



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma
BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

KITKAHITSUKSEN KÄYTTÖ KAIRAUSPUTKIEN VALMISTUKSESSA
FRICTION WELDING OF DRILLING PIPES

Lappeenrannassa 27.4.2010

Heikki Laitinen

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	1
1.1 Työn tavoitteet ja rajaus	1
1.2 Terra-Team Oy	2
2 KITKAHITSAUKSEN PERIAATE	3
3 KITKAHITSAUSMENETELMÄT	5
3.1 Jatkuvasyöttöinen kitkahitsaus.....	6
3.2 Inertiakitkahitsaus	7
3.3 Yhdistelmämenetelmät	7
3.3.1 HUP-kitkahitsaus	8
3.3.2 Japanilainen menetelmä.....	9
4 KITKAHITSATTAVUUS	10
4.1 Perusaineen kitkahitsattavuus	11
4.2 Metallurgiset ominaisuudet	11
4.3 Fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet.....	12
4.4 Valmistustekninen kitkahitsattavuus	12
4.4.1 Liitospinnan laatu.....	13
4.4.2 Purse	14
4.5 Hitsausvirheet ohuiden putkien kitkahitsauksessa.....	15
4.6 Kitkahitsauksen laadunvarmistus.....	16
5 TUTKIMUSJÄRJESTELYT	18
5.1 Kairausputket ja iskutangot.....	18
5.2 Kitkahitsauslaitteisto	20
5.3 Hitsauskokeet	21
5.4 Taivutuskokeet.....	23
5.5 Vetokokeet.....	24
5.6 Makrohietutkimus.....	25
5.7 Kovuusmittaukset.....	26
5.8 Muut mittaukset.....	27
5.9 Kitkahitsauslaitteiston hankintahinta	28
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	29
7 YHTEENVETO.....	32

LÄHTEET	33
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Kitkahitsaus on suhteellisen tuntematon hitsausprosessi Suomessa ja sitä pidetään soveltuvana lähinnä suursarjatuotantoon. Sitä sovelletaan mm. auto-, maansiirtokone-, lentokone- ja työkaluteollisuudessa eripariliitosten hitsaamiseen. Vaikka sen tuotesovellukset rajoittuvatkin hyvin kapealle alalle, voi sillä saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä oikein käytettynä.

Kasvaneet materiaali- ja valmistuskustannukset ovat eräitä syitä miettiä oman yrityksen toimintaa ja toiminnan kehittämistä. Kuitenkin resurssien vähyys ja ajanpuute etenkin pienillä konepajoilla johtavat yrityksen voimavarojen keskittämisen vain ydinosaamisalueelle. Tällöin yritykseltä voi jäädä näkemättä hyödyllisiä ja kustannuksia vähentäviä valmistusvaihtoehtoja. Myös espoolaisessa Terra-Team Oy:ssä on halua kehittää toimintaansa ja selvittää kitkahitsauksen soveltamista yrityksen tuotteille.

1.1 Työn tavoitteet ja rajaus

Tässä kandidaatintyössä on pyritty selvittämään soveltuuko kitkahitsaus kairausputkien ja iskutankojen valmistamiseen piensarjatuotannossa ja tuottaako se kustannussäästöjä kohdeyritykselle ja mahdollisia uusia tuotesovelluksia. Tärkeimmät selvitettävät kohteet ovat kitkahitsauksen asettamat materiaalivaatimukset, löytyykö markkinoilta valmiina piensarjatuotantoon soveltuvia laitteistoja sekä kustannusarvio kitkahitsauslaitteistolle.

Työn alussa esitellään kitkahitsauksen periaate sekä eri kitkahitsausmenetelmät lyhyesti. Tämän jälkeen keskitytään kitkahitsattavuuteen. Tärkeimpänä asiana on pidetty materiaalin kitkahitsattavuutta ja sitä mitkä asiat vaikuttavat lopullisen tuotteen laatuun ja kustannuksiin. Teoriaosassa keskitytään myös mitä vaatimuksia putkien kitkahitsaus asettaa.

Kitkahitsauskokeissa on pyritty selvittämään voidaanko kairausputki valmistaa niin, että liitinpäät, joille on tarkemmat vaatimukset, kitkahitsataan jatkavaan putkeen, joka olisi halvempaa terästä kuin liitinpäiden. Tällöin kohdeyritys voisi kilpailla uudella tuotteella massatuotantoa harjoittavien yritysten kanssa.

1.2 Terra-Team Oy

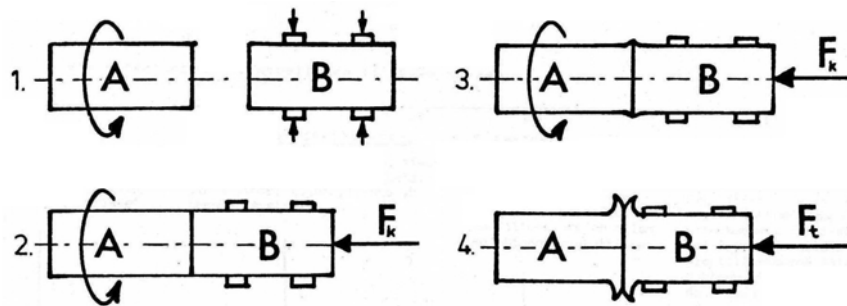
Terra-Team Oy on Espoon Juvanmalmilla toimiva yritys, joka on perustettu 1991. Yrityksen palkkalisloilla on 16 työntekijää, joista 8 on tuotannon puolella. Toimialoja on kaksi: päätoimialana yritys valmistaa maa- ja kalliokairausvälineitä kairausurakointiin, sivutoimialana on rakennusalan timanttityökalujen myynti ja markkinointi.

Vuonna 2009 Terra-Teamin liikevaihto oli n. 5 miljoonaa euroa. Liikevaihdosta n. 65 % sijoittui päätoimialaan maa- ja kalliokairausvälineiden valmistukseen, loput sivutoimialaan timanttityökalujen myyntiin ja markkinointiin. Yrityksen markkinat ovat lähinnä Suomessa, mutta jonkun verran myös Ruotsissa. Suurimmat asiakkaat ovat Suomessa toimivat kairausurakointiyksiköt.

2 KITKAHITSAUKSEN PERIAATE

Kitkahitsaus luokitellaan puristushitsausmenetelmäksi, jossa liitettävät pinnat lämmitetään kitkan avulla, minkä jälkeen hitsaus tapahtuu paineen alaisena ilman lisäainetta. Tarvittava kitkalämpö tuotetaan liikuttamalla paineen alaisena liitospintoja toistensa suhteen. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 1, jossa A on pituusakselin ympäri pyörivä kappale, jonka pituusakselin suuntainen liike on estetty, ja B pituusakselin suuntaan liikkuva kappale, jonka pyörimisliike on estetty.

/1/



Kuva 1. Kitkahitsauksen periaate. 1. Kappaleet asetetaan kitkahitsauskoneeseen ja kappale A asetetaan pyörivään liikkeeseen. 2. Liitospinnat asetetaan vastakkain ja saatetaan puristukseen voimalla F_k . 3. Liitospinnat kuumenevat, tyssäytyminen ja purseen muodostuminen alkavat voiman F_k pysyessä vakiona. 4. Kappaleen A pyörimisliike pysäytetään ja kappaleet puristetaan voimalla F_t toisiaan vasten, jolloin syntyy lopullinen hitsi. $F_t > F_k$. /2; 3/

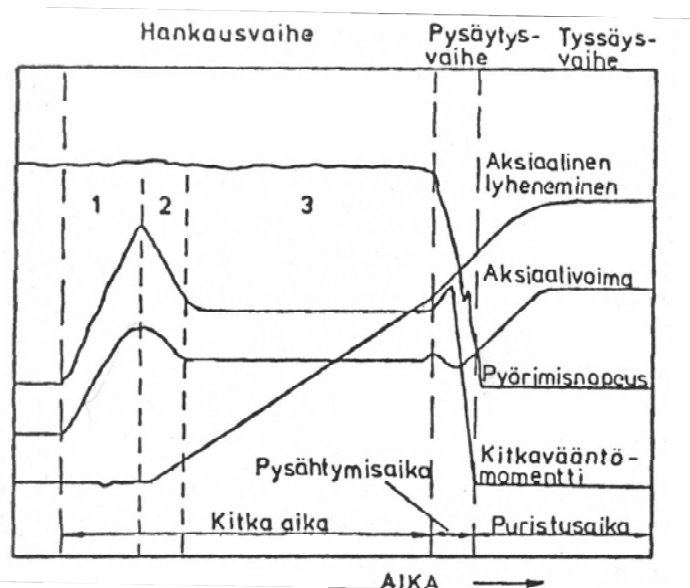
Jatkuvasyöttöisessä menetelmässä hitsaustapahtuma voidaan jaotella kolmeen päävaiheeseen, jotka on esitetty kuvan 1 vaiheissa 2,3 ja 4:

- Kitkavaihe eli liitospintojen alkukosketus ja suurimpien pintaepätasaisuuksien tasoittuminen
- Pintaoksidien murtuminen, loppujen epätasaisuuksien tasoittuminen sekä puhtaiden metallipintojen muodostuminen
- Pysäytys- ja tyssäsvaihe eli vieraiden hiukkasten, pintaoksidien ja muiden sulkeumien puristuminen ulos plastisoituneesta railosta sekä hitsauspurseen muodostuminen, joka aiheutuu metallin puristumisesta säteittäisesti ulospäin. /4/

Kitkavaihe voidaan jakaa kosketus-, plastisoitumis- ja kuumennusvaiheeseen. Kun kappaleet koskettavat toisiaan alkaa kosketusvaihe, joka päättyy kun ensimmäinen kitkavääntömomentin huippu on saavutettu (kuva 2). Lepokitka muuttuu liikekitkaksi pintojen alkaessa pyöriä toistensa suhteen. Vääntömomentti alkaa kasvaa suuresta aksiaalivoimasta johtuvien adheesiosiltojen vuoksi. Metallihiukkasia leikkautuu irti ja siirtyy pinnasta toiseen, jos adheesiovoima on suurempi kuin sidosvoima. /5/

Plastisoitumisvaiheessa lämpötila nousee, jolloin materiaali pehmenee ja leikkauslujuus pienenee. Materiaali alkaa plastisoitua ja käyttäytymään kuten jähmeä neste, kun lämpötila saavuttaa arvon, jossa toipumisnopeus saavuttaa muokkauslujittumisnopeuden. Vaiheen aikana pursottuminen ja kappaleen lyheneminen alkavat. Kun vääntömomentti sekä lämpötila ovat saavuttaneet tasaisen arvon, alkaa kuumennusvaihe. Aksiaalinen lyhenemisnopeus pysyy vakiona, koska lämmöntuonti tapahtuu tasaisesti. /5/

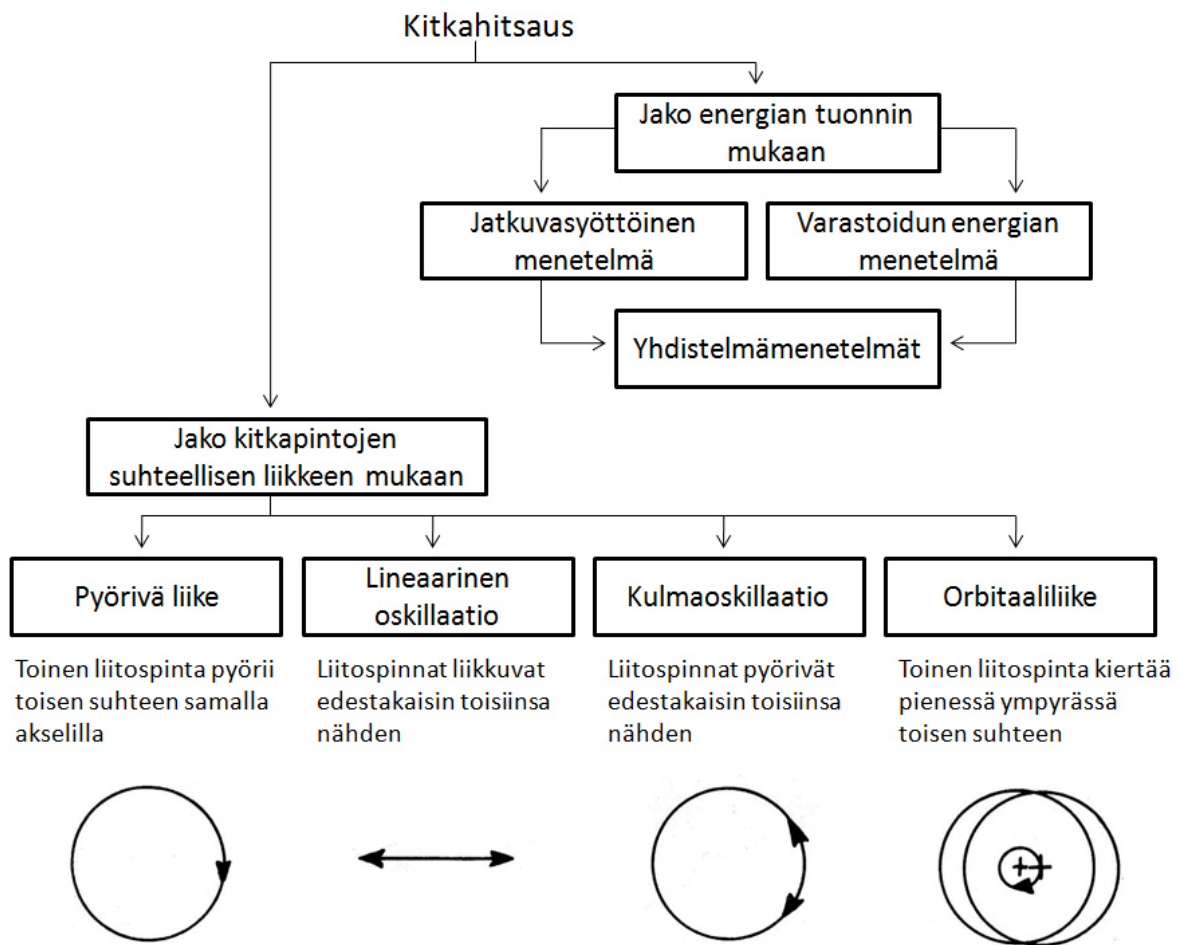
Pysäytysvaiheessa kitkavääntömomentti kasvaa, johtuen lämmöntuontinopeuden ja pinnan kitkaolosuhteiden muutoksesta. Kitkavääntömomentin arvo laskee nolleen, kun liike loppuu. Pysäytysajan tulee olla säädettyä niin, että koko poikkileikkauspinta on plastisoitunut. Tyssäysvaiheessa vierat hiukkaset, pintaoksidit ja muut sulkeumat puristetaan ulos plastisoituneesta railosta. Vaiheella on tärkeä merkitys, sillä muokkautumisen tulee olla riittävän suuri. /5/



Kuva 2. Jatkuvasyöttöisen menetelmän eri vaiheet. /6/

3 KITKAHITSAUSMENETELMÄT

Suurimmat konstruktiviset erot eri kitkahitsausmenetelmien kesken johtuvat hitsausenergian tuonnista sekä tarvittavan kitkan synnytystratkaisuista. Eri kitkahitsausmenetelmät jaetaan standardin SFS-EN ISO 15620 mukaan joko energian tuonnin mukaan tai kitkapintojen suhteellisen liikkeen mukaan (kuva 3). Mekaanisen energian tuontitavan mukaan jako tehdään joko jatkuvasyöttöiseen menetelmään, varastoidun energian menetelmään eli inertiamenetelmään sekä näiden yhdistelmään. Vastaavasti kitkapintojen suhteellisen liikkeen mukaan jako voidaan tehdä pyörivään liikkeeseen, lineaariseen oskillaatioon, kulmaoskillaatioon sekä orbitaaliliikkeeseen. Viime aikoina paljon tutkittu kitkahitsauksen prosessivariaatio on Friction Stir Welding (FSW), jossa työkalupaleet pysyvät paikallaan ja hitsaus tapahtuu pyörivällä työkalulla. /1/

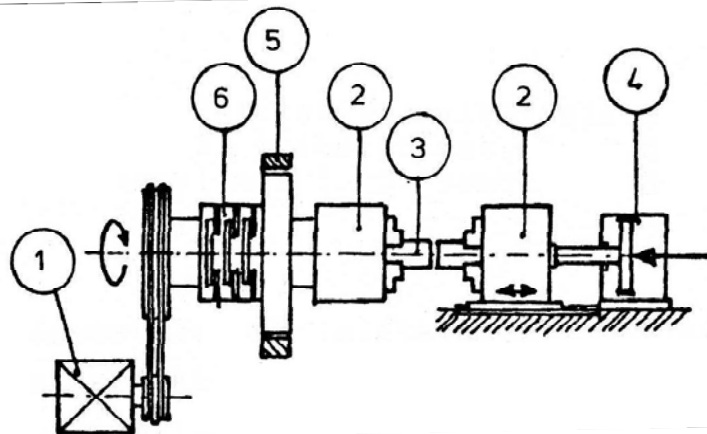


Kuva 3. Kitkahitsauksen jako eri menetelmiin. /1, muokattu 2010/

3.1 Jatkuvasyöttöinen kitkahitsaus

Jatkuvasyöttöisessä kitkahitsauksessa toinen työkappale pysyy paikallaan ja toinen kiihdytetään pituusakselinsa suhteen pyörimään ennalta määrättyyn kierrosnopeuteen. Kun vakiona pidetty kierrosnopeus on saavutettu, puristetaan kappaleet liitospinnoista yhteen annetulla kitkavoimalla. Kitkan ansiosta liitospintojen lämpötilat nousevat ja liitospinnat plastisoituvat. Kappaleen pyörimisliikettä jarrutetaan voimakkaasti, kun riittävä muodonmuutos ja kuumennusaika on saavutettu. /7; 8/

Puristusvoimaa nostetaan samanaikaisesti, kun jarrutus alkaa ja kappaleita pidetään paineen alaisena, kunnes lämpötila laskee. Hitsi muodostuu tyssäyspaineen ja korkean lämpötilan vaikutuksesta. Jatkuvasyöttöisen kitkahitsauslaitteiston osat on esitetty kuvassa 4. /9/

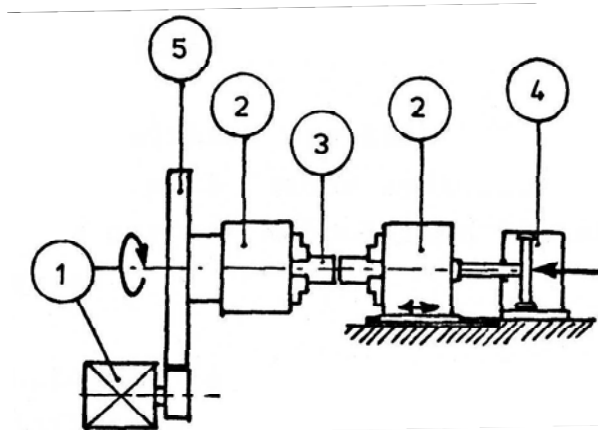


Kuva 4. Jatkuvasyöttöinen kitkahitsauslaitteisto. 1. Käyttömoottori, 2. kiinnittimet, 3. työkappale, 4. painesyylinteri, 5. jarru, 6. kytkin. /10/

Jatkuvasyöttöisen kitkahitsauksen suurimmat vääntömomentit saavutetaan, kun kylmät kappaleet puristetaan toisiinsa sekä pysäytysvaiheessa, kun puristusvoima kasvaa. Koska kierrosnopeuden tulee pysyä vakiona, käyttömoottorin täytyy olla riittävän tehokas, jotta ensimmäinen momenttihiippu ylitetään. Menetelmän etuja ovat nopea sovellettavuus sekä liitosten laadullinen tasaisuus. /5; 9/

3.2 Inertiakitkahitsaus

Inertiakitkahitsaus eli varastoidun energian menetelmä toteutetaan yleensä vauhtipyörän avulla (kuva 5). Siinä vauhtipyörä, työkappale sekä kiinnittimet kiihdytetään määrättyyn pyörimisnopeuteen. Energialähde irrotetaan kytkimellä vauhtipyörästä, kun työkappaleet puristetaan vastakkain. Kitkavoima jarruttaa pyörivässä liikkeessä olevaa kappaletta ja täten nostaa liitospintojen lämpötilaa. Puristusvoima pidetään vakiona koko hitsauksen aikana, toisin kuin jatkuvasyöttöisessä menetelmässä. /11/



Kuva 5. Inertiakitkahitsauslaitteisto. 1. Käyttömoottori, 2. kiinnittimet, 3. työkappale, 4. painesyylinteri, 5. vauhtipyörä. /10/

Menetelmän etuja ovat nopeus, energiaystävällisyys sekä tarkkuus. Inertiakitkahitsaus on kuitenkin herkempi häiriötekijöille, kuten suurille epäpuhtauksille hitsattavassa pinnassa ja muotovaihteluille kappaleiden päissä. Koska vauhtienergia on vakio ja pyörimisnopeus suuri, voivat muutokset hitsattavissa kappaleissa johtaa epätydyttävään hitsiin. Soveltaminen pienille kappaleille on vaikeaa, eikä sillä saavuteta hyvää valmistustarkkuutta kappaleen pituudelle. /11/

3.3 Yhdistelmämenetelmät

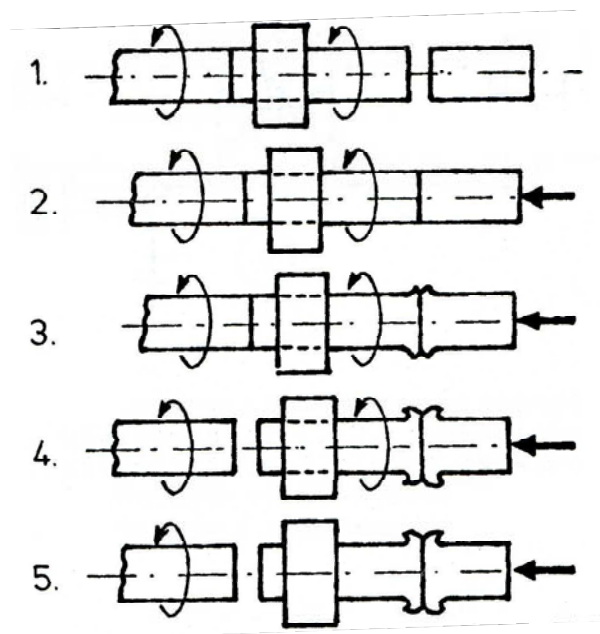
Yhdistelmämenetelmät pyrkivät hyödyntämään edellä mainittujen menetelmien etuja. Jatkuvasyöttöisestä ja inertiakitkahitsauksesta on yhdistetty niiden parhaat ominaisuudet, jotta voitaisiin kehittää kitkahitsausprosessia. Tunnetuimmat

yhdistelmämenetelmät ovat englantilainen HUP -menetelmä ja japanilainen menetelmä. /11/

3.3.1 HUP-kitkahitsaus

Heat Under Power eli HUP-kitkahitsaus (kuva 6) on patentoitu menetelmä, jossa hitsattavien kappaleiden kuumennus suoritetaan vakiokierrosnopeudella. Menetelmä eroaa jatkuvasyöttöisestä menetelmästä siinä, että jarru on poistettu epätarkkuuden vuoksi, jolloin hitsauksen loppuvaiheessa käytetään vauhtipyörää, kuten inertiakitkahitsauksessa. Menetelmän etuja ovat: /12/

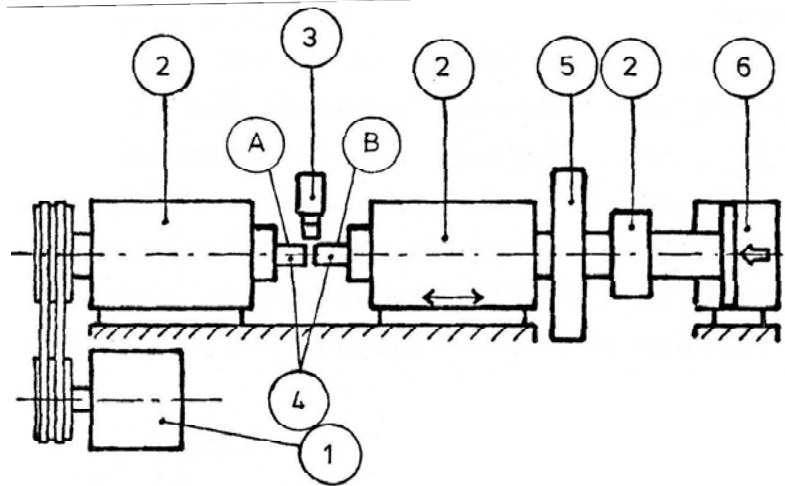
- vapaasti säädettävä aksiaalisen lyhenemisen pituus
- pienempi energiantarve
- hallittu hitsinmuodostumisvaihe.



Kuva 6. HUP-Kitkahitsauksen periaate. 1. Työkappaleiden kiinnitettyä vauhtipyöräjärjestelmä saatetaan pyörivään liikkeeseen. 2. Pyörimisnopeus pidetään vakiona kun työkappaleet puristetaan yhteen. 3. Energian tuontia pyöriykseen jatketaan. 4. Energiantuonti lopetetaan, jolloin vauhtipyörän liike-energia jää jäljelle. 5. Liike-energia loppuu, pyörimisliike loppunut, puristusta jatketaan, kunnes hitsi on jäähtynyt riittävästi. /11/

3.3.2 Japanilainen menetelmä

Japanissa 1960-luvun loppupuolella kehitetyssä kitkahitsauslaitteessa ei ole HUP-kitkahitsauksen tavoin jarrua. Laitteisto (kuva 7) on suunniteltu niin, että hitsin muodostamiseen tarvittava puristusvoima on pieni ja hitsauspurse poistetaan välittömästi hitsauksen jälkeen, jolloin metalli on vielä pehmeää. Kun purse poistetaan sen ollessa vielä pehmeää, leikkuuterän käyttöikä kasvaa. /13/



Kuva 7. Japanilaisen menetelmän kitkahitsauslaitteisto. 1. Käyttömootori, 2. laakeripesä, 3. työstöterä, 4. kiinnittimessä olevat työkappaleet (A ja B), 5. vauhtipyörä, 6. hydraulisylinteri. /13/

Japanilaisessa menetelmässä kappale A kiihdytetään vakionopeuteen, joka pysyy vakiona koko prosessin ajan. Tämän jälkeen kappaleet puristetaan yhteen. Kappaleen B kiinnittimen yhteyteen asennettu vauhtipyörä jarruttaa kappaleen B pyörimisliikettä. Kun vauhtipyörän nopeus on kasvanut samaan kierrosnopeuteen kuin kappaleen A nopeus, liittyminen on tapahtunut. Hitsin jäähtyttyä voidaan yhteenpuristaminen lopettaa. Hitsin muodostuttua vauhtipyörä pysäytetään, kappaleen A kiinnitin avataan ja valmis tuote on irrotettavissa kiinnittimestä. /11/

4 KITKAHITSATTAVUUS

Kitkahitsaus soveltuu hyvin eri materiaalien liittämisen joko keskenään tai itsensä kanssa. Materiaalit saavat poiketa toisistaan suurestikin, johtuen kitkahitsausliitoksen poikkeuksellisesta muodostumistavasta. Kitkapinnan molemmin puolin olevat atomit joutuvat läheiseen vuorovaikutussuhteeseen, jonka lisäksi ohuissa molekyylikerroksissa tapahtuu mekaanista sekoittumista. Taulukossa 1 on esitetty eri materiaalien kitkahitsattavuutta keskenään ja itsensä kanssa. /5/

Taulukko on suuntaa antava, eikä se listaa eri materiaalien kaikkia mahdollisia yhdistelmiä. Taulukko on koottu eri lähteistä niiltä osin kun hitsattavuudesta on kirjallisuudessa tietoa, eikä se rajaa pois niiden materiaalien liittämistä kitkahitsaamalla, joista ei ole tutkimusta.

Taulukko 1. Eri materiaalien keskinäinen kitkahitsattavuus. /11; 14; 15/

Materiaali	Muut yleiset konstruktiomateriaalit										Alumiinit						Teräkset							
	Hopeaseokset	Hopea	Wolframi	Titaaniseokset	Titaani	Nikkeliseokset	Nikkeli	Magnesiumseokset	Magnesium	Kupariseokset	Kupari	6000-sarja	5000-sarja	4000-sarja	3000-sarja	2000-sarja	1000-sarja	Valuteräs	Laakeriteräs	Työkaluteräs	Ruostumaton teräs	Seosteräs	Hiliteräs	
Teräkset																								
	Hiiliteräs																	X						
	Seosteräs																							
	Ruostumaton teräs							X								X		X						
	Työkaluteräs																							
	Laakeriteräs																							
Alumiinit																								
	1000-sarja								X															
	2000-sarja																							
	3000-sarja																							
	4000-sarja																							
	5000-sarja																							
Muut yleiset konstruktiomateriaalit																								
	6000-sarja																							
	Kupari																							
	Kupariseokset																							
	Magnesium																							
	Magnesiumseokset																							
	Nikkeli																							
	Nikkeliseokset																							
	Titaani																							
	Titaaniseokset																							
Wolframi																								
Hopea																								
Hopeaseokset	X																							

Merkinnät:
 Hyvä hitsi
 X Ei hitsiä tai hauras hitsi

Kuten taulukosta havaitaan, helpointa on kitkahitsata samanlaisia sekä ominaisuuksiltaan lähellä toisiaan olevia materiaaleja keskenään. Tällöin purseen muodostuminen tapahtuu samalla tavalla. Vastaavasti erilaisten materiaalien kohdalla, alhaisemman muodonmuutoskyvyn omaava materiaali tuottaa suuremman purseen. /5/

4.1 Perusaineen kitkahitsattavuus

Hiili- ja niukkaseosteisten terästen kitkahitsattavuutta voidaan arvioida karkeasti hiiliekvivalentin avulla. Hiiliekvivalentin ollessa 0,20 - 0,40 % on hitsin ominaisuudet hyvät. Kun hiiliekvivalentti on 0,40 - 0,50 % ja hitsiltä vaaditaan täyttä sitkeyttä ja lujuutta, tarvitaan lämpökäsittelyä. Muussa tapauksessa liitos on sellaisenaan käyttövalmis. 0,50 - 0,80 % arvoilla hitsi on lämpökäsiteltävä. Jos hiiliekvivalentti on suurempi kuin 0,8 %, on hitsi lämpökäsiteltävä hitsauksen jälkeen välittömästi. Hiiliekvivalentti määritetään kaavasta: /16/

$$C_E = C + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Mn}{6} \quad (1)$$

Kitkahitsatun liitoksen jäännösjännitykset ovat huomattavasti pienemmät kuin kaarihitsausprosessien yhteydessä. Kitkahitsauksessa teräs ei sula, vaan jää austeniittiseksi. Tällöin saadaan aikaiseksi virheettömät hitsit koko edellä mainitulla hiiliekvivalenttialueella ilman esilämmitystä. Kitkahitsauksessa lämpö tuodaan suoraan hitsipintaan, jolloin lämpövaikutusvyöhyke on kapea. Inertiakitkahitsauksessa tuotava energiamäärä on pienempi kuin jatkuvasyöttöisessä menetelmässä, joten sen lämpövaikutusvyöhyke on kapeampi. Vyöhykkeen leveys riippuu myös energian tuontinopeudesta, mikä on inertiamenetelmällä nopeampi kuin jatkuvasyöttöisellä. /17/

4.2 Metallurgiset ominaisuudet

Teräkset ovat kokonaisuutena hyvin kitkahitsattavissa, jos tarkoituksena on saada aikaan mekaaninen liitos. Jos tarvitaan laadultaan hyvä hitsi, on materiaalille ja hitsausprosessille asetettava tarkemmat vaatimukset. Terästen sulkeumat voivat heikentää hitsin ominaisuuksia, erityisesti sitkeyttä. Sulkeumia ovat mm. hiili-mangaaniterästen silikaatit ja oksidit sekä automaattiterästen sulfidi- ja lyijysulkeumat. Ominaisuuksien huononeminen johtuu sulkeumien

uudelleenjärjestäytymisestä plastisoituneen metallin virtauksen suuntaiseksi. Ongelman takia esimerkiksi suomugrafiittivalurauta on huonosti kitkahitsattava, kun taas pallografiittivalurautaa voidaan kitkahitsata välttävästi itsensä ja terästen kanssa. Haittoja voidaan lieventää parametrien säädöllä, mutta hyvän hitsin saavuttamiseksi vaaditaan puhtaita materiaaleja. /17/

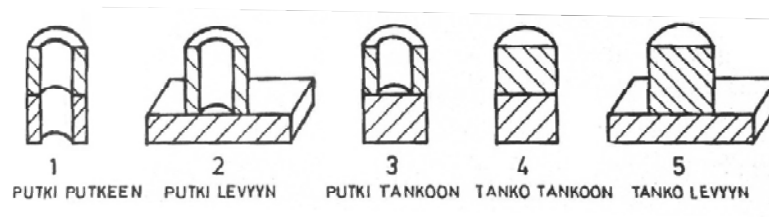
Epäpuhtaudet, kuten fosfori, rikki ja typpi, lisäävät lohkomurtumataipumusta. Tästä johtuen niiden pitoisuudet tulisivat olla alhaiset. Voimakkaasti anisotrooppiset materiaalit eivät sovellu kitkahitsaukseen, sillä niiden materiaaliominaisuudet vaihtelevat eri kidesuunnissa. Tämä vaikeuttaa plastisoitumista, mikä on tärkeää kitkahitsauksessa. /5/

4.3 Fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet

Lämmöntuontinopeus ja -aika määräytyvät materiaalin lämmönjohtavuudesta: mitä suurempi lämmönjohtavuus, sitä nopeampi kuumennus ja jarrutus. Jatkuvasyöttöisellä menetelmällä ei ole mahdollista kitkahitsata erittäin suuren lämmönjohtavuuden materiaaleja. Inertiamenetelmällä lämpö tuodaan nopeammin ja näin ollen sillä onnistuu kitkahitsaus myös ko. materiaaleilla. Puristusaine määräytyy materiaalin lujuusominaisuuksista korkeissa lämpötiloissa. Valmistusprosessia voidaan nopeuttaa, jos materiaali kestää suuria pintapaineita. /5/

4.4 Valmistustekninen kitkahitsattavuus

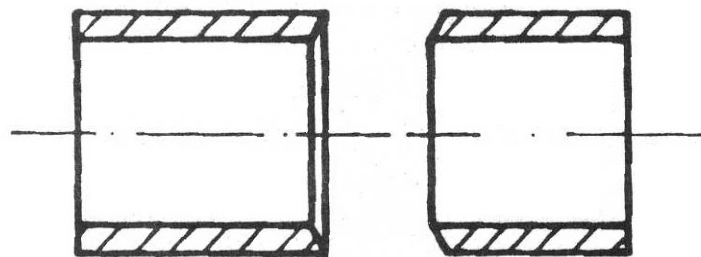
Prosessin luonteen mukaan toisen hitsattavan komponentin tulee olla pyörähdyssymmetrinen, sillä purse muodostuu tällöin säännöllisesti eikä kappaleessa ole kulmia, joissa hitsautuminen voi olla puutteellista. Kitkahitsauksen perusliitostyypit ovat putki putkeen, putki levyyn, putki tankoon, tanko tankoon sekä tanko levyyn (kuva 8). /5/



Kuva 8. Kitkahitsauksen perusliitostyypit. /18/

Kappaleet on suunniteltava niin, että ne kestävät siihen kohdistuvat voimat taipumatta ja nurjahtamatta. Ohutseinämäiset putket ovat kriittisimpiä kitkahitsaukselle juuri tästä syystä. Kappaleita suunniteltaessa tulee pyrkiä käyttämään materiaaleja oikein. Kuormituksen alaiset osat valmistetaan siihen soveltuvasta materiaalista ja muut osat halvemmasta materiaalista, jotka täyttävät sille asetetut vaatimukset. Tämä on tunnusomaista juuri kitkahitsaukselle: pyritään yhdistämään erilaisten metallien ja erisuuruisten komponenttien väliltä vaatimukset täyttävää kokonaisuutta, jolloin materiaalikustannuksia saadaan alennettua. /17/

Mitä parempi valmistustarkkuus osakomponenteilla on, sitä vähemmän tarvitaan jälkikoneistusta. Kitkavaiheen alussa voi tapahtua osien vääntymistä, jota voidaan estää muotoilemalla osat niin, että ne keskittävät itse itsensä. Tällöin kartiokulman tulee olla suurempi kuin 140° (kuva 9). Ohjaava kartiokulma pienentää myös vääntömomenttia hitsauksen alussa putkilla ja vähentää hitsausprosessiin kuluva aikaa. Ongelmaksi voi muodostua epäsymmetrinen purseen muodostuminen. /17/



Kuva 9. Ohjaava kartiopinta /17/

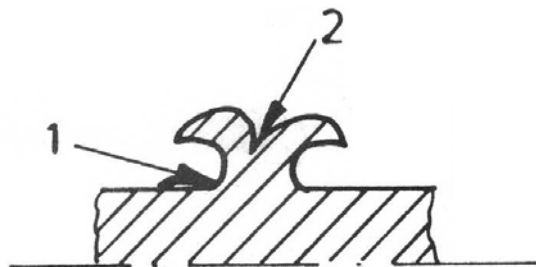
4.4.1 Liitospinnan laatu

Liitospinnan laadulla, kuten pinnankarheudella, tasaisuudella ja puhtaudella, ei ole suurta merkitystä kitkahitsauksen onnistumiseen, sillä alkuperäinen kitkapinta plastisoituu ja puristuu ulkopuoliseen purseeseen. Irrallinen kuona ja paksu ruostekerros tulee poistaa ennen hitsausta. Myös orgaaniset ja epäorgaaniset yhdisteet, kuten öljy, rasva ja lika, tulee poistaa ennen hitsausta, sillä ne heikentävät kitkaolosuhteita. Terästen kitkahitsauksessa pinta voidaan valmistaa esimerkiksi sahaamalla, joka tuottaa riittävän pinnanlaadun. Mitä vaikeammin materiaalia on kitkahitsata, sen sileämpi ja kohtisuorempi pinta on oltava. On

kuitenkin huomioitava, että kun halutaan käyttää mahdollisimman hyvin kitkahitsauslaitteen moottorin antaman tehon, on liitospintoihin kiinnitettävä huomiota, sillä kitkaolosuhteisiin ja lämmöntuontiin vaikuttavat pintojen puhtaus, pinnankarheus, kohtisuoruus sekä sama-akselisuus. /5; 17/

4.4.2 Purse

Hitsipinnan molemmin puolin muodostuva purserengas on tunnusomaista kitkahitsaukselle. Konstruktiota suunniteltaessa tulee ottaa huomioon purseen muodostuminen. Sille on varattava riittävästi tilaa, eikä sen muodostumista saa estää voimakkaasti. Jos on mahdollista, kannattaa purse jättää koneistamatta. Tällöin jää yksi koneistusvaihe pois ja tuotteesta tulee halvempi valmistaa. On kuitenkin muistettava koneenosan toiminnalliset, esteettiset ja lujuudelliset ominaisuudet, jolloin purseen poisto voi olla pakollista. Mikäli sisäpuolinen purseen poisto on mahdotonta, on kappale muotoiltava niin, ettei siitä ole haittaa. Dynaamisen kuorman kestävyys heikkenee purseen myötä. Purse voi edesauttaa korroosiokolojen syntyä. Kuvassa 10 on esitetty lovenvaikutusluvun kriittisimmät pisteet purseessa. /5/



Kuva 10. Hitsauspurseen kriittisimmät pisteet lovenvaikutusluvun kannalta. /19/

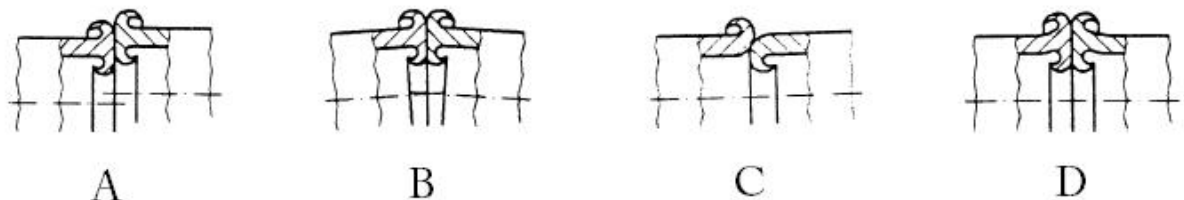
Purse voidaan poistaa hiomalla, sorvaamalla ja kitkahitsauskoneen omalla purseenpoistolaitteella. Heti hitsauksen jälkeen suoritettu purseenpoisto koneen omalla laitteella sorvausmenetelmällä vähentää leikkuuterään kohdistuvaa räsitusta, ja näin leikkuuterän kestoikä nousee, sillä purse on vielä kuumaa. Leikkuuterän kestoikä on n. 7...10 -kertainen hiiliterästä työstettäessä kuumana verrattuna purseen poistoon kylmänä. /17/

Kitkahitsauslaitetta on taloudellisinta kuormittaa täydellä kapasiteetilla, sillä sen hankintahinta on korkea. Tässä tapauksessa purseenpoisto kannattaa tehdä erillisellä koneella esimerkiksi sorvilla. Valmistettavan sarjan suuruus sekä kappale itsestään vaikuttavat valittavaan purseenpoistomenetelmään. /5/

4.5 Hitsausvirheet ohuiden putkien kitkahitsauksessa

Kitkahitsaus asettaa laadullisesti erilaisia ongelmia kuin muut hitsausprosessit. Etenkin ohuet putket ovat kriittisiä tietyille hitsausvirheille. Aksiaalinen kohdistusvirhe (kuva 11A) voi johtua osakomponenttien geometrisestä epätarkkuudesta, kiinnittimistä sekä liian pitkstä istukan ja kappaleen etäisyydestä. Ongelmaa voidaan parantaa säätämällä kiinnikkeitä, tarkastamalla kappaleiden geometria, vähentämällä istukan ja työkappaleen väliä sekä parantamalla työkappaleiden valmistustarkkuutta. Liian lyhyt kiinnitinväli, löysät kiinnittimet ja liian suuri aksiaalinen puristusvoima voivat johtaa poikkeamaan sama-akselisuudessa (kuva 11B). Tällöin on syytä kiristää kiinnitystä, lisätä kiinnitinväliä tai vähentää puristusvoimaa. /1/

Sivusuuntainen poikkeavuus (kuva 11C) selittyy yleensä väärillä hitsausparametreilla ja osakomponenttien geometrialla. Liitettävien osien valmistustarkkuutta parantamalla ja oikeiden hitsausparametrien käytöllä voidaan vähentää sivusuuntaista poikkeamaa. Muodonmuutokset, kuten puristuminen (kuva 11D), johtuvat riittämättömästä tuennasta, liian suuresta aksiaalisesta voimasta. Muodonmuutosten välttämiseksi kiinnityksen tulee olla tukeva ja hitsausparametrit oikeat. /1/



Kuva 11. Yleisimmät kitkahitsauksesta johtuvat virheet ohuilla putkilla. /1/

4.6 Kitkahitsauksen laadunvarmistus

Kitkahitsatun tuotteen laadunvarmistuksessa voidaan käyttää standardin SFS-EN ISO 15620 ohjetta. Tuotteet asetetaan kolmeen eri kategoriaan niiden hitsin hajoamisen perusteella. Kategoriassa A hitsin hajoaminen on vaaraksi tuotteelle ja ympäristölle, kategoriassa B hitsin hajoaminen aiheuttaa huomattavaa vahinkoa ja kategoriassa C hitsin hajoaminen aiheuttaa vain vähän tuhoa. Taulukossa 2 on esitetty kuinka laajasti laadunvarmistusta tulisi suorittaa kussakin kategoriassa. Silmämääräisellä tarkastuksella tarkoitetaan muun muassa purseen tarkastamista hitsin laadun varmistamiseksi. /1/

Taulukko 2. Kitkahitsauksen laadunvarmistuksen laajuus. /1/

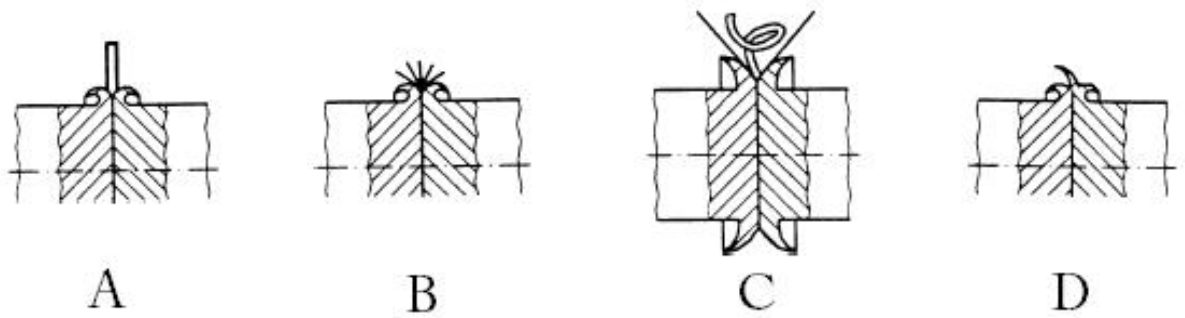
Kategoria	Visuaalinen tarkastus	Pituuden mittaus	Parametrien monitorointi a)	Parametrien tallennus	Rikkovat aineen-koetukset	NDT
A	100 %	100 %	-	100 %	b)	c)
	-	-	100 %			
B	100 %	10 %	-	määriteltävä	b)	c)
	-	-	50 %			
C	50 %	5 %	-	ainakin kerta 6 kk	b)	c)
	-	-	20 %			

a) Ainakin kitkapaineen, tyssäyspaineen, pituuden väheneminen kitkavaiheessa, pituuden lyheneminen koko prosessissa ja kokonaisuuna.

b) Riippuen kategoriasta.

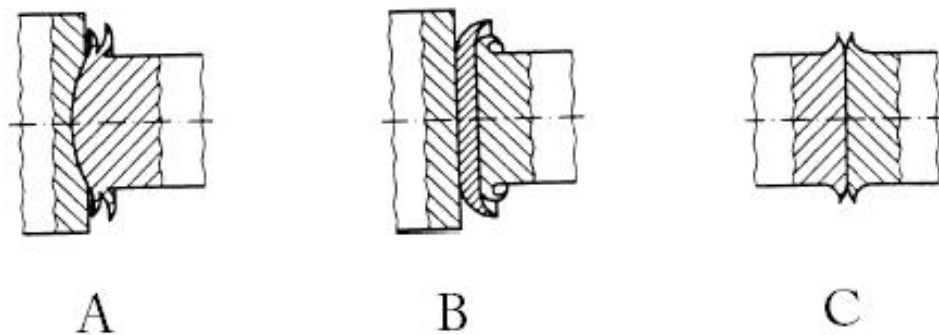
c) NDT-testit riippuvat tulevasta käytöstä ja koneistuksesta.

Purseesta voidaan havaita hitsausvirheitä silmämääräisessä tarkastuksessa. Haitallista jäystettä voi esiintyä hitsauspurseessa. Sitä voi olla pystysuunnassa purseen keskellä (kuva 12A) tai spiraalimaisesti muodostuneena (kuva 12 C). Myös materiaalin pursuaminen niin, ettei purseessa ole keskikohtaa, luokitellaan virheeksi. (kuva 12B). Määrävälein esiintyvät jäysteet (kuva 12D) luokitellaan myös hitsausvirheeksi. /1/



Kuva 12. Jäysteen muodostamat hitsausvirheet purseessa. /1/

Hyvin erilaiset materiaalit voivat aiheuttaa ylimääräisen purseen, joka muodostuu epäsymmetrisesti (kuva 13A). Ylimääräiseksi purseeksi luokitellaan myös liitospintojen väliin muodostuvaa purseeta (kuva 13B). Purseesta voidaan havaita myös liian vähäinen hitsautuminen (kuva 13C). Liitoksen tulee olla hitsautunut koko kappaleen halkaisijan matkalta. /1/



Kuva 13. Ylimääräinen purse ja liian vähäinen liittyminen. /1/

5 TUTKIMUSJÄRJESTELYT

Kitkahitsattavuutta tutkittiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsauslaboratoriossa. Tarkoituksena oli selvittää, voidaanko kairausputken valmistukseen käyttää kitkahitsausta ja voidaanko käyttää halvempaa terästä jatkavana putkena. Tällä hetkellä kohdeyritys ei pysty valmistamaan kairausputkia, johtuen lämpökäsittelyiden haasteellisuudesta 3000 mm ja siitä pidemmille putkille. Kokeissa ei tutkittu alumiinisten kairausputkien, eikä iskutankojen soveltuvuutta kitkahitsaukseen, vaan haluttiin selvittää mahdollistaako kitkahitsaus kohdeyritykselle uuden tuotteen.

Hitsauskokeiden lisäksi pyydettiin laitevalmistajilta alustavia tarjouksia, jotta tiedettäisiin laitteen hankintahinta. Kitkahitsauslaitteita valmistavia yrityksiä on harvassa ja vain kolme laitevalmistajaa lähetti alustavan tarjouksen.

5.1 Kairausputket ja iskutangot

Maa- ja kalliokairauksen tutkimuskalustoon kuuluu terä, kalvain, näytteenottokoneisto sekä kairaus-, maa- ja suojaputket. Maaputkilla läpäistään maakerros peruskallioon asti. Tämän jälkeen terä, kalvain, näytteenottokoneisto - yhdistelmällä kairataan peruskalliota. Koska näytteenottokoneistoon mahtuu kerralla vain 0,5-3 metriä, joudutaan se tyhjentämään välillä. Kun näytteenottokoneisto on tyhjennetty, lisätään työkaluyhdistelmään kairausputki (kuva 14), jonka tehtävänä on jatkaa työkaluyhdistelmää halutun mitan verran. /20/



Kuva 14. Kairausputki.

Alumiinisia kairausputkia käytetään vanhanaikaiseen kairaukseen, jossa näytteenottokoneisto joudutaan nostamaan maanpinnalle sen täytyttyä. Nykyaikaisempi ja enemmän käytetty kairausmenetelmä on wireline -kairaus, jossa näyte nostetaan maanpinnalle putken sisältä vaijerin avulla. Tällöin ei tarvitse nostaa koko putkistoa joka kerta, vaan putkisto saa olla reiässä koko ajan. Wireline -kairauksessa käytetään teräksisiä kairausputkia. /20/

Yleisimpiä ongelmia kairausputkilla ovat olleet:

- kierteiden olkapäiden pettäminen, jolloin kiertet jumittuvat sisäkkäin
- putken puristuminen kasaan
- kierteiden kuluminen
- putken halkeaminen kierteen juuresta.

/20; 21/

Kuten ongelmista havaitaan, johtuvat kairausputkien viat yleensä kiertelistä. Kierteen olkapäiden pettäminen ja putken halkeaminen johtuvat yleensä liian kovasta materiaalista.

Nopeampi tapa läpäistä maapeite on iskuporauksen käyttäminen. Iskuporauksessa käytetään iskua maapeitteen läpäisemisen tehostamiseksi. Iskuporaukseen kuuluu terä, näyteputki ja iskutangot. Iskutangojen ongelmina on ollut:

- liittimen katkeaminen
- liittimen kierteiden kuluminen, jolloin kiertet jumittuvat sisäkkäin.

/20/

Tällä hetkellä iskutangot valmistetaan sorvaamalla putkeen ja liitinkappaleisiin kierteet, jotka liimataan ja kierretään paikoilleen. Liitinpäihin sorvataan myös koiras- tai naaraskierteet, jotta iskutangot voidaan liittää iskuporauksessa keskenään. Iskutankoja valmistetaan 100 -200 kappaletta vuosittain.

5.2 Kitkahitsauslaitteisto

Hitsauskokeet tehtiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsauslaboratorion englantilaisella Blacks Equipmentin valmistamalla FWH-12 kitkahitsauslaitteella (kuva 15). Se on jatkuvasyöttöinen ja sen karaa on mahdollista pyörittää kolmella eri pyörimisnopeudella. FWH-12 kitkahitsauslaitteistossa on hydraulinen painesylinteri, jolla aksiaalinen kitkavoima sekä tyssäysvoima tuotetaan. Sillä voidaan hitsata umpinaista tankoa aina 32 mm:iin asti, jonka jälkeen koneen puristusvoima loppuu. Koneessa ei ole purseenpoistolaitetta, eikä se sovellu pitkien kappaleiden hitsaamiseen.



Kuva 15. Blacks Equipment FWH-12 kitkahitsauslaitteisto. /22/

Blacks Equipment FWH-12 kitkahitsauslaitteen ominaisuudet ovat:

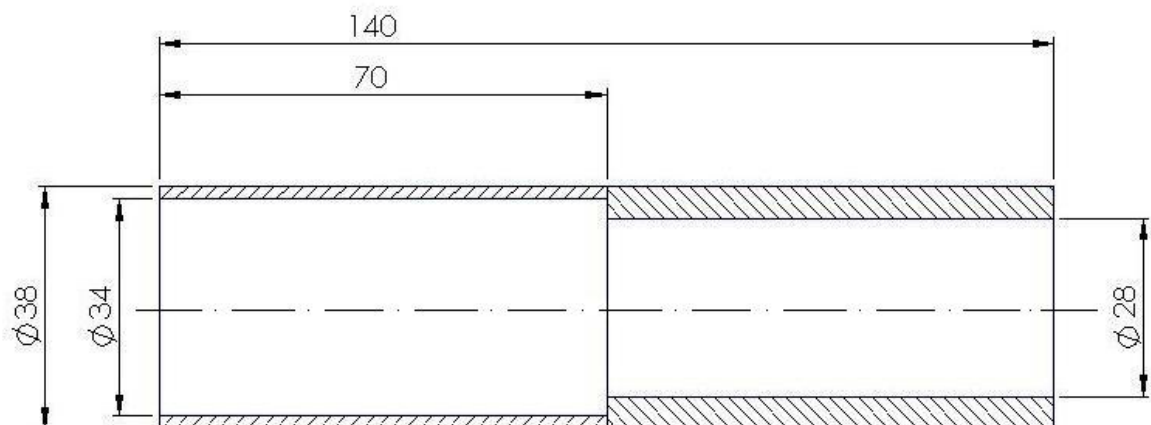
- 15 kW sähkömoottori kierrosluvulla 1440 r/min
- Voimansiirto hammashihnavälityksellä ja hihnapyörillä
- Karan pyörimisnopeudet: 720, 920 ja 1440 r/min
- Hydraulinen painesyylinteri, jonka poikkipinta-ala 81,64 cm²
- Maksimipuristusvoima 112 kN
- Maksimikitkapaine 3,43 N/ mm²
- Suurin hitsattavan tangon halkaisija 32 mm.

5.3 Hitsauskokeet

Hitsauskokeet suoritettiin käyttämällä jatkavana putkena rakenneputkea St52 ja liittimenä erikoisterästä. Taulukosta 3 selviää hitsauskokeissa käytetyn St52 - teräksen koostumus. Kuvassa 16 on esitetty hitsauskokeissa käytettyjen putkien mitat.

Taulukko 3. St 52 -teräksen kemiallinen koostumus. /21/

Teräs	C _E	C %	Si %	Mn %	P %	S %
St 52	0,475	≤ 0,20	0,15-0,30	≤ 1,60	≤ 0,035	0,020-0,035



Kuva 16. Hitsauskokeissa käytetyt komponentit. Vasemmalla St52-teräs ja oikealla erikoisteräs.

Hitsauskokeissa käytettyjen paksumpien putkien liitospinat olivat koneistettu. Ohuemmat putket olivat sahattu oikeaan mittaansa. Hitsauskokeet aloitettiin valmistamalla oikean mittainen ja mallinen kiinnitin koekappaleille. Kiinnitin (kuva 17) on ensin sorvattu umpitangosta oikean kokoiseksi, jonka jälkeen se halkaistiin. Hitsauskokeet suoritettiin siten, että liitinkomponentti asetettiin pakkaan ja jatkava putki kiinnittimen varaan. Tällä haluttiin varmistaa, että koehitsaukset suoritettiin mahdollisimman paljon tuotantoa vastaavissa olosuhteissa.

Jatkavan putken koekappaleissa oli heittoa sekä ympyrämäisyydessä että halkaisijassa. Tämän takia kiinnitin valmistettiin mittatoleranssialueen keskelle. Tällä pyrittiin varmistamaan, että kaikki koekappaleet mahtuvat kiinnittimeen.



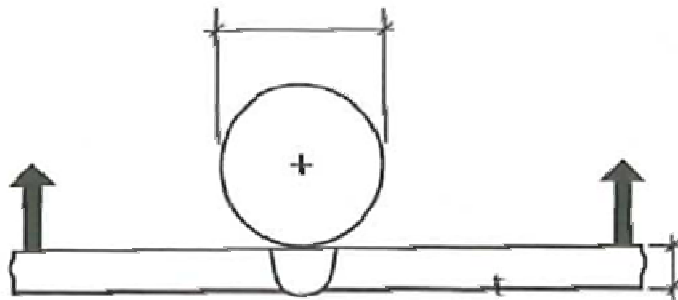
Kuva 17. Valmistetun kiinnittimen toinen puolikas.

Alustavien hitsauskokeiden jälkeen suoritettiin yhdelle testikappaleelle kovuusmittaus, taivutuskoe sekä makrohietutkimus. Hitsausparametreja muutettiin testitulosten perusteella, jotta saataisiin optimiparametrit ennen varsinaisia rikkovia aineenkoetuskokeita varten. Liitteessä 1 on lueteltu kaikki hitsauskokeissa käytetyt parametrit. Jarrutus- ja tauko-aika sekä pyörimisnopeus pidettiin hitsauskokeissa vakioina. Muutettavia hitsausparametreja olivat kitka-aika ja -paine sekä tyssäsaika ja -paine.

5.4 Taivutuskokeet

Taivutuskokeet suoritettiin kolmipistetaivutuksella (kuva 18). Taivutuskokeessa koesauvaa, joka on kahden tuen varassa, painetaan ylhäältä taivutintelalla. Taivutuksen aikana paikallistetaan silmämääräisesti virheitä vedon puolelta. Tarkoituksena on hitsin ja muutosvyöhykkeen muovattavuuden arviointi.

Taivutuskoetta varten hitsattiin viiden kappaleen koesarja. Taivutuskoesauvat valmistettiin siten, että ensin koneistettiin ulkopuolinen purse pois sorvaamalla. Jotta taivutintela ei olisi liukunut testauksen aikana ohuemman putken puolelle, koneistettiin paksumpi putki U-porauksella sisäpuolelta samankokoiseksi kuin ohuempi putki. Näiden jälkeen testikappaleista sahattiin oikeanmittaiset koesauvat. Jokaisesta hitsatusta kappaleesta valmistettiin yksi pinta- ja yksi juuritaivutuskoesauva.



Kuva 18. Taivutuskokeen periaate.

Taivutuskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 4. Vaikka paksumpi putki koneistettiin samankokoiseksi kuin ohuempi putki, liikkui taivutuskoesauva testauksen aikana siten, että taivutintela painoi lopussa vain St52-terästä. Ainoastaan yksi koekappale saatiin taivutettua ilman edellä mainittua ongelmaa. Koesauvan liukuminen johtuu materiaalien lujuuksien suuresta erosta. Taivutuksen voima kohdistui hitsiin noin 30 asteen verran, jonka jälkeen lujuudeltaan heikompia terästä alkoi myötämään niin paljon, että taivutintelan voima kohdistui vain siihen. Taivutintelan halkaisijana on käytetty 10 mm.

Taulukko 4. Taivutuskokeiden tulokset.

Koesauva	Taivutuskulma [°]	Murtumiskohta
5 (pinta)	132	Ei murtunut
5 (juuri)	27	Hitsin reuna
6 (pinta)	126	Ei murtunut
6 (juuri)	144	Ei murtunut
7 (pinta)	143	Ei murtunut
7 (juuri)	140	Ei murtunut
9 (pinta)	139	Ei murtunut
9 (juuri)	137	Ei murtunut
10 (pinta)	141	Ei murtunut
10 (juuri)	142	Ei murtunut

5.5 Vetokokeet

Vetokokeita varten hitsattiin viiden kappaleen koesarja eri hitsausparametreilla. Vetokokeilla haluttiin selvittää mistä kohtaa koekappaleet murtuvat, eli kestääkö hitsi enemmän vetoa kuin lujuudeltaan heikompi perusaine.

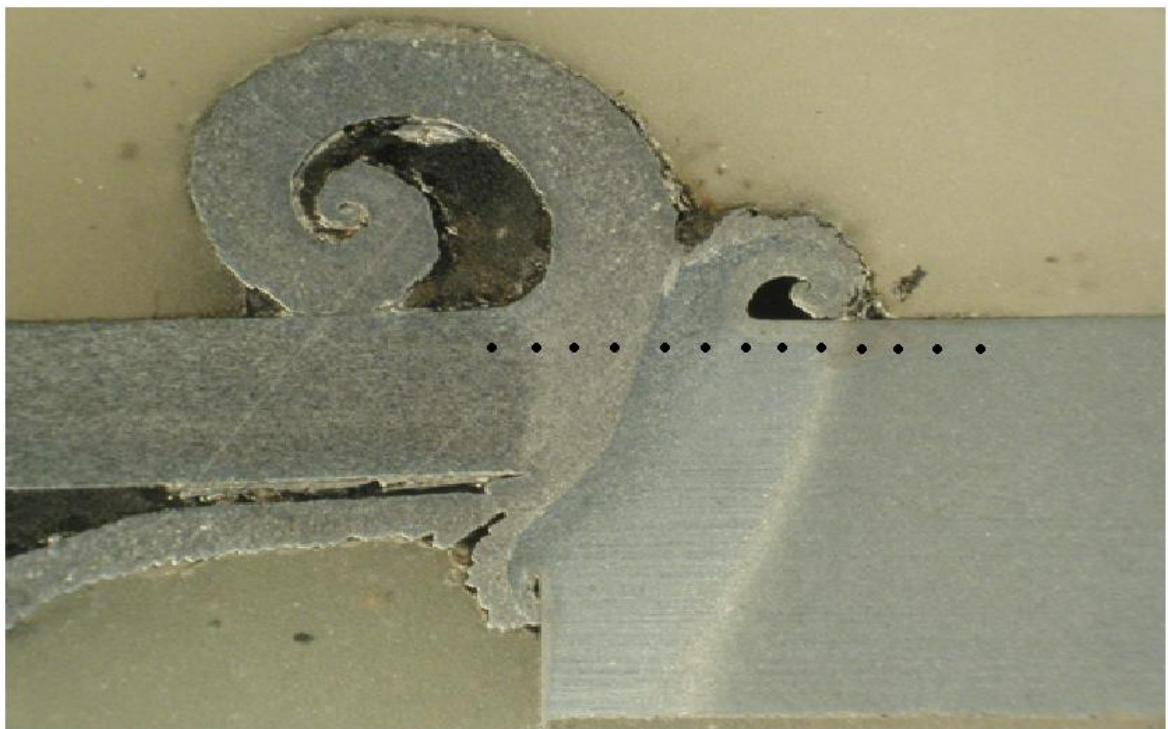
Koekappale asetettiin kiilaleuoin vetokoneeseen, jonka jälkeen sitä kuormitettiin pituusakselin suuntaisesti. Kuormitusta jatkettiin koekappaleen katkeamiseen asti, jonka jälkeen tietokoneelta saatiin vetomurtolujuus. Taulukossa 5 on lueteltu vetomurtokokeiden tulokset. Tuloksista havaitaan, että jokainen vetokoesauva murtui vetomurtolujuudeltaan heikomman perusaineen kohdalta. Tällöin hitsi on vetomurtolujuudeltaan suurempi kuin heikompi perusaine.

Taulukko 5. Vetomurtokokeen tulokset.

Koesauva	Kestetty kuormitus	
	[kN]	Murtumakohta
11	89,0	Perusaine St52
12	87,9	Perusaine St52
13	86,9	Perusaine St52
14	88,6	Perusaine St52
15	87,1	Perusaine St52

5.6 Makrohietutkimus

Makrohietutkimuksella pyrittiin selvittämään, miten hitsaus on vaikuttanut perusaineisiin ja onko hitsissä sulkeumia, halkeamia tai muita ongelmia. Toinen selvittävä asia oli purseenmuodostus. Kuten kuvasta 19 havaitaan, on St 52 - teräksellä huomattavasti voimakkaampi purseenmuodostus. Kuvasta voidaan havaita myös paksun putken mikrorakenteen muuttuminen putken ulkoreunassa, muutosvyöhykkeeltä perusaineeseen asti.



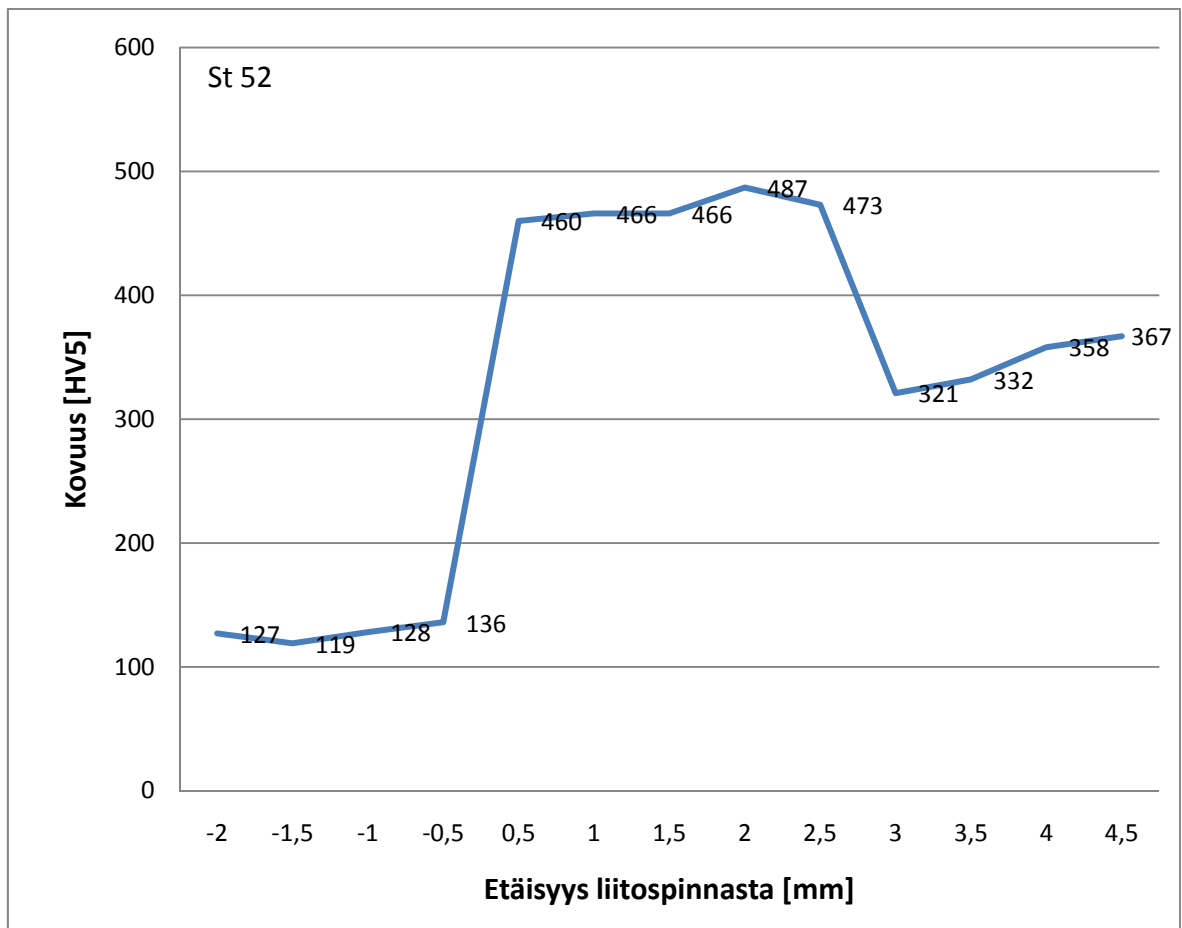
Kuva 19. Makrokuva purseellisesta liitoksesta. Kuvassa näkyy kovuusmittausten sijainnit, joiden tulokset ovat esitetty kuvassa 18.

Kuvasta havaitaan selkeästi myös komponenttien kohdistusvirhe sekä heittoa sama-akselisuudessa. Nämä ovat hyvin tyypillisiä etenkin ohuilla putkilla. Koekappaleiden hitsauksessa ne selittyvät osakomponenttien epätarkkuuksista, kiinnittimen väljyydestä sekä testeissä käytetyn kitkahitsauskoneen välyksistä.

5.7 Kovuusmittaukset

Kovuusmittaukset suoritettiin tekemällä yhdestä testikappaleesta mikrohie. Mikrohieestä mitattiin kovuusprofiili hitsausliitoksen yli. Kovuusmittauksessa käytettiin Vickers- kovuusmittausmenetelmää, jossa tietyllä massalla painetaan pyramidinmuotoinen timanttikärki kappaleen pintaan. Painauksen halkaisijat mitataan mikroskoopilla ja näistä voidaan määrittää kappaleen kovuus.

Mittauksissa käytettiin 5 kg:n painoa ja 30 sekunnin vaikutusaikaa. Kuvassa 20 on testatun kappaleen kovuusmittausprofiili. Kovuudet mitattiin 0,5 mm:n välein siten, että reunimmaisat mittaukset ovat suoritettu perusaineesta. Kovuushuippu 487 HV5 mitattiin muutosvyöhykkeeltä 2 mm:n päästä hitsausliitoksesta.



Kuva 20. Hitsausliitoksen kovuusprofiili. 4 ensimmäistä kovuuksia on St52-teräksestä mitattu, 5 seuraavaa muutosvyöhykkeeltä ja loput erikoisteräksestä.

5.8 Muut mittaukset

Ennen koehitsauksia mitattiin jokaisen komponentin pituus. Hitsausten jälkeen mitattiin putken kokonaispituus. Näin saatiin laskettua kuinka paljon pituus vähenee kitkahitsauksen aikana. Pituuden väheneminen vaikuttaa lopulliseen tuotteeseen siten, että se tulee ottaa huomioon jo osakomponenttien valmistuksessa.

Taulukossa 6 on esitetty kaikkien koehitsattujen kappaleiden pituuden lyhentymiset. Kitka-ajalla ja -paineella on suurin merkitys aksiaaliseen lyhenemiseen. Ensimmäinen koekappale hitsattiin liian suurilla arvoilla. Hitsaus jouduttiin keskeyttämään hätäkatkaisijasta, jotta törmäys kiinnityspakkaan vältettiin.

Taulukko 6. Pituuden lyheneminen koekappaleissa.

Koekappale	Pituuden lyheneminen [mm]
1	20
2	17
3	15
4	12
5	11
6	12
7	11
8	19
9	10
10	13
11	11
12	11
13	12
14	11
15	12

Silmämääräisessä tarkastuksessa havaittiin heittoa yhdensuuntaisuudessa. Lisäksi osalla koekappaleista pystyi havaitsemaan kohdistusvirheestä johtuvan virheen sama-akselisuudessa.

5.9 Kitkahitsauslaitteiston hankintahinta

Laittevalmistajille lähetettiin alustavat tarjouspyynnöt kitkahitsauslaitteista, kun oli arvioitu tuotantomäärät sekä kitkahitsattavien tuotteiden koot. Kaksi laittevalmistajaa suositteli käytettäväksi jatkuvasyöttöistä menetelmää, yksi inertiamenetelmää. Kaikki kolme laitteistoa on manuaalisesti panostettavia ja kokoluokaltaan lähes samankokoisia. Kaikkiin laitteistoihin kuuluu PC-pohjainen ohjausjärjestelmä. Taulukossa 7 on eri laittevalmistajien tarjoamien laitteistojen hinnat. Koska osa laittevalmistajista on antanut hinnat Yhdysvaltain dollareissa, on ne muunnettu euroiksi käyttämällä kurssia 0.733868. Kalleimmassa laitteessa on purseenpoistolaite ulkopuoliseen purseenpoistoon.

Laitteiston hintaan kuuluu yleensä vain yksi kiinnitinkoko. Tämä aiheuttaa lisäkustannuksia hankintaan, sillä kiinnittimen hinnaksi on arvioitu noin 1 000 -1 500 €. Jos yritys pystyy valmistamaan itse tarvittavat kiinnittimet, alentaa se hankintakustannuksia. Kiinnittimen valmistuksessa tulee kuitenkin huomioida sen tärkeys itse kitkahitsausprosessiin: moni hitsausvirhe johtuu kiinnittimien epätarkkuuksista ja hitsattavien kappaleiden huonosta kiinnityksestä.

Taulukko 7. Kitkahitsauslaitteistojen hankintahinnat.

Laittevalmistaja	Hankintahinta [€]
ETA Technology	275 000
Inertia Friction Welding (IFW)	407 000
Manufacturing Technology Inc. (MTI)	550 000

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kairausputkien kitkahitsattavuutta tutkittiin laajalla osa-alueella. Tutkimusten pääpaino oli perusmateriaalien kitkahitsattavuudessa, mutta myös valmistusteknillisiä asioita tutkittiin. Itse hitsauskokeissa ei esiintynyt suuria ongelmia. Jatkavan putken kiinnitys osoittautui pieneksi ongelmaksi: osa koekappaleista pääsi pyörimään hitsauksen kitkavaiheessa. Pyöriminen oli kuitenkin vähäistä, eikä se vaikuttanut hitsien lujuudellisiin ominaisuuksiin. Pyöriminen johtui jatkavana putkena käytettyjen komponenttien mittatoleranssin vaihtelusta. Kitkahitsattavien komponenttien kiinnitys on yksi tärkeimpiä laatuun vaikuttavia tekijöitä etenkin hitsattaessa ohuita putkia.

Toinen lopullisen tuotteen laatuun vaikuttava tekijä on hitsattavien komponenttien valmistustarkkuus. Kuten hitsauskokeista huomattiin, aiheutti valmistusepä-tarkkuus ongelmia lopulliseen tuotteeseen. Komponentin valmistusepä-tarkkuus voi johtaa löysään kiinnitykseen, jolloin lopullisessa tuotteessa voi esiintyä kohdistusvirheitä sekä heittoa sama-akselisuudessa. Kyseiset virheet ovat hyvin kriittisiä etenkin kairausputkissa, joten virheet johtavat yleensä tuotteen hylkäämiseen.

Ohuet putket ovat muutenkin ongelmallisia hitsausvirheille kitkahitsatessa. Jos jatkavan putken pituus on 3000 mm ja seinämävahvuus 2 mm, voi esiintyä puristumista ja taipumista putkessa. Onkin järkevää yrittää etsiä tuotteelle sopiva seinämävahvuus tai vastaavasti lujempi teräs.

Taivutuskokeiden tuloksista ei voi päätellä hitsausliitoksen muovattavuutta. Taivutuskokeiden suurin ja tuloksia vääristävä ongelma oli se, että toinen perusaine oli lujuudeltaan huomattavasti suurempaa kuin toinen perusaine. Tämä johti pienempilujuuksisen teräksen myötämiseen, jolloin taivutuskoesauva pääsi liukumaan taivutintelan alta. Ainoa onnistunut taivutus mursi koesauvan 27 °:n jälkeen.

Kuten kovuusmittauksista voidaan havaita, on suurin kovuus muutosvyöhykkeellä. Hitsausliitoksen suurin kovuus on yli 100 HV5 suurempi kuin perusaineen. Tämä voi johtaa kairatessa hitsin murtumiseen tai vastaavasti liittimessä olevien kierteiden katkeamiseen.

Tuotteen toimivuuden kannalta olisi parasta tehdä jälkilämpökäsittely hitsauksen jälkeen tai vastaavasti hidastettu jäähdytys. Koska tarkoitus on selvittää voiko kairausputkia valmistaa siten, että kitkahitsaus olisi viimeinen työvaihe, ei jälkilämpökäsittely ole mahdollista. Koska kitkahitsaus vaikuttaa materiaalin kovuuteen, olisi mahdollista siirtää hitsausliitosta siten, ettei se vaikuta tuotteen toiminnan kannalta kriittisiin kierteisiin. Hitsausliitoksen siirtäminen ei kuitenkaan poista muutosvyöhykkeen kovuudesta johtuvaa ongelmaa, mikä voi johtaa kairausputken halkeamiseen liitoksen kohdalta.

Vetokokeiden tulokset kertovat, että hitsi kestää paremmin vetoa kuin vetomurtolujuudeltaan heikompi perusaine. Hitsausparametrien muuttamisella ei ollut vaikutusta vetokokeiden tuloksiin: kaikki koesauvat murtuivat ohuemman putken kohdalta. Tuloksista voidaan päätellä, että hitsi on lujuudellisesti vaatimukset täyttävä, jos käytetään samoja perusmateriaaleja kuin hitsauskokeissa.

Kitkahitsaukselle tunnusomainen purse on helppo poistaa ulkopuolelta sorvaamalla tai kitkahitsauslaitteiston mukana tulevalla purseenpoistolaitteella. Sisäpuolinen purse muodostuu ongelmaksi, jos putken sisähalkaisija on niin pieni, ettei sorvaamalla pysty sitä tekemään.

St52-teräs muodosti hitsauskokeissa suuremman purseen. Tutkimuksissa havaittiin kuitenkin, että sisäpuolisen purseen voi jättää koneistamatta, jos on mahdollista käyttää samoja mittoja ja perusaineita lopullisessa tuotteessa. Sisäpuolinen purse ei muodostunut niin suureksi, että siitä olisi haittaa tuotteen toiminnalle.

Kitkahitsauksen käyttö kairausputkien valmistuksessa havaittiin mahdolliseksi, jos käytetään St52- ja kokeissa käytettyä erikoisterästä perusmateriaaleina ja on mahdollista tehdä jälkilämpökäsittely hitsauksen jälkeen. Kairausputki on mitoiltaan ja muodoiltaan soveltuva kitkahitsaukseen. Ongelmaksi voi muodostua ohuiden putkien käyttö, sillä ne ovat kriittisimpiä muoto- ja mittavirheille kitkahitsauksessa.

Laitteiston suuren koon vuoksi sen sijoittaminen nykyisiin tuotantotiloihin on haasteellista. Tuotantotilojen lay-outia tulisi muuttaa paljon, jotta laitteisto mahtuisi tiloihin.

Kitkahitsauslaitteiston investoinnin suuruuden vuoksi ei prosessia kannattaisi käyttää piensarjatuotannossa. Jokaiselle putkikoolle tulisi ostaa tai valmistaa sopiva kiinnitin, jolloin hankintahinta kohoaa entisestään. Jos kohdeyrityksen on mahdollista kasvattaa valmistettavien kairausputkien sarjakokoja sekä korvata iskutankojen nykyinen valmistus kitkahitsauksella, voi kitkahitsauslaitteiston investointi olla taloudellisesti kannattavaa. Iskutankojen valmistuksen korvaaminen kitkahitsauksella vähentäisi työvaiheita ja materiaalikustannuksia.

7 YHTEENVETO

Halu tuottaa uusia tuotteita sekä nykyisten tuotteiden valmistuksen tehostaminen on ajanut Terra-Team Oy:n miettimään vaihtoehtoisia valmistusprosesseja. Kasvaneet materiaalikustannukset ja kilpailu markkinoilla luo painetta tuotannon tehostamiseen. Tässä työssä tutkittiin soveltuuko kitkahitsaus kairausputkien valmistamiseen piensarjatuotannossa ja mahdollistaako se kohdeyritykselle uuden tuotteen.

Työ onkin rajattu juuri koskemaan piensarjatuotantoa ja kokeellinen osa vain kairausputkia. Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa suoritettiin kitkahitsauskokeet sekä ainetta rikkovat aineenkoetuskokeet. Hitsauskokeissa havaittiin, että hitsistä tulee vetomurtolujuudeltaan vaatimukset täyttävä, mutta kovuuden kasvu voi tuottaa ongelmia, ellei hitsauksen jälkeen ole mahdollista tehdä jälkilämpökäsittelyä.

Kiinnittimet ovat yksi tärkeimpiä hitsauslaatuun vaikuttavia tekijöitä. Jokaiselle putken halkaisijalle tulee olla oma kiinnitin ja se lisää laitteiston hankintahintaa. Kitkahitsauslaitetta tulisi kuormittaa täydellä teholla, jotta sen hyödyt tulevat esille. Oikein käytettynä kitkahitsauksella saadaan merkittäviäkin materiaali- ja työkustannussäästöjä, mutta silloin sarjakokojen tulisi olla suurempia ja koneen käyttöasteen korkea. Kohdeyrityksen arvioidulla valmistusmäärällä ei ole järkevää investoida kitkahitsauslaitteistoon.

LÄHTEET

/1/ SFS-EN ISO 15620. (2000). Hitsaus. Metallisten materiaalien kitkahitsaus. Suomen standardisoimisliitto SFS. 37 s.

/2/ Kearns, W. H. (1980). Welding Handbook vol 3. 7. Painos. American Welding Society. Miami, Florida. 459 s.

/3/ Fritz, J. & Staudinger, H. (1974). Gefügeuntersuchungen an Reibschweissverbindungen zwischen Vergütungs- und Schnellarbeitsstahl. Vergleich zwischen Abbrennstumpf und Reibschweissverfahren einschliesslich praktischer Untersuchungen. Praktische Metallographie. Volyymi n:o 11. s. 197-210.

/4/ Schaefer, R. (1967). Reibschweissen von Metallen - Maschinen und Anwendungsbeispiele. Industrie-Anzeiger, Schweiss- und Schneidtechnik. Volyymi n:o 10. s. 11-19.

/5/ Ruuskanen, I. (1982). Kitkahitsauksen soveltaminen tuotannossa. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. 190 s.

/6/ Bahrani, A. S. & Duffin, F. D. (1974). The mechanics of friction welding. Proceedings of the Third International Conference "Advances in Welding Processes", Harrogate, 7.-9.5.1974. The Welding Institute. s. 228-242.

/7/ Eichhorn, F. & Schaefer, R. (1969). Grundlegende Untersuchungen zum konventionellen Reibschweissen. Schweissen und Schneiden. Volyymi n:o 21. Lehti n:o 5. s. 189-198.

/8/ Ellis, C. R. G. & Nicholas, E. D. (1968). Friction welding of mild steel, effect of main operating variables on joint characteristics. Welding Institute Research Bulletin. Volyymi n:o 9. Lehti n:o 6. s. 182-188.

/9/ Institutet för verkstadstekniskt forskning. (1975). Friktions-svetsning - Teori och Praktik. IVF-Resultat 75602. Sveriges Mekanförbund. Tukholma. 42 s.

- /10/ Ruge, J. (1974). Handbuch der Schweisstechnik. Springer-Verlag. Berliini. s. 316-321.
- /11/ Leikas, J. & Harju, M. (1977). Kitkahitsaus, Osa 1. Menetelmät, laitteet. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 27 s.
- /12/ Foister, P. B. (1974). Heat Under Power (HUP) Friction Welding. Proceedings of the Third International Conference "Advances in Welding Processes". Harrogate. Lehti n:o 36. The Welding Institute. s. 234-248.
- /13/ Hasui, A., Fukushima, S., Kinugawa, J. (1969). Some Experiments with a New-Designed Friction Welding Machine. Special Welding Laboratory of National Research Institute for Metals. Bulletin of JSME 12 (51). s. 656-664.
- /14/ Izumi Machine MFG. [Izumi Machine MFG:n www-sivuilla]. Päivitetty 23.9.2009. [viitattu 17.2.2010]. Saatavissa <<http://www.izumi-mfg.co.jp/english/outline.html>>
- /15/ Friction Welding Technologies Pvd .Ltd. [FWT:n www-sivuilla]. Päivitetty 17.2.2010. [viitattu 17.2.2010]. Saatavissa <<http://www.frictionwelding.in/html/inner.aspx?id=14>>
- /16/ Ellis, C. R. G. (1975). Recent industrial developments in friction welding. Welding Journal. Volyymi n:o 54. Lehti n:o 8. s. 582-589.
- /17/ Leikas, J. (1976). Kitkahitsaus koneenosien valmistuksessa. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. 137 s.
- /18/ Kuruzar, D. L. (1979). Joint design for friction welding process. Welding Journal. Volyymi n:o 58. Lehti n:o 6. s. 31-35.
- /19/ Reshetov, A. L. & Klykov, N. A. (1978). The notch sensitivity of welded joints in mild interlayers. Automat. weld. Volyymi n:o 31. Lehti n:o 4. s. 26-29.
- /20/ Mäkinen Mika. Varikon esimies. Suomen Malmi Oy. 02920 Espoo. Haastattelu 15.3.2010
- /21/ Rajalin Jari. Varatoimitusjohtaja. Terra-Team Oy. 02920 Espoo. Haastattelu 15.3.2010

/22/ LUT Metalli. (2010). Hitsaustekniikan laboratorion arkisto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Liite 1. Hitsausparametrit

Koekappale	Kitka-aika [s]	Kitkapaine [bar]	Tauko aika [s]	Tyssäysaika [s]	Tyssäyspaine [bar]
1	5	25	1	6	50
2	4	15	1	6	30
3	2,5	18	1	6	30
4	1,5	18	1	6	30
5	1,5	20	1	6	40
6	1,5	22	1	6	45
7	1,5	22	1	6	40
8	1,5	25	1	6	45
9	1,5	20	1	6	45
10	2	20	1	6	45
11	1,5	20	1	6	40
12	1,5	20	1	6	45
13	1,5	22	1	6	40
14	1,5	22	1	6	45
15	1,5	18	1	6	30