$t > 100$	Ei kasutata	50 mm kuni 2 t

Erinevalt varasemast standardist EVS EN 288-3 võetakse nüüd nii protseduuri kui ka keevitaja atesteerimisel arvesse asjaolu, et mitme läbimiga keevitades saadakse parem õmbluse mikrostruktuur ja omadused, mistõttu on ka atesteerimispiirid laiemad. Näiteks kui otsustatakse keevitada proovikehad paksusega 8 mm, siis mitme läbimiga keevitades on positiivsete tulemuste korral tootja kompetentne keevitama terast paksusega alates 3 mm kuni paksuseni 16 mm.

Nurkõmblusi atesteeritakse materjali paksuse ja nurkõmbluse kõrguse kaudu (tabel 11.2).

*Tabel 11.2*

Nurkõmbluste atesteerimispiirid

Proovikeha materjali paksus, mm	Atesteerimispiirid		
	Materjali paksus	Nurkõmbluse kõrguse $a$ mm	
		ühe läbimiga	mitme läbimiga
$t \leq 3$	0,7 t kuni 2 t	0,75 a kuni 1,5 a	piirangud puuduvad
$3 > t > 30$	0,5 t (min 3) kuni 1,2 t	0,75 kuni 1,5 a	piirangud puuduvad
$t \geq 30$	$\geq 5$	ainult erijuhtudel	piirangud puuduvad



Põhimõtteliselt on võimalik nurkõmblusega T-liidet atesteerida ka põkkõmbluse kaudu. Kui T-liidet atesteeritakse põkkõmbluse kaudu, siis atesteerimispiir õmbluse kõrguse järgi põhineb keevitatava materjali paksusel.

## Keevitusprotsess

Protseduuri atesteering kehtib ainult keevituskatsel kasutatud protsessil.

Kui muudetakse protsessi mehhaniseerimistaset, näiteks kui minnakse üle poolautomaatkeevitusest täisautomaatssele, siis nõutakse uut keevituskatset.

Kui tootmises kasutatakse keevitamiseks nn multiprotsessi e kombinatsiooni kahest protsessist, näiteks torude keevitamisel, kus esimene läbim keevitatakse TIG-keevitusega ja järgnevad elektrodkeevitusega, siis võib heakskiit toimuda iga üksiku protsessi kaudu. Seejuures teise ja kolmanda läbimi keevitamist võib vaadelda kui juuretoega õmbluse keevitamist. Võidakse keevitada ka üks proovikeha, kasutades erinevaid keevitusprotsesse. Sel juhul laieneb atesteering ainult multiprotsessile, kuid mitte igale üksikule kasutatud tegevusele.

## Keemisõmbluse asend e keevitusasend

Kui keemisõmblusele ei esitata nõudeid löögisitkuse või kõvaduse osas, siis keevitus ükskõik millises asendis atesteerib ka teised asendid, välja arvatud püstõmbluste keevitamine ülalt alla e asendis PG.

Kui on nõuded löögisitkuse osas, siis tuleb proovikehad keevitada suurima soojussisestusega asendis püstiselt alt-üles, tähistusega PF.

Kui on nõuded keemisõmbluse kõvaduse osas, siis tuleb proovikehad keevitada väiksema soojussisestusega asendis, kus keevituskiirus on suurim e asendites PC või PB. Juhul kui on nõuded materjalile nii löögisitkuse kui ka kõvaduse kohta, siis tuleb proovikehad keevitada kahes asendis.

## Keevituse lisamaterjal

Tehtud katsed laienevad teistele lisamaterjalidele samade mehaaniliste omadustega, sama tüüpi elektrodikattega, sama vesinikusisaldusega, sama keemilise koostisega lisametallidele. Siit võib järeldada, et teatud juhtudel võib kasutada erinevate tootjate sama klassifikatsiooniga elektroode või traate. Kui õmblusele esitatakse nõudeid löögisitkuse osas, siis elektroodi kaubamärgi muutmisel on vajalik täiendava proovikeha keevitamine ja selle katsetamine löökpaindele. Tootmises võib muuta elektroodi läbimõõtu juhul, kui on täidetud nõuded keevituse soojussisestuse osas.

## Keevituse soojussisestus

Üks tähtsamaid keevitusparameetreid. Kui põhimetallile esitatakse nõudeid löögisitkuse osas, siis praktikas võib olla soojussisestus kuni 25% suurem katsel kasutatust. Edasine soojussisestuse suurendamine suurendaks ferriidi tera ja halvendaks löögisitkust. Madalama soojussisestuse kasutamist tuleb vältida, kuna võib esineda vesinikpragude risk.

Kui põhimetallile esitatakse nõudeid kõvaduse osas, siis võib tootmises kasutada kuni 25% väiksemat soojussisestust. Liiga suure soojussisestuse korral väheneks keevitusallas põhimetalli kõvadus.

Kui põhimetallile esitatakse nõudeid nii löögisitkuse kui ka kõvaduse osas, siis võib praktikas soojussisestus muutuda vahemikus  $\pm 25\%$ . Atesteeritud WPS-i alusel koostatud tööjuhendites lubatud materjalide paksuse vahemikus tuleb arvestada asjaoluga, et soojussisestust hoitakse atesteerimispiirides.

## 11.5. Mittepurustava ja purustava kontrolli kasutamine

Keevisõmbluste kvaliteeti saab tõendada nende mittepurustava katsetamise (MPK, NDT) ja purustava katsetamisega (DT). Mittepurustav katsetamine e uurimise valdkonnas kasutatakse ingliskeelses ja ka eestikeelses kirjanduses lühendeid NDT (*non destructive testing*) ja NDE (*non destructive examination*) ja NDE (*non destructive evaluation*). Kehtivates keevitusala standardites võib kohata nii lühendeid NDT kui ka NDE. Kasutatakse ka erinevas tähenduses mõistet “inspekterimine (*inspection*)“. USAs tähendab see üldist kvaliteedikontrolli ja kvaliteedi tagamist, mis hõlmab selliseid tegevusi nagu eksamineerimine, testimine, hindamine [19]. Euroopas kasutatakse kvaliteedistandardites mõistet inspekterimine, mis tähendab keevitusega seotud asjaolude vastavushindamist, kus kasutatakse vaatlust ja otsuse tegemine toimub vastavate mõõtmiste või katsetamisega ning tulemused dokumenteeritakse. Inspekterimine on osa keevitustööde koordineerimisest.

**MPK- või NDT-meetodite valik ja kasutamine** sõltuvad tellijaga sõlmitud lepingutingimustest või kavandamise spetsifikatsioonidest, materjali tüübist, kasutustingimustest ja materjali paksusest ning on sageli määratud tootestandarditega. Nii võidakse kasutada erinevaid NDT-meetodid põkkõmbluste ja nurkõmbluste jaoks, õhukese ja paksu materjali korral.

Keevisliiteid kontrollitakse tavaliselt mittepurustavate meetoditega (NDT) ja teatud juhtudel keevitatakse õmbluse jätkuna nn kupongplaadid, mida katsetatakse purustavalt (DT). Kontrollimeetodid ja mahud tuuakse tootestandardites.

Mittepurustava kontrolli meetodi kasutamist ja kontrolli ulatust võetakse juba arvesse konstrueerimise e kavandamise etapil. Näiteks surveseadmete valmistamise standard EVS EN 13445-5 näeb ette nelja rühma tooteid, kus arvutustes kasutatakse erinevaid varutegureid z.

1. rühma jaoks nähakse ette keevisliidetele 100% NDT, lisaks purustav katsetamine DT,  $z = 1,0$ .

2. rühma jaoks nähakse ette NDT mahus 100–10%, varutegur  $z = 1,0$ .

3. rühma jaoks nähakse ette NDT mahus 25–10% ja varutegur  $z = 0,85$ .

4. rühma korral piirduakse ainult visuaalse kontrolliga (VT) ja varutegur võetakse  $z = 0,7$ .

Kontrolli maht võib sõltuda avastatud defektist. Näiteks kui survemahuti valmistamisel avastati rutiinse kontrolli käigus ühel lõigul kokkusulamatuse keevitusdefekt, siis edasi kontrollitakse tervet õmblust.

Majanduslikult ei ole otstarbekohane kasutada 100% kontrolli, vaid lepitakse kokku, et kontrollitakse kindlas ulatuses liiteid, näiteks mahus 10%, 20% või 50%. Ehituskonstruksioonide tootmisel on nõutav standardi EN1090-2 järgi NDT ulatuses 5–20%. Kontrolli ulatus sõltub seejuures liite tüübist ja terasplaadi paksusest, nurkõmbluse kõrgusest.

Kontrolliala valitakse juhusliku valiku põhimõttel. Tavaliselt kontrollitakse potentsiaalselt ohtlikke kohti, näiteks õmbluste ristumiskohti. Tellija nõudmisel võidakse kontrollitavad liited määrata ja ära näidata toote joonisel. Defektsed kohad tuleb parandada ja uuesti kontrollida. Sageli rakendatakse põhimõtet, et kui teostatakse NDT piiratud ulatuses, näiteks 10% keevisliidetest ja avastatakse kas või üks mitteaktsepteeritav liide, siis suurendatakse

kontrolli mahtu kaks korda. Kui nüüd avastatakse hälvinguid, siis edasi on vajalik 100% kontroll. Siit järeldub, et lohakas ja halb töö võib viia selleni, et kontrollile ja parandamisele kulub liiga palju raha ning tootmine ei ole enam kasumlik.

### Mittepurustavate kontrollimeetodite võimalused

Erinevate mittepurustava kontrolli meetodite valikul tuleb arvestada nende sobivusega kindlate defektide määramisel( vt tabelid 11.3 ja 11.4).

Tabel 11.3

Erinevate NDT-meetodite võimalused ja piirangud

NDT meetod, tähistus	Võimalused	Piirangud
Visuaalne kontroll(VT)	Tasapindne defekt: laiussega üle 50 $\mu$ Sfääriline defekt läbimõõduga $d \geq 100 \mu$ Kasutada optilisi vahendeid	Defektid avanevad pinnale
Kapillaar- või penetrandi meetod(PT)	Tasapindne defekt: – sügavusega üle 10–20 $\mu$ m – laiussega 0,2–1,0 $\mu$ m – pikkusega > 1 mm Sfääriline defekt $d > 25 \mu$ m	Defektid avanevad pinnale Meetodi kasutustemperatuur +5 °C kuni +50 °C
Magnetpulbermeetod (MT)	Tasapindne defekt: sügavusega 10 $\mu$ m laiusega 0,1–1,0 $\mu$ m pikkusega > 2 mm	Ferromagnetilised materjalid Vead avanevad pinnale või alla (1–2 mm) Tähtis pinna ettevalmistamine
Radiograafia meetod (RT)	Tasapindne defekt: 1–2% materjali paksusest, defekt kiirguse suunast kuni 5–10° nurga all Sfääriline defekt: 1–2% paksusest	Kiirgus ohtlik Raske avastada tasapindseid vigu
Ultrahelimeetod (UT)	Defektid mõõtetega alates 0,2–0,4 $\mu$ m Hästi avastatavad on tasapindsed vead, mis risti võnkumiste suunaga	Tundlik materjali omaduste suhtes Ei sobi krobelisele pinnale, õhukeste ja geomeetriliselt keerukatele toodetele Personal kvalifitseeritud ja kogunud
Pöörivoolude meetod (MT)	Defekt 10–15% materjali paksusest ja risti	Elektrit juhtivatele ja ferromagneetilistele materjalidele, defektidele sügavusel kuni 4–8 mm

Tabel 11.4

## NDT-meetodite sobivus erinevate keevitusdefektide puhul

Keevitus-defekt	Defekti kood	Kontrollimeetod					
		VT	PT	MT	RT	UT	ET
Süütamisjalg	601	2					
Peale-valgumine	506 509	3					
Praod	101	1	1	2	1	3	1
Pinnavajum	511	2	1	2	1	1	
Kokkusulamatus	401 4011 4013		1	1	2	3	1
Juureviga e läbikeevitatus	402	2	1	2	3	3	2
Poorid	2011 2012 2016		2		2	1	
Räbupesad	301				2		
Sisselõige	5011 5012	3			2	1	
Teraslehe kihistumine					1	2	1

1 – Heades tingimustes saadakse infot.

2 – Enamik defekte avastatakse.

3 – Defektid hästi avastatavad.

Soovitused erinevate materjalide ja liidete NDT osas on toodud standardis EN 12062, mille väljavõte on esitatud tabelis 11.5

Sisemiste keevitusdefektide avastamiseks soovitatavad meetodid

Materjal	Liite tüüp	Materjali paksus mm				
		t < 8	8 ≤ t ≤ 20	20 < t ≤ 40	40 < t ≤ 60	T > 60
Ferriitteras (magnetiline)	Põkkõmblus	RT	UT/”RT”	UT/”RT”	UT	UT
	T-liide (läbikeevitatud)	(RT)	UT(RT)	UT(RT)	UT	UT
Austeniitne roostevaba teras	Põkkõmblus	RT	RT	RT	–	–
	T-liide (läbikeevitatud)	(RT)	(RT)	(RT)		
Alumiinium	Põkkõmblus	RT	RT	–	–	–
	T-liide (läbikeevitatud)	(RT)	(RT)	–	–	–

Märkused

“ “ näitab, et meetod ei ole eelistatav,

( ) näitab, et meetodit saab kasutada mõningaste piirangutega – nõutav katselabori koostööst.

Nurkõmbluste korral soovitakse kasutada samu meetodeid kui T-liidete katsetamisel. Kui terase voolavuspiir on alla 280 N/mm<sup>2</sup>, näiteks terasel mark S 235, siis soovitakse nurkõmbluste kontrolliks kasutada nii visuaalset kontrolli kui ka ühte pinnadefektide meetodit (PT, MT).

#### Kokkuvõtte

1. Keevitustootmises on otstarbekas lisaks kvaliteedisüsteemile ISO 9001 jätki välja arendada ja evitada keevituse kvaliteedisüsteem vastava standardi osa järgi ning see atesteerida e sertifitseerida.

2. Keevituse kvaliteedisüsteemi evitamine tõstab usaldust tootja vastu ja võimaldab ettevõtet arendada.

3. Kvaliteedisüsteemi taseme määramisel arvestatakse toodangu ja tootestandardite nõuetega.

4. Keevitustootmisel tuleb välja töötada ja atesteerida keevitusprotseduurid, mis peab toimuma vastavuses asjakohaste standarditega.

5. Igale keevitusprotsessile on iseloomulikud teatud keevitusdefektid, mille avastamiseks tuleb kasutada sobivamaid kontrollimeetodeid etteantud ulatuses.

## 12. KEEVITUSTÖÖDE ÖKONOOMIKA

Majanduslikud tegurid omandavad globaliseerivas maailmas erilise tähenduse toodangu ja tootmise konkurentsivõime tagamisel, mis on seotud ennekõike keevistoodete hinna ja võimekusega hoida tootmiskulusid kontrolli all. Keevitustootmisel on vaja teada otseselt keevitamise seotud kulusid e keevituskulusid järgmistel põhjustel:

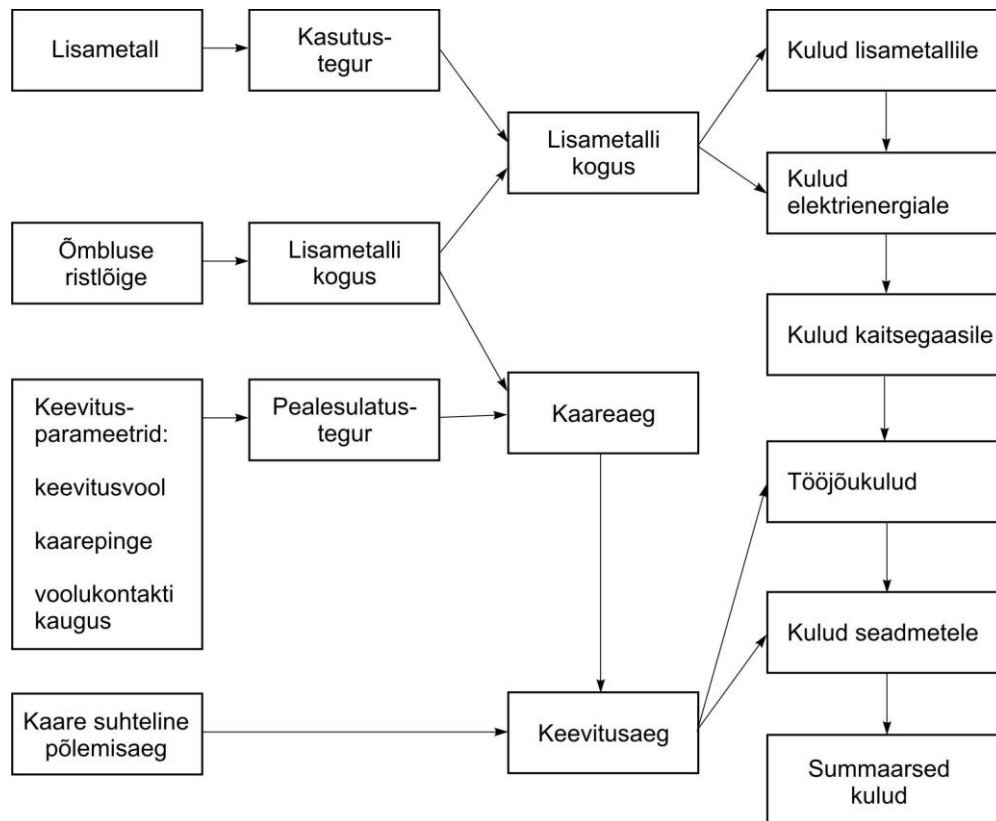
- on vaja tõsta toodangu konkurentsivõimet ja müüa seda optimaalse hinnaga;
- uute keevitusprotsesside, mehhaniseerimisvahendite, robotite, uute lisametallide evitamisel on vaja hinnata nende majanduslikku tõhusust;
- on vaja võrrelda toote erinevaid valmistustehnoloogiaid;
- tuleb hinnata võimalusi alandada keevitustööde maksumust eri kuluartiklite osas;
- tuleb hinnata keevitusdefektide parandamisega seotud kulutusi.

Keevituse kui strateegilise tööstusharu tulevikuvisionides ajavahemikul 2002–2020 on esikohal majanduslikult tõhusate keevitusoperatsioonide arendamine, tootmistsükli lühendamist kuni 100%, keevituse kasutamise laiendamist kuni 25% [1]. Selle eesmärgi täitmiseks peavad keevituskulud vähenema 1/3 võrra, energiakulutused 50%, mis saavutatakse detailide ettekuumutuse vältimisega ja keevituse soojussisestuse vähendamisega jm. Kõnesoleva tulemuse saamiseks tuleb vähendada tootmises keevitusaega, kasutada automatiseerimist tööjõukulude vähendamiseks. Samuti tuleb täiustada toodete konstruktsiooni ja kasutada paremini keevitatavaid materjale, vähendada ettekuumutust enne keevitamist, elimineerides keevisõmbluste kvaliteedi paranedes nii inspekteerimist ja mittepurustavat kontrolli kui ka keevitusvigade parandamist.

Keevitustööde ökonomikas vaadeldakse põhiliselt keevitusoperatsiooni tehnoloogilist omahinda ja otseseid kulusid, arvestamata üld- e kaudseid kulusid (*indirect costs*) erinevate kuluartiklite järgi. Ei võeta arvesse põhimetalli e toorikute materjali, toorikute ettevalmistamise – lõikamise, painutamise, rakiste – kulusid. Üldkulud (*overhead*) sõltuvad paljuski tööstusharust (laevaehitus, masinaehitus jm). Tootmiskulud (*manufacturing costs*) sisaldavad vahetuid kulutusi materjalidele ja tööjõule, millele lisanduvad ettevõtte üldkulud. Üldkuludes kajastuvad ka tootmistegevuse tugikulud: inseneritöö, kontroll, seadmete ja ruumide kulud, hooldus, energia, mida üldjuhul määratakse protsendina kas tööjõukuludest või seadmete töötundide arvust. Osa neist kuludest on püsikulud, osa sõltuvad tootlikkusest s.o toodangu hulgast ajaühikus. Keevitamisel on võimalik määrata ainult selle konkreetse operatsiooni keevitusseadmete, lisametallide, elektrienergia kulu. Määratakse summaarsed keevituskulud ühe meetri keevisõmbluse või ühe kilogrammi pealekeevitatud metalli kohta.

## 12.1. Keevituskulude elemendid

Keevituskulude elemendid MAG-keevitusel on näidatud joonisel 12.1



Joon 12.1. Keevituskulude elemendid

Keevituskulude elemendid e komponendid koosnevad:

**1. Lisametalli kulu** (*filler metal costs*), s.o kulutused elektroodidele, keevitustraatidele, mis sõltuvad:

- pealekeevitatud metalli massist, mis omakorda sõltub keevisõmbuse ristlõikepindalast,
- lisametalli kasutustegurist (*deposition efficiency*), mida määravad kaod pritsmetele, katte massi osatähtsus elektroodi massist jm, mis sõltuvad keevitusprotsessist;
- ostuhinnast.

**2. Tööjõukulu** (*labor costs*), mis sõltub:

- keevismetalli massist,
- pealesulatustegurist,
- kaare põlemisaja tegurist e kaare suhtelisest põlemisajast (*duty cycle, operator factor*),
- keevitaja tunnitasust.

**3. Kaitsegaasi kulud** (*shielding gas costs*) on MIG/MAG- ja TIG-keevitusel, mis sõltuvad:

- kaitsegaasi kulust (*shielding gas flow rate*),
- keevismetalli massist (weight of deposited metal),
- pealesulatustegurist (*deposition rate*).

**4. Räbusti kulud** (*flux costs*), ainult kaarkeevitus räbustis, mis sõltuvad:

- keevismetalli massist,
- räbusti kulunormist (*flux consumption ratio*),
- räbusti hinnast.

**5. Seadmete kulu**, mis sõltub

- keevismetalli massist,
- pealesulatustegurist,
- kaare põlemisaja tegurist,
- seadme ühe töötunni maksumusest,
- seadme hinnast.

**6. Elektrienergia kulu** (*power costs*), mis sõltub:

- keevismetalli massist,
- energiahinnast,
- energia kulunormist.

Kuluelemendid summeeritakse kas keevisõmbuse 1 m pikkuse kohta või 1 kg keevismetalli kohta. Kuluartiklite analüüs Soome kogemuse põhjal näitab süsinikeraste elektrood- ja MAG-keevitusel järgmist kuluelementide jaotust summaarsetest kuludest:

- tööjõukulu 70–90%,
- lisametalli kulu 10–20%,
- kaitsegaasi kulu 4–6%,
- elektrienergia kulu 1–2%,
- seadmete kulu 4–8%.

Roostevaba terase keevitamisel kulude struktuur muutub ja lisametalli osatähtsus tõuseb 30–50% summaarsetest kuludest.

## 12.2. Lisametalli kulu ja keevismetalli mass

Enamik keevituskulude elemente määratakse, lähtudes pealekeevitatud e pealesulatatud lisametalli massist õmbuse pikkusühiku kohta. Teoreetiliselt saab keevismetalli massi määrata keevisõmbuse osade pindalade määramise kaudu, tehes eri geomeetrilise kujuga kujundite pindalade arvutusi: õhupilu, servavahemiku kaldenurk, õmbuste kumerus või õmbuse sisse joonestatud kolmnurga pindala. Praktikas kasutatakse tabeleid käsiraamatutest või tootekataloogidest.

Keevisõmbuse massi ja lisametalli kulu saab vähendada:

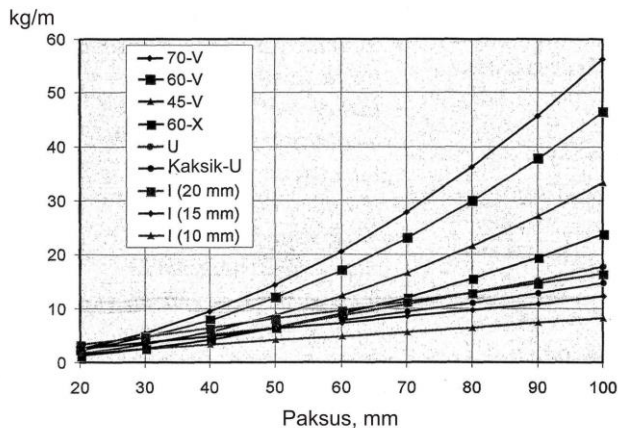
- I-servakuju kasutamisega või võimalikult väikese faasimisega, vt joonis 12.2;
- väiksema õhupilu kasutamisega detailide vahel;
- vähendades materjali paksust ja kasutades tugevamaid teraseid;
- nurkõmbuste kõrguste vähendamisega, tagades suurema õmbuse läbikeevituse;
- täpsemate detailide valmistusega, hoolikama koostamisega.

Materjali paksuse järgi valitakse detailide servade kuju selline, et tagada vajalik läbikeevitus materjali paksuse ulatuses. Erineva nurgaga V-õmbused, X-õmbused, U-õmbused mõjutavad lisametalli kulusid. Joonisel 12.2 on näha, et servavahemiku nurga vähendamine 70° kuni 45° ei anna erilist võitu materjali paksustel alla 30 mm. Väike servavahemiku nurk



võib seejuures olla nii kokkusulamatuse kui ka läbikuumutamise defekti põhjuseks. Eelistatum oleks I-õmbluse servakuju, kuid siis saab piiravaks erinevate keevitusprotsesside keevituskaare võimsus. Siin sobiks kõige paremini keevitus rübustis, kus on teoreetiliselt võimalik keevitada ilma detaile faasimata kuni 16 mm paksust terasplaati.

Kui on võimalik tagada stabiilset keevituskvaliteeti, näiteks keevitamisel mehhaniseeritud rübustis, siis lubavad ehituskonstruksioonide valmistamise standardid vähendada nurkõmbluse kõrgust kuni 20% nominaalsest juhul, kui tagatakse samasuurune läbikuumutamise sügavus detailide sees.



Joonis 12.2. Detailide servakuju ja lahnemisenurga mõju ühe meetri keevismetalli massile

### 12.3. Kaare põlemisaja tegur

Keevitamisel eristatakse kaareaega (*arc time*) ja keevituspauside aega e mittekaareaega (*non arc time*) e abiaega, mis on seotud detailide kinnitamisega, sildamisega, räbu ja pritsmete kõrvaldamisega, masinate seadistamisega või reguleerimisega. Liites mõlemad, saame keevitusaaja või mehhaniseeritud keevitamise korral tsükliaja. Kuna igal konkreetsel keevitustootmise juhul on võimatu määrata mittekaareaegu, siis kogemuste põhjal väljendatakse see osana kaareajast. Kasutusele on võetud termin “kaare suhteline põlemisaeg, kaare põlemisaja tegur”, inglise keeles *operator factor* või *duty cycle*, mis näitab kaareaja suhet keevitusaega e tsükliajaga (keevitamine + pausid). Majandusarvutustes opereeritakse selle teguriga, mis omakorda sõltub toodete keerukusest ja õmbluste pikkusest, kvaliteedinõuetest, tööde korraldamise tasemest ja keevitusprotsessidest.

Olenevalt keevitusprotsessist võetakse Põhjamaades ja USAs kaare põlemisaja tegur järgmine:

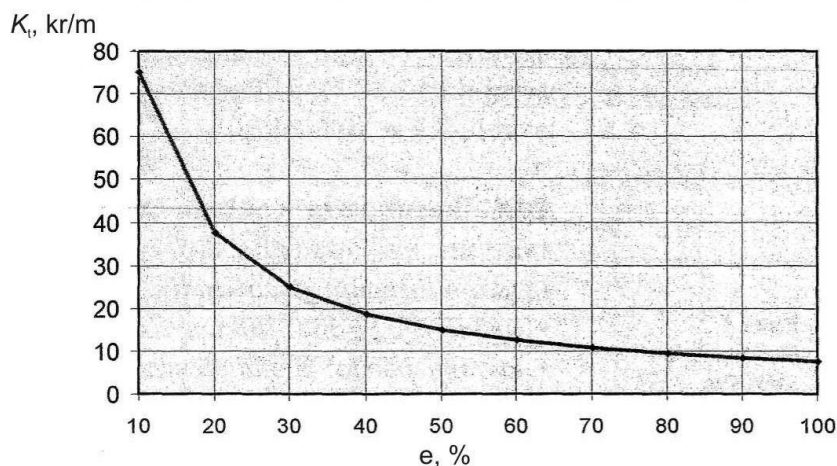
- MIG/MAG-keevitus 20–50%, USA-s 35%,
- elektrood- e käsikaarkeevitus 20–45%, USA-s 25%,
- MAG-robotkeevitus 60–85%,
- MAG-täidistraatkeevitus 20–45%,
- keevitus rübustis 40–70%, USA-s 50%.

Kaare põlemisaja tegurit saab parandada:

- keevitusprotsesi ja lisametalli valikuga, millega ei kaasne räbu ja pritsmete tekkimist,
- keevitusvigade ja praagi vähendamisega,

- keevitusseadmete kiire reguleerimise ja seadistamisega, näiteks sünergiliste MAG-masinate kasutamisega,
- töökoha hea organiseerimisega,
- keevitusmanipulaatorite ja rakiste kasutamisega toodete pööramiseks.

Kaare põlemisaja teguri mõju summaarsele keevituskuludele nurkõmbuse MAG-keevitusel traadiga  $d = 1,2$  mm ja keevitusvooluga 300 A iseloomustab kõver joonis 12.3 [34].



Joonis 12.3. Keevituskulude sõltuvus kaare põlemisaja tegurist, kaare suhtelise põlemisaja mõju keevituskuludele nurkõmbuse  $a = 5$  mm keevitamisel

Tuleb märkida, et kaare põlemisaja tegur ei iseloomusta alati tootlikkust. See näitaja sobib üldjuhul kasutamiseks ühe keevitusprotsessi raames. Üldjuhul detailide paigaldamisega, pööramisega jm käitlemisega seotud abiajad ei sõltu keevitusprotsessist. Mittekaareaeg  $e$  abiaeg sõltub põhiliselt elektroodi vahetamisele kulunud või räbu eemaldamise ajast. Kui suurendame tootlikkust, siis kokkuvõtlik keevitusaeg lüheneb ja kaare põlemisaja tegur võib isegi väheneda.

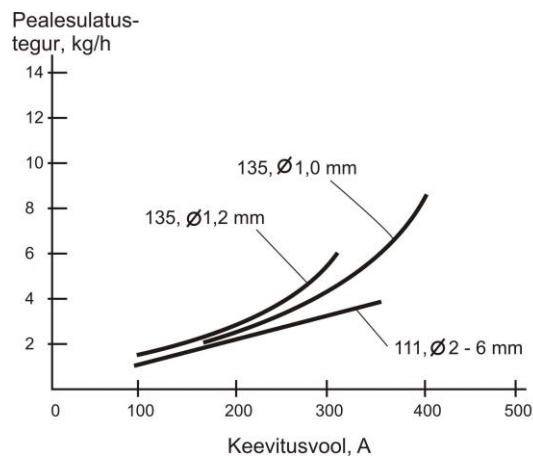
Vaatleme juhust, kui keevitati püstõmbust tavalise traadi ja täidistraadiga. Esimesel juhul olid ajad järgmised: kaareaeg moodustas 6,7 min, abiaeg 10 min. Kaare põlemisaja tegur on 40%.

Võttes kasutusele täidistraadi, lühenes kaareaeg 3,9 minutini, seejuures abiaeg jäi samaks – 10 min. Saame kaare põlemisaja teguriks 28%. Järelikult ei saa kaare põlemisaja teguri osas teha veel järeldusi ühe või teise keevitusprotsessi tootlikkuse osas.

## 12.4. Pealesulatustegur

Keevitusprotsessi tootlikkust iseloomustatakse ajaühikus sulatatud keevismetalli massiga, mida tuntakse pealesulatusteguri all (*deposition rate*) ja mis võrdub ühe tunni jooksul sulatatud keevismetalli massiga kg. Venekeelses kirjanduses kasutatakse sama mõistet, kuid erinevusega, et hinnatakse veel sulatusprotsessi tõhusust kasutatud keevitusvoolu suhtes, kus tulemus jagatakse läbi voolutugevusega. Levinud on veel termin "sadestuskiirus". Pealesulatustegur sõltub kaarkeevitusel keevituskaare võimsusest ja keevitusvoolu kasvades see suureneb. Seetõttu tuleb võimsuse määramisel arvestada konkreetseid elektroodide läbimõõte

ja keevitusvoolu, näiteks kasutades graafikuid (joonis 12.4). Praktikas saadakse täpsemad lähteandmed keevitusprotseduuride spetsifikaatidelt (WPS).



Joonis 12.4. Pealesulatus-tegur erinevatel voolutugevustel eri keevitusprotsesside kasutamisel: 111–elektroodkeevitus, 135 – MAG-keevitus

Pealesulatus-tegurit saab suurendada:

- keevitusvoolu suurendades,
- kasutades jämedamat elektroodi või keevitustraati,
- keevitades allasendis,
- kasutades rakiseid toodete pööramiseks (manipulaatorid, rullikud, kanturid),
- kasutades automatiseerimist ja mehhaniseerimist,
- kasutades tootlikumaid keevitusprotsesse,
- kasutades tootlikumaid lisametalle, näiteks täidistraati.

## 12.5. Kuluelementide määramine

Lisametalli kulu

$$K_L = M \cdot \frac{H_L}{N} \text{ eurot/m}$$

- kus  $M$  – keevismetalli 1 meetri mass kg/m,  
 $H_L$  – keevituse lisametalli 1 kilo hind eurot/kg,  
 $N$  – lisametalli kasutustegur.

Võetakse sõltuvalt keevitusprotsessist:

- elektroodkeevitus – 0,65;
- MAG-keevitus, metalltäidistraat – 0,95;
- rübustis keevitus – 1,0

## Kaitsegaasi kulu

$$K_g = \frac{M}{T} \cdot V \cdot H_g \cdot K,$$

kus  $T$  – pealesulatustegur kg/h,

$V$  – kaitsegaasi kulunorm l/min,

$H_g$  – gaasi ostuhind (CO<sub>2</sub> krooni/kg, segugaas eurot/m<sup>3</sup>),

$K$  – tegur. CO<sub>2</sub> võetakse 0,12, segugaasile 0,06.

Sageli võetakse kaitsegaasi kuluks 1 kg keevitustraadi kohta 0,5 m<sup>3</sup>/kg.

## Räbusti kulu (keevitus räbustis)

$$K_r = M \cdot R \cdot H_r \text{ eurot/m}$$

kus  $R$  – räbusti kulunorm 1 kg traadi kohta,

$H_r$  – räbusti 1 kg hind eurot/kg.

Räbusti kulu sõltub räbusti tüübist, kaare pingest, keevitusvoolust. Määratakse eksperimentaalselt või tarnijate soovitude põhjal.

Sageli võetakse keskmine kulunorm

$R = 1$  kg/kg traadi kohta.

## Tööjõukulu

$$K_t = \frac{M}{T} \cdot \frac{1}{e} \cdot H_t \text{ eurot/m}$$

kus:  $e$  – kaare põlemisaja tegur,

$H_t$  – tööjõu maksumus tööandjale (keevitaja tunnitasu + sotsiaal- ja haigekassa maksud + töötuskindlustus).

## Elektrienergia kulu

$$K_e = M \cdot E \cdot H_e \text{ eurot/m}$$

kus  $E$  – elektrienergia kulunorm, kWh/kg võetakse  $E \approx 3$  kWh/kg,

$H_e$  – elektrienergia hind eurot/kWh.

## Seadmete kulu

$$K_s = \frac{M}{T} \cdot \frac{1}{e} \cdot H_{st} \text{ eurot/m}$$

kus  $H_{st}$  – seadme 1 töötunni hind euro/kg, määratakse valemiga:

$$H_{st} = H_s \cdot \left( \frac{1}{T_a} + \frac{p}{2 \cdot 100} + y \right) \cdot \frac{1}{T_k}$$

kus  $H_s$  – seadme hind, eurot;

$T_k$  – seadme kasutusaeg aastates, võetakse ühe vahetusega tööl 1600 tundi;

$T_a$  – seadme kasutusaeg e amortisatsiooniperiood, võetakse 5 a;

$y$  – seadme tehnilise teenindamise kulud, võetakse tavaliselt 10% seadme hinnast;

$p$  – pangaintressid %.

Sageli võetakse:

käsikaarkeevituse vooluallikad  $H_s = 1500\text{--}2000$  eurot,

MAG-keevitus – 3000–6000 eurot,

keevitustraktorid keevitamiseks räubustis – 24000 eurot.

Edasi summeeritakse kuluelemendid ja saadakse 1 meetri keevisõmbluse valmistamise kulud.

## 13. OHUTUSHOID KEEVITUSTÖÖDEL

Kaarkeevitamine on seotud teatud ohtudega töötaja tervisele, mida saab vältida töökoha õige korraldamisega, ohutus- ja hügieeninõuetest kinnipidamisega ja organisatsiooniliste meetmetega. Nii tagatakse tervisele võimalikult väike kahjulik mõju ja välditakse traumasid töökohtadel.

### **Ohutegurid kaarkeevitamisel on:**

1. Elektrilöögi oht.
2. Tuleoht.
3. Kahjulike aurude ja aerosoolide eraldumine.
4. Kiirgus.
5. Müra.

### Elektriohutus

Keevitaja võib vahetult kokku puutuda kaarkeevituse vooluahelaga (näiteks elektroodi vahetades) või ka toitevõrguga. Elektrivoolu ohtlikkus inimesele oleneb keha läbiva voolu tugevusest, voolu kulgemisest, voolu all olemise ajast ja voolu sagedusest. Inimesele ohtlikuks keha läbivaks voolutugevuseks loetakse 50 mA. Tavaliselt võetakse ligikaudsetes arvutustes inimese jäsemete (käsi, jalg) takistuseks 500 oomi, keha takistust ei arvestata. Näiteks kui keevitaja puudutab ühe käega pinget all olevat elektroodi ja teisega maandust, siis võib vooluahela takistuseks lugeda 1000  $\Omega$ . Eeldades, et vooluallika tühijooksupinge on 80 V, on inimese keha läbiva voolu tugevus 80 mA, mida loetakse ohtlikuks. Ohutust saab parandada elektritakistuse suurendamisega, näiteks kasutades järgnevat meetmeid:

- terved ja kuivad kummitallaga jalanõud;
- isoleeriv kaitsematt keevitaja all;
- terved ja kuivad kindad;
- kuiv töökoht.

Kaarkeevituse pinget on üldjuhul madalam ohtlikust pingest, mille väärtused standardites on alalisvoolule 113 V ja vahelduvvoolule 68 V. Eriti kõrget pinget, kuni 400 V, kasutatakse plasmalõikamisel, mida võib lugeda eriti ohtlikuks. Võrgupinge all olevat keevitusseadet ei tohi asetada voolu juhtivasse keskkonda – autosse, mahutisse. Tähistusega *S* – *separe* vooluallikaid võib kasutada ohtlikes ruumides. Töökohad peavad olema varustatud lekkevoolukaitsmega: kui keevitaja jääb pinget alla, siis lülitub vooluallikas välja. Ise jalgupidi vees olles on keevitamine kategooriliselt keelatud.

Tuleb hoida keevituskaableid vigastuste eest. Keevitamisel tuleb samuti kanda hooldusmaanduse e tagasivoolu kaabli kindla kinnituse eest, kasutades vastavaid tööstuslikke klambreid. Ehitise või seadmete osade kasutamine tagasivoolu juhtidena on rangelt keelatud.

Kui mingi toote keevitamisel kasutatakse kahte vooluallikat, kus kaks keevitajat keevitavad üheaegselt mingit toodet, siis keevitusseadmete vaheline pinget on nende vooluallikate tühijooksupingete summa ja juba ohtlik keevitaja jaoks.

Keevitusseadme ebaõige kasutamise ja paigaldamise korral on keevitajal oht jääda pinget alla. Selle vältimiseks tuleb nii toitekaableid, nende pikendusi, keevituskaableid kui ka juhtimiskaableid hoida kuumade ja teravate detailide eest, et ei kahjustuks nende isolatsioon.

Kaablid ei tohi jääda keevitatavate detailide alla. Kaableid ei tohi vedada uste, luukide vahelt läbi, samuti risti üle liikumisteede. Ei tohi kasutada vigastatud kaableid.

Arvestada tuleb magnevälja kahjuliku mõjuga, eriti TIG-keevitusel, kus kasutatakse kontaktivaba kõrgsagedussüüdet. Kaare süütamisel võivad tekkida tugevad elektromagnet-häired, mis võivad mõjutada südamestimulaatorite, raadio ja teleaparatuuri tööd.

## Tuleohutusnõuded

Keevitamisega kaasneb nii detailide kui ka elektroodi kuumenemine, eralduvad kuumad keevituspritsmed ja sädemed ning seetõttu tuleb täita tuleohutusnõudeid.

Tuleohutusnõuded on toodud EV siseministri määruses nr 15 18.06.98, kus keevitust loetakse tuletöökaks koos ketaslõikuriga lõikamise, bituumeni kuumutamise, lõkke tegemisega jm. Keevitamisel nagu teistegi tuletööde korral eristatakse alalisi ja ajutisi töökohti. Esimesel juhul on tööks spetsiaalselt projekteeritud ja ohutusseadmetega varustatud töökohad, teisel juhul tegutsetakse kas avariide kõrvaldamise või tööga ehitusobjektidel jm. Viimasel juhul tuleb varustada töökoht tulekustutitega, puhastada töökoha ümbrus kuni 5 m raadiuses põlevjäätmest ja kaitsta keevituskohast lähemal kui 2 m asetsev tarind mittepõleva kattega või valada üle veega. Tuletöö tegemisel ajutises tuletöö kohas vastutavad tuleohutuse eest omanik, valdaja või tööde peaettevõtja, kes väljastavad tuletööde loa. Tuletööd võib teha ajutises tuletöö kohas ainult juhul, kui selle tegemine alalises tuletöö kohas ei ole võimalik. Tuletöö luba antakse üldjuhul ühele vahetusele, kuid luba võidakse pikendada järgmisele vahetusele. Tuletöö loata võib teha keevitustöid avarii lokaliseerimisel või likvideerimisel. Keevitaja peab läbima eraldi koolituse ja saama tuleohutustunnistuse. Muuseas, Eestis välja antud tuleohutustunnistus ei kehti teistes maades, näiteks Soomes töötades tuleb kohapeal läbida koolitus ja eksam ning saada kehtiv tuletööde luba. Lubade vormid on toodud määruses.

Soomes kehtib reegel, et keevitustööde tegemisel suurte ajalooliste või kunstilise väärtuste hoidmise kohtades tuleb enne tööde alustamist informeerida päästekeskust. Erilise ohu allikateks on saeveskid, tekstiiliettevõtted, kergsüttivate materjalide laod. Tuletööde tegemisel määratakse tuletööde järelevalve isik, kes vaatab pärast tööde lõpetamist üle töökoha ja jälgib seda 2–4 või enama tunni jooksul.

Põlevgaaside – propaan, veeldatud maagaas jt kasutamisel tuleb arvestada, et õhust raskemad gaasid kogunevad süvenditesse ja madalamatesse kohtadesse, mis loob plahvatus-ohu. Seetõttu tuleb eelistada õhust kergemat atsetüleeni.

## Kahjulike ühendite eraldumine ja ventilatsioon

Töökeskonna keemiliste ohutegurite parameetrid ei tohi vastavalt seadusandlusele (Töötervishoiu ja tööohutuse seadus 26.07.1999) ületada piirnorme.

Seaduse järgi on ohuteguri piirnorm e ohuteguri parameeter ajaühikus mõõdetud keskmine väärtus, mis 8-tunnise tööpäeva ja 40-tunnise tööädala jooksul ei põhjusta töötajale tervisekahjustusi. Kasutatakse eestikeelseid termineid, nagu kahjulike ainete piirkontsentratsioon (LPK), aga ka lubatud kahjuliku aine sisaldus (LKS). Seadusandlusega antakse ette lubatud pikaajaline – 8 tundi, harvem lühiajaline – 15 min LPK. Inglise keeles kasutatakse terminit ja lühendit  $TWA_{8h}$  (*time weighted average concentration*), või TLV (*threshold limit volume*), saksa keeles *HTP-wert*. Tööandja peab rakendama meetmeid terviseriskide vältimiseks ja kõrvaldamiseks. Selleks kasutatakse nii individuaalseid isiku- kui ka ühiskaitsevahendeid.

Keevitamisel tekib nn keevitussuits (*welding fumes*), mis sisaldab kahjulikke ühendeid aerosoolide osakeste (alla 10  $\mu\text{m}$ ) näol, metalliaurusid ja gaase.

Nende kahjulikkus ja lubatud määr sõltub keevitatavast materjalist ja kasutatud keevitusprotsessist. Kevituskoha ventilatsiooniga tagatakse, et LPK väärtust erinevate ühendite jaoks ei ületataks. Aerosoolide summaarset sisaldust õhus alla  $5\text{mg}/\text{m}^3$  loetakse reeglina kahjutuks. Kahjulikud ühendid tekivad elektrootkeevitusel põhiliselt elektrootkatest. Lääne elektrootkade pakenditel on sageli märgitud keevitussuitsu klass (SFS 4462), mida on 7. Katseliselt määratakse keevitusaerosoolide moodustamise kiirus  $\text{g}/\text{h}$  ja siis nende kuni lubatud piirini lahjendamiseks vajalik lisaõhu vajadus. Näiteks esimese klassi elektrootkil on vajalikuks lahjendamiskoguseks alla  $3000\text{ m}^3/\text{h}$ , 7. klassil üle  $100\,000$ .

Põhilised kahjulikud ühendid, nagu Mn, V, Mo, Ba ja Mn on viidud elektrootkatesse või traati ja nad mõjuvad kahjulikult kesknärvisüsteemile ning hingamiselditele. Nende lubatud sisaldust on Soomes viimastel aastatel vähendatud  $0,5\text{ mg}/\text{m}^3$  kuni  $0,1\text{--}0,2\text{ mg}/\text{m}^3$ -ni. Kahjulike ainete eraldumine sõltub elektrootkate tüübist. Aluselised elektrootkatted sisaldavad baariumfluoriidi. Suurel hulgal eraldub mürgiseid ühendeid ka rutiil- ja tsellulooskattega elektrootkade kasutamisel. Kahjulikke ühendeid võib veel eralduda keevitatavatest materjalidest või pinnakatetest.

Legeerimata teraste keevitamisel on üle 80% tekkivatest ühenditest tervisele kahjutud.

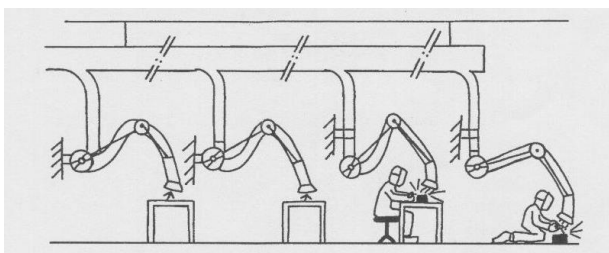
Kõrgeleegerteraste ja roostevaba terase keevitamisel on kahjulikeks kroomi ja nikli ühendid, mis on vähitekitajad. Eriti ohtlik 6-valentne kroom, mis võib olla astma ja vähi tekitajaks.

Alumiiniumi keevitamisel tekkivad metalliaurud ja aerosoolid on mürgised ja võivad põhjustada Alzheimeri tõbe.

Tervisele ohtlikud on Pb sisaldavad kruntvärvid, mis võivad esile kutsuda mürgistuse. Zn pindega terase keevitamisel võib tekkida nn metallipalavik, kuid selle mõju keevitaja kopsudele ei ole suur. Kevitamisel kaitsegaasis eraldub osooni, mis tekib keevituskaares ultraviolettkiirguse toimel. Alumiiniumi ja roostevaba terase keevitamisel võib osooni LPK ületada lubatud piirväärtusi. Osooni eraldumine suureneb keevitusvoolu ja kaarepinge kasvades. Osooni neutraliseerimiseks lisatakse kaitsegaasile väike kogus – kuni 0,03% NO. Selliseid kaitsegaasisegusid turustatakse Mison'i kaubamärgi all. Väikest osoonisaldust (alla 0,05 %) on tunda lõhna järgi. Suuremad kogused ärritavad algul kurku, hiljem tekib köha, silmade punetus, peavalu, pikema aja jooksul võib areneda kopsuvähk.

Kevitamise kaitsegaasid ( $\text{CO}_2$ , Ar, He,  $\text{N}_2$ ) on mittemürgised, kuid kinnistes ruumides keevitades võivad välja tõrjuda õhu ja esile kutsuda tööliste lämbumise. MAG-keevitusel moodustub vähesel määral vingugaasi, mistõttu kinnistes ruumides ja mahutites keevitades on vaja tugevat töökoha ventileerimist. Lämmastikdioksiidi ja vingugaasi eraldumine jääb keevitamisel reeglina väiksemaks kui lubatud LPK.

Kevitaja töökoht tuleb varustada kohtventilatsiooniga, normide järgi tootlikkusega  $1000\text{ m}^3/\text{h}$ . Saksamaa kogemuse põhjal võib töökoha ventilatsioon laevatehastes maksta kuni 3000 eurot, õppekeskustes 4000 eurot tööliste kohta.



Joonis13.1. Ventilatsioon töökohtadel



Tervishoiuuringud näitavad, et süsinik- ja madallegeerteraste keevitamine avatingimustes või hästi ventileeritud töökohtades ei kutsu keevitajal esile terviseriske. Kitsastes tingimustes võib kahjulike LPK ületada lubatud ja tuleb kasutada õhufiltriga varustatud keevitusmaske. Näiteks nn euromaski-tüüpi peamaskide alla puhutakse läbi filtri kuni 200 l/min õhku ja nii tekitatakse väike ülerõhk. Filter puhastab kuni 99,8% kahjulikke lisandeid. Maskis kasutatavat ventilaatorit käivitatakse keevitaja vöö külge kinnituvatest akudest, mis nõuavad perioodiliselt laadimist. Roostevaba terase ja alumiiniumi keevitamisel tuleb kasutada selliseid filtermaske. Üldiselt loetakse terviseriski viimati mainitud materjalide keevitajatel küllaltki suureks ja Soomes tuleb keevitajatel kord aastas läbida tervisekontroll.

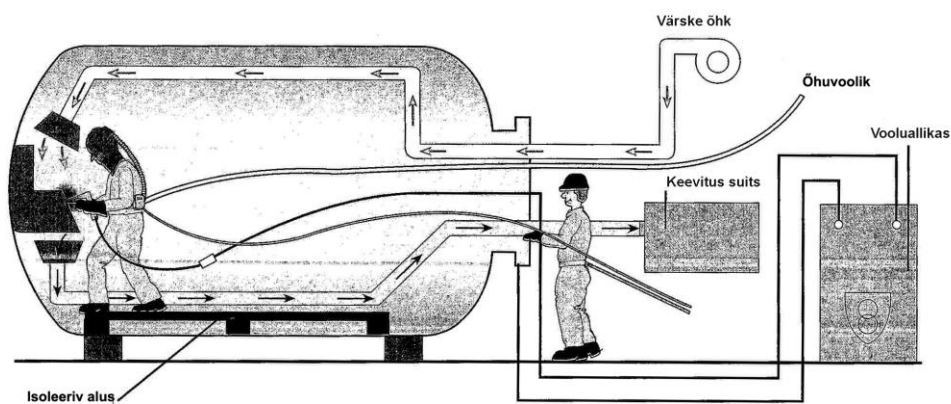
## Kiirguskaitse

Keevituskaarega kaasneb intensiivne ultraviolet- ja infrapunakiirgus, mistõttu on vaja kaitsta silmi ja keha kiirguse eest. Keevitajal on vaja kanda kaitseriietust ja kasutada kaitsemaske. Eriti intensiivne on ultraviolettkiirgus MAG-keevitusel, kus tööriided muudavad värvi juba 1–2 kuu pärast. Silmade kaitseks kasutatakse keevitusmaskidel tumedaid kaitseklaase, mis on tumedusastme järgi jagatud 15 klassi ja tähistatakse numbriga. Kaitseklaasi number valitakse olenevalt keevitusprotsessist ja voolutugevusest. Näiteks elektroodkeevitusel ja MAG-keevitusel vooluga 80–175 A kasutatakse klaasi nr 11 EN 169 järgi.

Sageli kasutatakse automaatselt tumenevaid keevitusmaske. Kasutatakse vedelkristallidest paneele, mille tumedusastet on võimalik maski sees olevast nupust reguleerida. Mask võib olla varustatud seest suurendava klaasiga, mis sobib lühinägelikele keevitajatele. Nende maskide puuduseks on küllaltki pikk reageerimisaeg – kaare süütamisel kuni 0,1–1 ms ja kustumisel 50–500 ms, mis võib väsitada keevitaja silmi. Isetumenevaid keevitusmaske ei kasutata miinustemperatuuridel alla  $-10^{\circ}\text{C}$ . Samuti piirab nende kasutamist küllaltki kõrge hind.

Tänapäevased keevitaja peamaskid sisaldavad 3 klaasi: välimine kaitseb kaitseklaasi pritsmete eest, sisemist kasutatakse pärast tumeda klaasi eemaldamist keevisliidete käiadega puhastamisel.

Kiirguse leviku tõkestamiseks tuleb keevitaja töökoht eraldada ülejäänud ruumist vaheseinte, sirmidega ja sissepääs töökohale keevituskardinatega. Keevitamisel mahutites julgustab keevitajat tööline, kes saab keevitaja vöö külge kinnitatud rihmaga töökohalt eemaldada kas elektrilöögi või gaasimürgistuse korral (joonis 13.2).



Joonis 13.2. Keevitamine mahutis. Tööline julgustab keevitajat

## Müra

Müra tekib räbu eemaldamisel, vasaratega õgvendamisel ja käiamisel pneumokäiadega. Tuleb kasutada kõrvaklappe. Sõltuvalt müratasemest antakse ajalised piiri, mille jooksul müra loetakse kahjutuks. Näiteks 8-tunnise tööpäeva jooksul lubatakse mürataset 85 dB 8 tunni jooksul, taset 88 dB 4 tunni jooksul, taset 94 dB 1 tunni jooksul.

## Keevitaja kaitsevarustus

Arvestades kahjulikke tegureid peab keevitaja kandma eriiietust: pükse, jakki, tunkesid (kombinesooni), saapaid, kindaid, põlvekaitsmeid, peamaski. Kaitseriietust tarnitakse standardi EN ISO 11611:2007 järgi ja see peab keevitajat kaitsma keevituspritsmete, keevituskaarega kokkupuute, kiirguse ja lühiajalise vooluringi (alla 100 V) sattumise eest.

Eristatakse 2 kaitseklassi: 1. klass on mõeldud tingimustel, kus tekib vähe pritsmeid. Mõeldud TIG-, MIG-, gaaskeevituseks ja käsikaarkeevituseks rutiilkatega elektroodiga.

2. klass on mõeldud tööks raskemates ja kitsamates tingimustes, näiteks laeasendis keevitamiseks elektroodiga, MAG-keevituseks ja tädistraadiga MAG-keevituseks. Kasutatakse spetsiaalseid keevitajakindaid.

Nahast keevitajakindad EN 12477:2001 jagunevad 2 tüüpi: A-tüüp on mõeldud TIG-keevituseks, B-tüüp on mõeldud kõikide ülejäänud keevitusprotsesside puhul.

## Kirjandus

1. <http://www.aws.org> Vision for Welding Industry. American Welding Society(AWS).
2. Kulu, P., Kübarsepp, J., Laansoo, A. jt. Metalliōpetus ja metallide tehnoloogia. 2. osa. Metallide tehnoloogia, TTÜ kirjastus, Tallinn, 2001, lk 142–212.
3. Laansoo, A. Keevitamine. MIG/MAG-keevitus. Argo, Tallinn, 2010.
4. Lukkari, J. Hitsaustekniikka. Perusteet ja kaarihitsaus. OY Edita. Helsinki, 1999.
5. Lukkari, J. Hitsausenergia ja lämmontuonti hitsauksessa. Hitsaustekniikka, nr 4, 1997, 29.
6. Lukkari, J. Hitsauslisaaineet lujile teräksille. Hitsaustekniikka, 2002, nr 3, 28–45.
7. Welding guide. Rautaruukki steel. Finland, 1995.
8. Martikainen, J., Niemi, E. NDT-tarkastus käsikirja. SHY, Helsinki, 1993.
9. Lukkari, J. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus, MET, Helsinki, 1999, 393–398.
10. Schulze, G. Die Metallurgie des Schweissen. Springer, London, 2010.
11. Toivanen, E. Vakavaa asiaa hitsiluokista. Hitsaustekniikka, nr 6, 2003, 22–30.
12. Kudrjavitsev, Y., Kleiman, J. Rehabilitation and Repair of Welded Elements and Structures by Ultrasonic Peening. IIW document XIII-2076-05.
13. V. M. Lihavainen. A Novel Approach for Assessing the Fatigue Strength of Ultrasonic Impact Treated Welded Structures. Acta Universitatis Lappeenrantaensis, nr 252, Lappeenranta, 2006.
14. Weman, K. Welding Processes Handbook. Woodhead Publishing Limited. Cambridge, 2003.
15. IIW Document SST 1157-90. Guidance on Assessment of the Fitness for Purpose of Welded Structures.
16. Raj, B. Non Destructive Testing of Welds. Narosa Publishing, 2000, India.
17. Hannerz N. E. Materials Technology of Welding. KTH, Stockholm, 2001.
18. Welding Handbook. Vol. 2. Welding Processes, AWS, Miami, 1991.
19. Welding Handbook. Vol 1, Welding Science and Technology, AWS, Miami, 2001.
20. IIW Doc IX-1533-1988. Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic Steel Weld.
21. Welding handbook. A Guide to Better Welding of Hardox and Weldox. SSAB Oxelösund, 2009.
22. Lukkari, J. Työkaluja hitsauskoordinoijalle hitsausten suunnittelua varten, Hitsaustekniikka, nr 2, 2007, 10–13.
23. Närvanen, P. Hitsaussuositukset lujien N-A-XTRA-terästen hitsaukseen. Hitsaustekniikka, nr 1, 2009, 20–24.
24. Sagalevitš, V., Saveljev, V. Stability of Welded Joints and Structures. Mashinostroeniye, Moscow, 1986.
25. Aleksejev E. Welding in Building. Moscow, Strojiizdat, 1977.
26. Killing, R. Welding Processes and Thermal Cutting. Berlin, DVS, 2001.
27. [http://www.trumpf.com/3.img-cust/Library\\_Laser\\_Processing](http://www.trumpf.com/3.img-cust/Library_Laser_Processing).
28. Handbook of Laser Technology and Applications. V3: Application.

29. <http://www.fronius.com>.
30. <http://lincolnelectric.com>.
31. <http://www.otc-daihen.de>.
32. <http://www.millerwelds.com>.
33. <http://www.ewm.de>.
34. Lukkari, J., Hitsauksen ja hitsausmenetelmien tuottavuudesta ja kustannuksista, Hitsaustekniikka, nr 3,2000,4-10.