



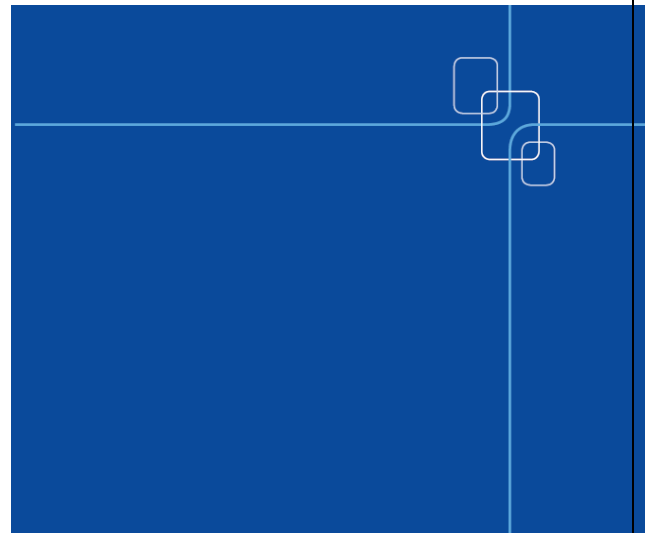
Functional  
materials



TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
*Institute of Materials Science*



Aalto-yliopisto  
Teknillinen korkeakoulu












## Valujen sula-lujiterajapintojen ymmärtäminen ja hallittujen FG-rakenteiden kehittäminen **Sulataju**

Kirjoittajat:

Juha Lagerbom, Pertti Lintunen, Tapio Ritvonen, Erja Turunen VTT  
Miia Kiviö, Petri Väyrynen, Lauri Niittynen, Hannu Heikkinen, Veijo  
Rauta, Celal Cingi, Eero Niini, Lauri Holappa, Seppo Louhenkilpi,  
Juhani Orkas TTK Ville Oksanen, Matti Niemi, Jyri Tiisanen, Kati  
Rissa, Kaisu Keskiäho, Erkki Itävuori, Tuomo Tiainen, Toivo Lepistö  
TTY

Luottamuksellisuus: julkinen

<b>Raportin nimi</b> Valujen sula-lujiterajapintojen ymmärtäminen ja hallittujen FG-rakenteiden kehittäminen (SULA-TAJU). Loppuraportti				
<b>Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot</b> Elematic Oy, Metso Minerals Oy, Metso Materials Technology; Metso Minerals Oy, Lokomo Steel Foundry, Metso Paper Valkeakoski Oy; Metso Power Oy; Peiron Oy, Sulzer Pumps Finland Oy ja Wärtsilä Finland Oy, Valutuoteteollisuusyhdistys Ry sekä TEKES.	<b>Asiakkaan viite</b>			
<b>Projektin nimi</b> Valujen sula-lujiterajapintojen ymmärtäminen ja hallittujen FG-rakenteiden kehittäminen. (SULA-TAJU).	<b>Projektin numero/lyhytnimi</b> 23770			
<b>Raportin laatija(t)</b> Juha Lagerbom, Pertti Lintunen, Tapio Ritvonen, Erja Turunen VTT Miia Kiviö, Petri Väyrynen, Lauri Niittynen, Hannu Heikkinen, Veijo Rauta, Celal Cingi, Eero Niini, Lauri Holappa, Seppo Louhenkilpi, Juhani Orkas TKK Ville Oksanen, Matti Niemi, Jyri Tiusanen, Kati Rissa, Kaisu Keskiäho, Erkki Itävuori, Tuomo Tiainen, Toivo Lepistö TTY	<b>Sivujen/liitesivujen lukumäärä</b> 25			
<b>Avainsanat</b> SHS, TiC, pinnoitteet, Valaminen, liitosvalu	<b>Raportin numero</b> VTT-R-08817-10			
<b>Tiivistelmä</b> Projektin tavoitteena on parantaa valettujen tuotteiden ominaisuuksia räätälöidyillä lujiteratkaisuilla liitosvalutekniikalla. Kokeissa on tutkittu sekä perinteistä liitosvalua että reaktiivista liitosvalua. Reaktiivisessa liitosvalussa keskityttiin titaanin ja hiilen välisen eksotermisen reaktion hyödyntämiseen titaanikarbidin lujitteen (TiC) aikaansaamiseksi. Kehitettäviä ominaisuuksia olivat mm. kulumiskestävyys, korroosionkestävyys ja jäykkyys. Projektin tutkimusyhteistyö rakentui seuraavista osa-alueista: lujitepartikkelien ja eri matriisimetallien välisen kostutuksen mittaamisesta sekä valitun titaani-hiili reaktion tuoman lisälämmön vaikutuksen mallinnukseen valutapahtumassa (TKK Metallurgia), perinteisen liitosvalutekniikan tutkimus (TKK Valutuotetekniikka), projektin koordinointi, lujitteiden suunnittelu ja valmistus sekä insertteinä että pastoina (VTT Uudet materiaalit), valukokeiden suunnittelu ja suoritus (TTY Materiaaliopin laitos, Valimoinstituutti), näytteiden karakterisointi ja testaus (TTY Materiaaliopin laitos, Materiaalikirjoitus). Perinteinen liitosvalu onnistui hyvin valettaessa suomugrafiittirautaa kuumennetun teräslaatan päälle, mikä tukee kirjallisuudessa mainittua tietoa, että päällevalettavan materiaalin sulamispiste pitäisi olla alhaisempi kuin alustamateriaalin sulamispiste onnistuneen liitoksen aikaansaamiseksi. Reaktiivisen liitosvalun osalta projektissa onnistuttiin tekemään parhaimmillaan tiiviitä pinnoitteita suhteellisen pienille alueille kohdistetusti. Pinnoitteen ja valun rajapinta oli synnyttyään aina tiivis, mutta pinnoitteen ulompiin kerroksiin jäi jonkin verran huokoisuutta. Kulutuskokeissa reaktiivisella lujituksella pinnoitettu valukappale kesti kulutusta selvästi paremmin kuin duplex teräsvalu. Haasteena on reaktiivisen lujituksen tapauksessa onnistuneen pinnoitteen toistettavuus, johtuen osittain reaktion kiivaasta luonteesta ja siihen liittyvästä kaasunmuodostuksesta sekä valutapahtuman muuttujien pienistäkin vaihteluista esim. kaadon aikana.				
<b>Luottamuksellisuus</b>	julkinen			
Tampere 7.12.2010 <table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <b>Laatija</b>              Juha Lagerbom            tutkija         </td> <td style="vertical-align: top; padding-left: 100px;"> <b>Tarkastaja</b>              Erja Turunen,            teknologia päällikkö         </td> <td style="vertical-align: top; padding-left: 100px;"> <b>Hyväksyjä</b>              Eva Häkkä-Rönholm            teknologiajohtaja         </td> </tr> </table>		<b>Laatija</b>  Juha Lagerbom tutkija	<b>Tarkastaja</b>  Erja Turunen, teknologia päällikkö	<b>Hyväksyjä</b>  Eva Häkkä-Rönholm teknologiajohtaja
<b>Laatija</b>  Juha Lagerbom tutkija	<b>Tarkastaja</b>  Erja Turunen, teknologia päällikkö	<b>Hyväksyjä</b>  Eva Häkkä-Rönholm teknologiajohtaja		

VTT:n yhteystiedot  
PL 1000 02440 VTT

Jakelu (asiakkaat ja VTT)

Elematic Oy, Metso Minerals Oy, Metso Materials Technology; Metso Minerals Oy, Lokomo Steel Foundry, Metso Paper Valkeakoski Oy; Metso Power Oy; Peiron Oy, Sulzer Pumps Finland Oy ja Wärtsilä Finland Oy, Valutuoteteollisuusyhdistys Ry sekä TEKES. Juha Lagerbom, Pertti Lintunen, Tapio Ritvonen, Erja Turunen VTT Miia Kiviö, Petri Väyrynen, Lauri Niittynen, Hannu Heikkinen, Veijo Rauta, Celal Cingi, Eero Niini, Lauri Holappa, Seppo Louhenkilpi, Juhani Orkas TKK Ville Oksanen, Matti Niemi, Jyri Tiusanen, Kati Rissa, Kaisu Keskiaho, Erkki Itävuori, Tuomo Tiainen, Toivo Lepistö TTY

*VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.*

## Alkusanat

Tämä on Sulataju projektin julkinen loppuraportti. Laaja tekninen loppuraportti löytyy projektin tulosaineisto-CD:ltä. Projekti on yhteisprojekti VTT:n, TKK kahden laitoksen ja TTY:n materiaaliopin laitoksen kahden laboratorion välillä. Projektin rahoittajina ja johtoryhmän jäseninä toimivat Elematic Oy, Metso Minerals Oy, Metso Materials Technology; Metso Minerals Oy, Lokomo Steel Foundry, Metso Paper Valkeakoski Oy; Metso Power Oy; Peiron Oy, Sulzer Pumps Finland Oy ja Wärtsilä Finland Oy, Valutuoteteollisuusyhdistys Ry sekä TEKES.

Projektin tavoitteena oli parantaa valettujen tuotteiden ominaisuuksia räätälöidyillä lujiteratkaisuilla liitosvalutekniikalla. Kokeissa on tutkittu sekä tavanomaista liitosvalua, että reaktiivista liitosvalua. Kehitettäviä ominaisuuksia olivat mm. kulumiskestävyys, korroosionkestävyys ja jäykkyys. Tavoitteeseen pyrittiin paitsi tekemällä useita valukoesarjoja niin myös simuloimalla erityisesti reaktiivista liitosvalutekniikkaa ja materiaaleja sekä mittaamalla erilaisten materiaaliparien välistä kostutusta.

Tekijät kiittävät rahoittajia tutkimuksen suorittamisen mahdollistamisesta ja johtoryhmän osallistujia kannustavasta sekä kiinnostavasta ilmapiiristä.

Tampere 7.12.2010

Tekijät

## **Sisältö**

1.0 Johdanto

2.0 Kostutuskulmat ja reaktiivisen liitosvalun simulointi

3.0 Liitosvalukokeet (perinteinen menetelmä)

4.0 Reaktiivinen liitosvalu

4.1 Kulutuskokeet

5.0 Yhteenveto

6.0 Jatkotutkimusehdotukset

7.0 Tulosten hyödyntämissuunnitelma

8.0 Julkaisut, kansainvälinen yhteistyö ja koulutukselliset tavoitteet

.

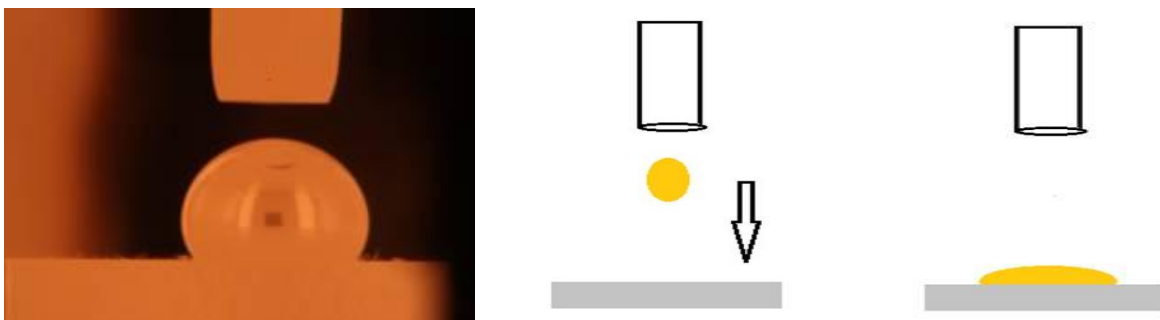
## 1.0 Johdanto

Pyrittäessä parantamaan valettujen kappaleiden kulumiskestävyyttä vaikeissa olosuhteissa on useasti pyritty kehittämään valumateriaalien ominaisuuksia lujuuden sekä kovuuden suhteen ja sitä kautta parantamaan kulumiskestävyyttä. Toisena keinona on pyritty valmistamaan valukappaleiden pinnalle pinnoitteita eri menetelmin. Näistä ensimmäisessä tapauksessa joudutaan tarpeettomasti käyttämään myös kappaleen sisäosissa samaa kulutusta kestävästä materiaalista. Toisaalta pinnoitteiden tapauksessa joudutaan ne tekemään erillisenä työvaiheena toisaalla.

Tässä projektissa tutkitun reaktiivisen liitosvalumenetelmän avulla voidaan pinnoite tehdä vain haluttuun kohtaan kappaletta in-situ valun yhteydessä. Samalla käytettävä valuseos voi olla halvempaa sekä vähemmän seostettua ja ominaisuuksiltaan paremmin kappaleiden kantaviin sisärakenteisiin soveltuvaa. Tutkimukseen valittiin kovametalli tyyppiset titaanikarbidi-komposiittimateriaalit (TiC) niiden suuren kovuuden ja kulutuskestävyyden ansiosta. TiC soveltuu erinomaisesti tähän menetelmään sen lähtöaineiden, titaani ja hiili, keskinäisen korkean reaktiivisuuden ja reaktiolämmön ansiosta.

## 2.0 Kostutuskulmat ja reaktiivisen liitosvalun simulointi

TTK:n metallurgian osaprojektissa tutkittiin lujitepartikkelien stabiilisuutta termodynaamisilla laskelmissa, partikkelien liukenemisen kinetiikkaa sekä partikkelien ja sulan kostutusta ja siihen vaikuttamista. Tarkoituksena oli selvittää TiC:n (tai TiC+Mo) käyttäytymistä kosketuksissa sekä FeX-seosten (X= Cr, Ni, Mo, Si tai C), että itse valumateriaalin kanssa. Lisäksi tutkittiin lujitepartikkelien muodostumisreaktion tuomaa lisälämpöä, lämmönsiirtoa muotissa ja sulassa sekä eri tekijöiden vaikutusta lämpötiloihin ja reaktioaikoihin. Termodynaamisissa laskelmissa saatiin tietoa TiC:n liukenemisestä ja muodostumisesta ja valukappaleessa mahdollisesti syntyvistä muista faaseista. Kostutustutkimuksissa selvitettiin kiinteän TiC:n ja sulan puhtaan raudan välistä kostutusta, kiinteän TiC:n ja ruostumattoman teräksen sekä kiinteän TiC:n ja valurautojen seosaineilla seostettujen rautojen välistä kostutusta. Kokeita tehtiin myös ruostumattomalla teräksellä (AISI 304). Kokeissa tarkasteltiin myös TiC:n ja sulan keskinäistä liukenemistä sekä tunkeumaa. Kostutusmittaukset tehtiin osittain yhteistyössä Osakan yliopiston kanssa ja niistä tehtiin myös TKK:lla yksi diplomityö (Hannu Heikkinen - Titaanikarbidin ja rautaseosten kostutus). Kuvassa 1 on esitetty Osakan yliopistolla käytetyn kostutuskulmamittauksen periaate.



Kuva 1. Osakan yliopistolla käytetyn kostutuskulmamittauksen periaate. Kokeessa sulapisara pudotetaan näytteelle ja kostutus mitataan videoitse. Pisaraa ei sulateta näytteellä vaan erikseen ja pisara on kosketuksissa näytteeseen ainoastaan sulana.

Puhtaan raudan kostutus TiC:lla on jo sinänsä varsin hyvä, antaen kostutuskulmamittauksissa arvon 30-40°. Raudan seosaineista ainoastaan Mo ja Ni näyttäisivät parantavan kostutusta, mutta eivät kovin radikaalisti. FeNi-seoksen tunkeutuminen TiC:iin ja TiC:n liukeneminen sulaan olivat voimakkainta verrattuna puhtaaseen rautaan ja Mo-seostettuun rautaan. Raudan seosaineena Mo ei vaikuttanut merkittävästi kostutukseen. Käytettäessä Mo:a TiC:n seostukseen se muodostaa TiC-partikkelien pintaan molybdeenirikkaan kerroksen, jonka on oletettu parantavan matriisin liitosta karbidiin. Koska Mo on kallis lisäaine, sen käytön välttämättömyyttä kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin tulisi tutkia. Taulukossa 1 on esitetty Osakan Yliopistolla tehdyt kokeet, kostutuskulmat  $\theta$  ja sulan tunkeumasyydyt. Sula kostuttaa materiaalin sitä paremmin mitä pienempi kostutuskulma on. Sulan tunkeuma saattaa johtua paitsi hyvästä kostutuksesta, niin myös pinnan huokoisuudesta ja materiaalin välisestä reaktiivisuudesta.

Taulukko 1. Osakan Yliopistolla tehdyt kokeet, kostutuskulmat  $\theta$  ja sulan tunkeumasyydyt.

Substraatti	Pisara	Pitoaika (min)	$\theta$ ° (t=0)	alin $\theta$ (min)	Tunkeumasyydyt ( $\mu\text{m}$ )
TiC	Fe	10	50	34 (5)	260
TiC	Fe	5	49	37 (5)	220
TiCMo	Fe	10	39	30.4 (5)	210
TiC	FeCr23p%	10	90.7	47.4 (6)	310
TiC	FeNi9p%	10	116.1	35.3 (6)	320
TiC	FeMo3.5p%	10	94.45	41 (6)	280
TiC	FeSi2.5p%	10	70.05	37 (9)	270
TiCshs	AISI304	10	45.4	39 (4)	250
TiCMo	AISI304	10	62.8	33.2 (2.5)	260
TiC	FeC3.5p%	10	25.55	20.4 (4)	190
TiCshs	Fe	3	44.65	34.5 (3)	180
TiCMo	Fe	3	34	31 (3)	150

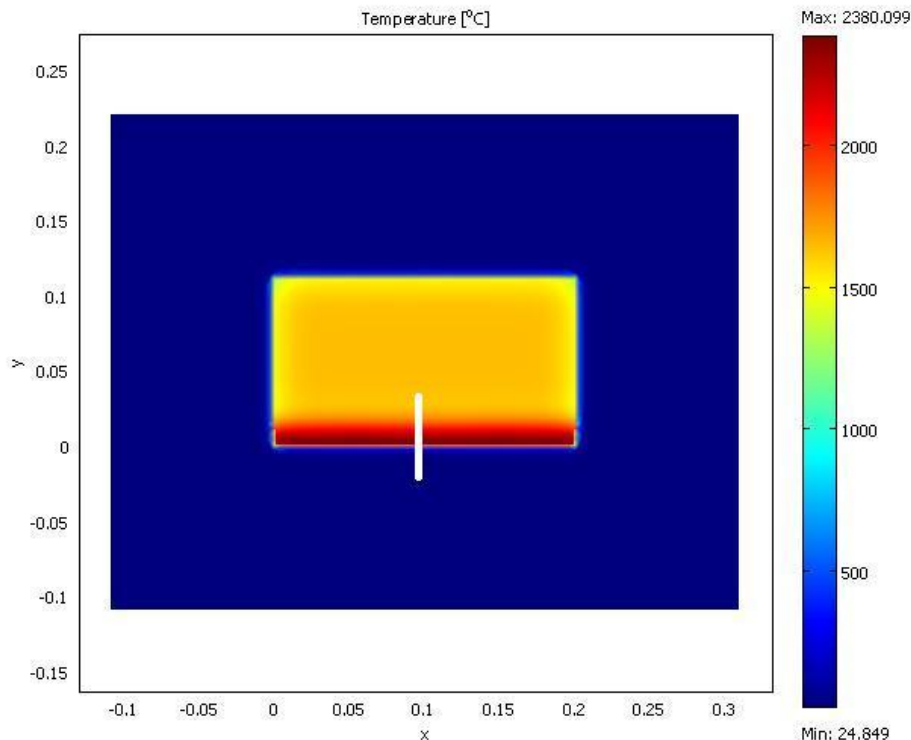
Seostettaessa sulaan rautaan hiiltä ja piitä havaittiin kostutuskokeissa erityisesti Fe-C-systeemin käyttäytymisen olevan varsin erilaista verrattuna ruostumattoman teräksen seosaineiden käyttäytymiseen. Pisara-alueelta löytyi hyvin vähän TiC:ia (pieni liukenema) ja sulan tunkeutuminen substraattiin oli pientä. Hiilipitoinen sula näyttäisi vähentävän TiC:n hajoamista ja liukenemistä sekä sulan diffuutoitumista TiC:iin.

Titaanikarbidin liukenemistä tutkittaessa huomattiin, että titaanin sekä hiilen liukenemisen vuoksi muodostui sula-alueelle jähmettymisen yhteydessä



hiilialijäämäistä TiC:ia, minkä seurauksena teräkseen jää varsin korkea hiilipitoisuus. Teräksessä oleva ylimääräinen hiili taas reagoi ruostumattoman teräksen merkittävimmän seosaineen kromin kanssa muodostaen ei-toivottuja Cr-karbideja. Yhtenä ratkaisuna tähän voi olla alihiiilen TiC:n käyttö, jolloin saatettaisiin estää hauraiden karbidien muodostuminen. Titaanikarbidin liukenemisen sulaan havaittiin olevan niin nopeaa, että valumuotissa liukenemista ei voida estää. Lisäksi mallinnustulosten perusteella sula pysyy kuumana ja sulassa tilassa useita minutteja valun jälkeen, joten tämän yhdessä liukenemisen kanssa ei pitäisi asettaa estettä sulan tunkeutumiselle inserttiin ja hyvän liitoksen syntymiselle.

Mallinnuksessa keskityttiin lähinnä TiC:n muodostumisreaktion tuoman lisälämmön laskentaan ja lämmönsiirron mallinnukseen COMSOL -multiphysics ohjelmistolla. Mallinnuksen pohjana käytettiin COMSOL-ohjelmiston omaa esimerkkiä vesijähdytteisessä reaktorissa tapahtuvasta eksotermisestä reaktiosta. Lisäksi mallinnuksen tueksi tehtiin lämpötasemalli. Simuloinnin perusteella lämpötila reaktioalueella saattaa nousta paikallisesti ja hetkellisesti jopa lähelle 3000 °C. Toinen merkittävä tulos oli, että vielä 10 minuutin jälkeen lämpötilat valukappaleessa ovat hyvinkin korkeita (>1500 °C). Lisäksi simulointien perusteella sideaineosuuden lisäämisen havaittiin laskevan maksimilämpötilaa ja hidastavan reaktiota. Insertin paksuuden kasvu (pinnoite/sula suhde) nosti maksimilämpötilaa ja nosti reaktion kokonaisaikaa jonkin verran. Simuloinneissa havaittiin myös huonommin syttyvän reaktion (syttymislämpötilan nosto) hidastavan reaktion käynnistymistä. Kuvassa 2 on esitetty simulointitulokset 10 s valun jälkeen. Kuvasta voidaan havaita pinnoite insertin olevan reaktion alkuvaiheessa yli 2000 °C kun sula on n.1500 °C. Lämpötilat tasaantuvat ajan funktiona. Taulukoissa 2 ja 3 on esitetty lämpötasemallin mukaan lasketut adiabaattiset lämpötilat sideainepitoisuuden ja esilämmityslämpötilan funktiona.



Kuva 2. Lämpötilakuvaaja kun  $t=10s$ , insertin paksuus 10mm, syttymislämpötila 680°C, ei sideaineita.



Taulukko 2. Sideainepitoisuuden vaikutus adiabaattiseen lämpötilaan  $T_{ad}$ .

Fe-pitoisuus (%)	0	5	8	10	20	40
$T_{ad}$ (°C)	3017	3017	3017	2984	2772	1858
Sula TiC (%)	17.6	7.3	1.1	-	-	-

 Taulukko 3. Laskennan aloituslämpötilan vaikutus adiabaattiseen lämpötilaan  $T_{ad}$ .

$T_{start}$ (°C)	25	50	100	200	400	680
$T_{ad}$ (°C)	2984	2997	3017	3017	3017	3017
Sula TiC (%)	-	-	0.6	5.9	18.0	28.1

### 3.0 Liitosvalukokeet (perinteinen menetelmä)

TTK:n valutuotetekniikan osaprojektissa tutkittiin eri materiaalien liittämistä toisiinsa liitosvalutekniikalla. Valettaessa somu- ja pallografiittivalurautoja kuumennetun, fluksilla käsitellyn ferriittisen ruostumattoman teräslaatan päälle saatiin aikaan hyvä liitos teräslaatan lämpötilan ollessa 300-800 °C. Fluksin tarkoitus on suojata pintoja hapettumiselta, jolloin materiaalit pääsevät sekoittumaan ja liitos muodostuu. Myöskin liitoksien lujuus osoittautui veto- ja 3-pistetaivutuskoeksissa hyväksi. Taulukossa 4 on esitetty tehdyt liitosvalukokeet.

Taulukko 4. TKK:lla tehdyt liitosvalukokeet sekä niissä käytetyt materiaalit ja lämpötilat.

Sula/lämpötila	Alusta/lämpötila	Alustan koko/paksuus	Liitoksen hyvyys
GJL/1480 °C	Teräs/ 750 °C	14 x 130 x 130 mm	Hyvä
GJL/1450 °C	Teräs/ 742 °C	14 x 130 x 130 mm	Hyvä, rajapinnassa karbideja
GJL/1410 °C	Ti/W-lujitettu GJL/750 °C	14 x 130 x 130 mm	Hyvä
GJL/ 1440 °C	Teräs, urat 5,10,15 mm ja reiät 15 ja 30 mm / 718 °C	40 mm	Hyvä, rajapinnassa karbideja
TERÄS/1571 °C	SHS-kpl 50-25% Fe/loput TiC,	12 mm	Huono
GJL/1450 °C	SHS-kpl 50-25% Fe/loput TiC / 550 °C	12 mm	Osittain hyvä, isoja huokosia
GJL/1450 °C	Teräs / 550 °C	14 mm	Hyvä myös ilman fluksia
TERÄS/ 1590 °C	GJS600/ 273 °C	52 x 130 x 130 mm	Hyvä fluksin kanssa, alusta osittain sulanut Osittain huono ilman fluksia
TERÄS/ 1600 °C	GJS600/ 64°C	52 x 130 x 130 mm	Huono
TERÄS/ 1600 °C	GJS600/ 287 °C	52 x 130 x 130 mm	Huono
TERÄS/ 1644 °C	GJS600/ 300 °C	52 x 130 x 130 mm	Huono
GJL(s=45mm)/ 1460-1470 °C	Teräs/750-800°C	142x136x 30 mm	Hyvä, rajapinnassa karbideja
GJS 700 (s=33 mm)/1440-1450 °C	Teräs/750-800°C	130x140 x 36 mm	Hyvä, rajapinnassa karbideja

GJS700(s=76mm)/1440-1450 °C	Teräs/750-800°C	140x80x 14 mm	Hyvä, rajapinnassa karbideja
GJL/1450-1470 °C	SHS-laatat/750 °C	50x50x8 mm	Huono
GJL/1450°C	SHS-laatat/700 °C	50x50x8 mm	Hyvä TIG AISI316 pinnoitetulla, muilla huono
GJS 500/1440-1450 °C	Ni- ja Cu-pinnoitetut teräslaatat,ei kuumennusta	240x250x25 mm	Hyvä 5cm etäisyydellä sis.menosta, huono 18 cm etäisyydellä sis.menosta
GJS 500 (s=22.5 cm) /1505 °C	Eri tavoin käsitelty kylmä teräslaatta, paksuus 2,5 cm, paino 10 kg	240x230x25 mm	Hyvä 5cm etäisyydellä sis.menosta, huono 18 cm etäisyydellä sis.menosta
GJS 500/1417 °C	Eri hitsit kylmän teräslaatan päällä	230x120x33 mm	Huono kaikilla
GJL/1430 °C	Boorihapolla,kalsiumfluoridilla ym. päällystetty kylmä teräslaatta	120x120x25mm	Huono paitsi hiekkapuhalletulla laatala hyvä
GJL/1430 °C	Ag55Sn ja Ag30Sn päällystetty kylmä teräslaatta	120x120x5mm	Huono paitsi hiekkapuhalletulla laatala hyvä
GJS 500/1450 °C	Kaariruisku&HVOF-pinnoitukset &Ni-pinnoitus teräslaatoissa	115x115x20 mm	Hyvä 28Cr-5C-1Mn-lopun Fe -pinnoitteella, muilla huono
GJS 500/1470 °C	Eri hitsit kylmän teräslaatan päällä	230x120x33 mm	Hyvä kaikilla, jopa pelkällä hiekkapuhalletulla laatala
GJS 500/1450 °C	Sula virtasi muottiin kylmän teräslaatan alta sekä päältä	laatat 25x110x180 mm	Osittain hyvä laatussa,jonka alta valu

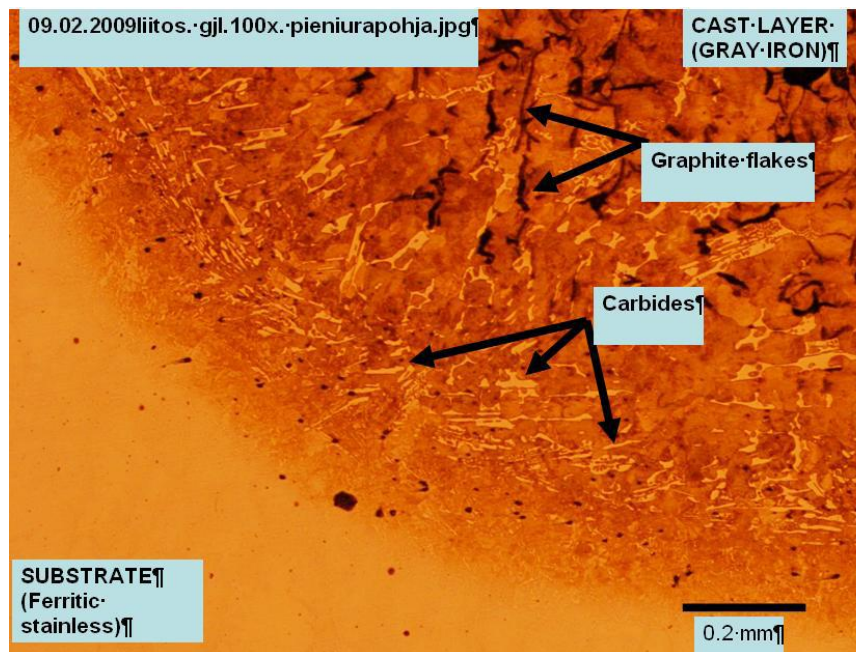
Liitosvalu onnistui hyvin valettaessa suomugrafiittirautaa kuumennetun teräslaatan päälle. Liitettävien materiaalien väliin muodostui kerros, joka oli noin 0,1-0,15 mm paksu karbiditon kerros, jonka jälkeen rakenteessa oli 0,5-0,7 mm paksu karbideja sisältävä kerros ja tämän jälkeen normaali valurautamatriisi. Liitoksen rajapinnalle muodostuva karbidivyöhyke on osoitus hyvästä liitoksesta, koska hyvä liitos edellyttää materiaalien liukenemista (diffuusiota, hiili ja kromi) toisiinsa. Valurautasulan hitsaantumismekanismi teräskappaleeseen perustuu rautasulan hiilen diffundoitumiseen teräksen pintaan, jolloin teräksen sulamispiste laskee. Esimerkiksi seostamattoman teräksen hiilipitoisuuden nousu 0,1 %:sta 2 %:iin laskee soliduslämpötilaa 1500 °C:sta 1150 °C:een. Kromi diffundoituu teräsalustasta valurautaan valun jälkeen. Karbidien määrään pyrittiin vaikuttamaan ympäryksellä, mutta sillä ei ollut vaikutusta. Lämpökäsittely (1050°C/3 tuntia, jäädytys uunin mukana) liuotti useimmat karbideista

Teräksen mikrorakenne liitosvyöhykkeellä poikkesi normaalista ferriittisen ruostumattoman teräksen rakenteesta. Liitosvyöhykkeen viereen muodostui hiilettyä 0,2-0,3 mm paksu vyöhyke hiilen diffundoituessa valurautasta teräkseen. Lämpökäsittely laajensi hiilettyä aluetta yli 0,5 mm:iin johtuen hiilen lisääntyneestä diffuusiosta raudasta teräkseen.

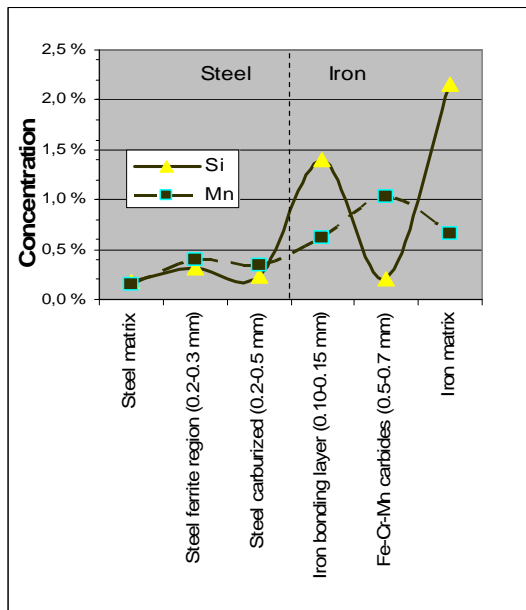
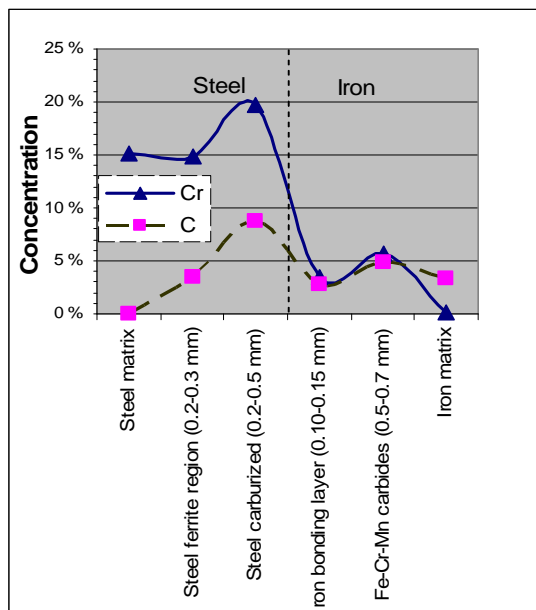
Liitosvalukokeiden tulokset vahvistavat australialaisten patentissa (US Patent 4635701) ”Composite metal articles” mainitsemia tuloksia. Patentin tekijöiden Sare et

al mukaan päällevalettavan materiaalin sulamispiste pitäisi olla alhaisempi kuin alustamateriaalin sulamispiste. Näin ollen suositeltavin tapa on valaa valurautaa teräksen päälle eikä päinvastoin. Lisäksi päällevalettava sula pitäisi ylikuumentaa 200-250 °C yli likviduksen ja alusta olisi kuumennettava minimissään lämpötilaan 350-500 °C.

Valettaessa ferriittistä ruostumatonta terästä pallografiittirautalaatan (lämpötilat 64-300 °C) päälle liitokseen muodostui rakoja, eikä hyvää liitosta saatu aikaan. Liitosvalu voisi onnistua kuumennettaessa alusta yli 400-500 °C:n lämpötilaan, mutta silloin myös alustan sulamisvaara lisääntyy. Valuprosessin kannalta olisi helpompaa, jos liitos onnistuisi myös kylmän teräslaatan päälle. Siksi valukokeissa yritettiin löytää sopivaa teräksen päälle laitettavaa pinnoitetta, mikä mahdollistaisi hyvän liitoksen liituskappaleen ollessa kylmä. Liitosvalukokeissa kokeiltiin mm. kemiallisia pinnoitteita sekä ruiskupinnoitteita, hitsejä ja juotteita ferriittisen ruostumattoman teräslaatan pinnalla. Lisäksi teräksen pintaa muokattiin tai tehtiin erilaisia kuvioita tartunnan parantamiseksi liitosvalussa. Lisäksi kokeiltiin valurautasulan valulämpötilan nostoa sekä liitettävän laatan kuumentamista muotissa virtaavalla sulalla. Laatan ollessa kylmä hyvään liitokseen päästiin pelkällä hiekkapuhalletulla teräspinnalla sisäänmenokanavan läheisyydessä. Kauempana sisäänmenosta ei täysin hyvää liitosta saatu aikaan. Sulan lämpötilan noston ja liitettävien kappaleiden seinävahvuuden laskun havaittiin vaikuttavan positiivisesti liitokseen. Kuvassa 3 on esitetty onnistuneen liitosvalun liitoksen mikrorakennetta. Kuvan 4 käyrissä on esitetty seosaineiden sekoittuminen liitoksen yli. Kokeissa havaittiin materiaalien keskinäisen sekoittumisen (diffuusion) olevan edellytys onnistuneen liitoksen muodostumiselle,



Kuva 3. Suomugrafiittirauta/teräs-liitoksen rakennetta valukokeessa 9.2.2009.



a)

b)

Kuva 4.a) Kromi- ja hiilipitoisuus sekä b) pii- ja mangaanipitoisuus teräksessä ja valuraudassa SEM/EDS-analyysin mukaan liitosvaluvyöhykkeellä.

GJL/teräs valukokeesta työstettiin kaksi vetosauvaa (suhdesauvojen halkaisijat noin 5,1 mm). Kyseisessä kokeessa suomugrafiittirautaa oli valettu ferriittisen ruostumattoman teräksen päälle. Sauvojen vartalojen keskellä oli liitoskohta. Sauvat murtuivat valuraudan puolelta, joten liitos osoittautui kestäväksi. Vetokokeessa saadut murtolujuudet olivat 217 MPa ja 229 MPa.

Samaa liitosvalua lämpökäsiteltiin eri tavoin ja kappaleista tehtiin vetosauvat lujuuksien määrittämiseksi. Tulokset on esitetty taulukossa 5. Kaikki sauvat murtuivat raudan puolelta eli liitoksen lujuus oli raudan lujuutta suurempi. Ilmajäähdytys antoi suuremman murtolujuuden kuin uunin mukana jäähdytys.

Taulukko 5. Liitosvalun GJL/teräs 9.2.2009 lujuus eri lämpökäsittelytiloissa.

Lämpökäsittelytila	Murtolujuus (2 sauvan keskiarvo), MPa
Valutila	222.5
950°C/3h/ilmajäähdytys	298
1050 °C /3h/ilmajäähdytys	288
1050 °C /jäähdytys uunin mukana	222

VTT:n toimittamien erilaisten TiC+Mo-laattojen päälle valettiin suomugrafiittirautaa. Laatat kuumennettiin lämpötilaan 750 °C ennen valua. Liitosvalu onnistui parhaiten TIG-hitsillä (AISI 316) päällystetyllä SHS-laamalla (25%Ni, loput TiCMo Ni 1 mm), ko. liitos on esitetty kuvassa 5.





Kuva 5. Onnistunut GJL/SHS-laattaliitosvalu 15.12.2009 eri suurennoksilla. SHS-laatta 1671g1- 25%Ni- AISI316 TIG-hitsattu.

SULATAJU-projektiin liittyen Lauri Niittyinen teki diplomityön ” Paikallisesti lujitettujen teräs- ja rautavalujen simulointimahdollisuudet”, joka valmistui 19.11.2008. Työn kirjallisuusosassa esitettiin rautametallikomposiittien sekä FG-materiaalien rakenne, ominaisuudet, käyttökohteet ja valmistusmenetelmät. Siinä käsiteltiin myös valunsimuloinnilla saavutettavia hyötyjä ja simuloinnin fysikaalista perustaa. Työssä on pohdittu, minkälaisia erityispiirteitä paikallisesti lujitetuilla valuilla on tavanomaisiin verrattuna, sekä mitä asioita itse asiassa kannattaisi pyrkiä simuloimaan. Simuloinnilla tulisi tavallisten täyttymis- ja jähmettymissimuloinnin tulosten lisäksi saada tietoa lujitepartikkelijakaumasta sekä lujitteen muodostavan reaktion tuoman lisälämmön vaikutuksista. Työssä esitetään eräs mahdollinen tapa lujitteen muodostavan reaktion tuoman lisälämmön huomioimiseksi MAGMASOFTilla.

Celal Cingi teki syksyllä 2008 kirjallisuus selvityksen partikkelilujitettujen rauta- ja teräsmatriisikomposiittien valmistusmenetelmistä.

#### 4.0 Reaktiivinen liitosvalu

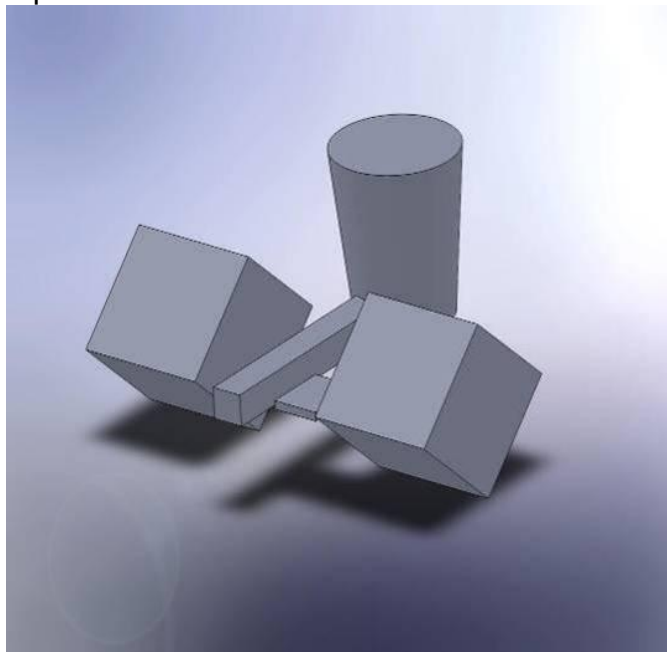
VTT:n ja TTY:n osaprojektissa tutkittiin TiC-pohjaisten komposiittipinnoitteiden liittämistä valuun reaktiivisella liitosvalutekniikalla. Perusajatuksena oli TiC:n muodostusreaktion hyväksikäyttäminen sulan ja pinnoitteen (lujite) välisen liitoksen aikaansaamiseksi. Tässä osiossa kaikki tehdyt kokeet tehtiin reaktiivisella TiC/metallisideaine pinnoitemateriaalilla, joko teräs- tai valurautasulaan. Tarkoituksena oli parantaa halvalla tehtävän ja sitkeän valumateriaalin kulumiskestävyyttä paikallisella pinnoitteella. Tavoitteena oli kehittää menetelmä kovametallikomposiitin liittämiseksi metallurgisesti valukappaleeseen.

Tavoitteeksi otettiin universaali, yleisimpiin tapauksiin soveltuvan menetelmän löytäminen. Pinnoitteen asetustavaksi valittiin esipuristeet (ns. insertit) sekä pastat (slurryt). Kuivan jauheen lisäys havaittiin ongelmalliseksi sen helpon siirtymisen vuoksi. Inserttien ja slurryjenkin tapauksessa suojaus sulan eroosiovaikutukselta oli välttämätöntä. Inserteillä havaittiin voitavan tehdä n. 1 mm tai paksumpia pinnoitteita,

ohuemmat insertit ovat liian hankalia käsitellä. Slurreilla voidaan tehdä alle 1 mm pinnoitteita. Käytännössä pinnoitteet tiivistyivät n. 50 % insertin paksuudesta.

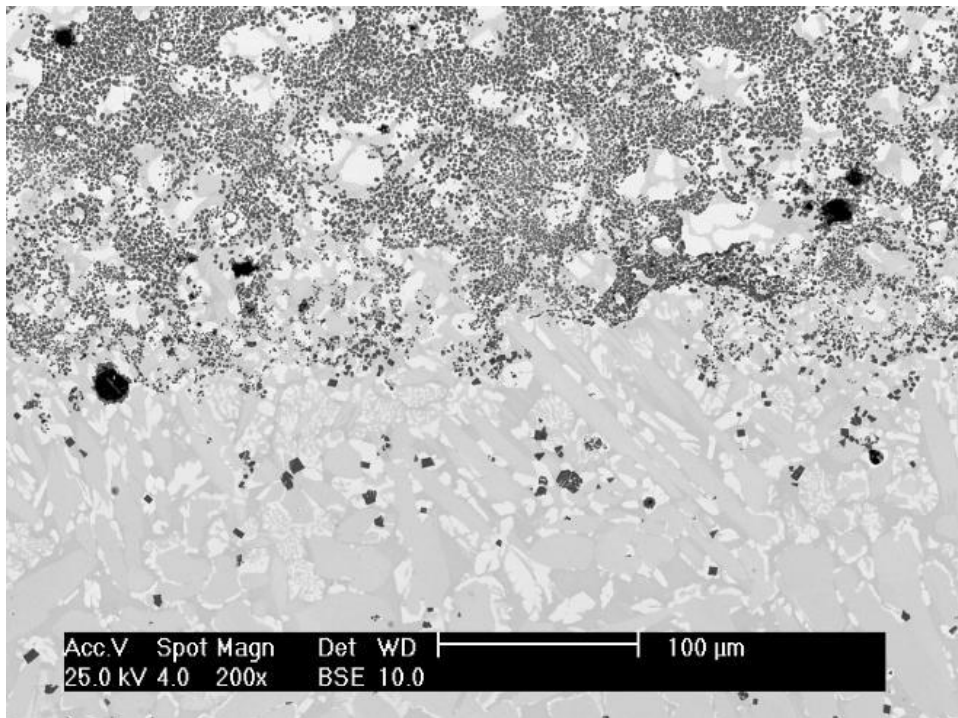
Alustavien valukokeiden perusteella pääteltiin oleelliseksi TiC+Mo/sideaine seoksen ja valettavan sulan sekoittuminen, jotta lujitekerroksen tartunta valumateriaaliin on riittävän hyvä. Tätä varmistavassa koevalussa havaittiin EDS-analyyseissä, että sula teräs tunkeutuu hyvin lujitekerrokseen. Käytetyn A890 -teräksen kromipitoista faasia oli useiden millimetrien syvyydessä pinnoiteinsertissä. Teräksen kromipitoisuus oli n. 23 p.-%. Kromipitoisuus väheni tasaisesti kappaleen ulkopintaa lähestyttäessä eli FG-rakenne muodostui jo valun yhteydessä.

Parametrien vähentämiseksi kokeet pyrittiin tekemään mahdollisuuksien mukaan vakio valujärjestelmällä. Kuvassa 6 on esitetty suurimassassa osassa valukokeita käytetty valujärjestelmä. Tässä on pyritty estämään suuria sulan virtaamia ja sulavirran törmäystä pinnoite inserttiin. Insertit asennettiin kuutioiden alatahkoille.



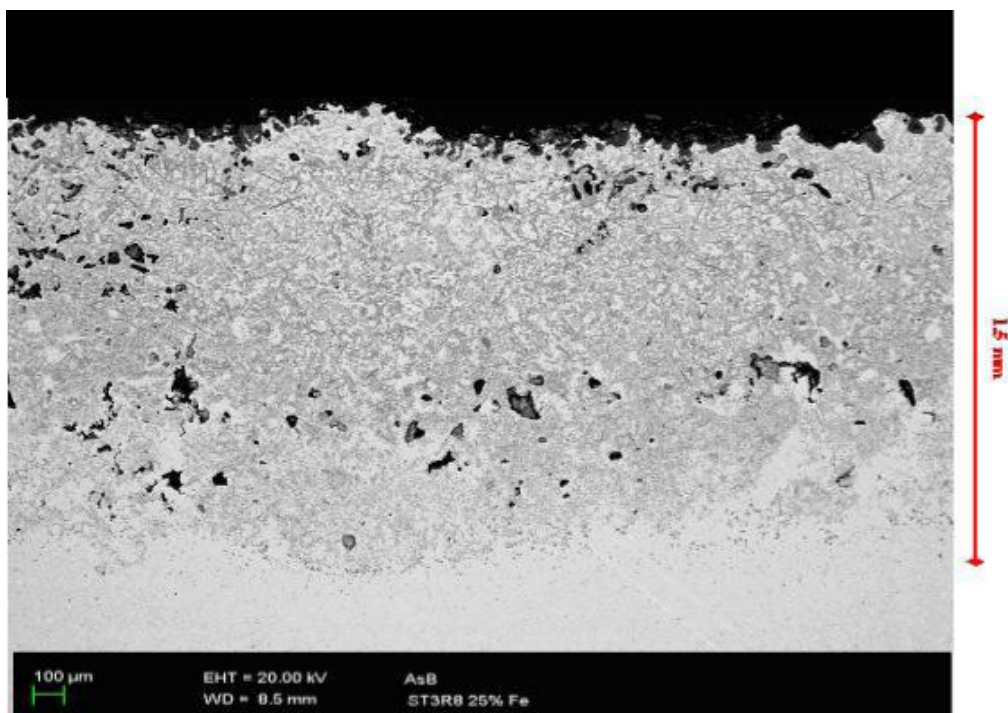
Kuiva 6. Yleisimmin reaktiivissa liitoavaluissa käytetty valugeometria. Liitettävät näytteet asetettiin kuutioiden alatahkoille.

Testattaessa suuren sideainepitoisuuden käyttöä havaittiin TiC:n muodostusreaktion lämpömäärä riittämättömäksi aikaansaamaan sulanmuodostusta insertissä ja siten sulien sekoittumista. Vaikka TiC-faasi muodostuikin ei valusula tunkeutunut pinnoitteeseen ja tuloksena oli huokoinen rakenne. Toimivan insertin sideaineen maksimimääräksi havaittiin 25 %, suositeltavaa pitää sideainemäärä jopa alle sen esim. 12%. Kuvassa 7 on esitetty valuteräksen ja 12 % Fe TiC komposiitin rajapinta. Ko. tapaus kuvastaa onnistuneen reaktiivisen liitosvalun rakennetta. Kaikissa liitoksissa rajapinta oli virheetön. TiC-komposiitti pinnoite koostuu alueista joissa karbiditiheys - matriisimetallin - tunkeutuneen valunmateriaalin osuudet vaihtelee. Edellytykseksi onnistuneelle rakenteelle reaktiivisen liitoavalun tapauksessa havaittiin sulan tunkeutuminen inserttiin. Tämä johtuu esipuristetun insertin n. 50% suhteellisesta tiheydestä ja pelkän SHS reaktion tapauksessa (ilman puristusta) tiivistymismekanismin puutteesta.



Kuva 7. Valuteräksen (alla) ja 12 % Fe TiC komposiitin rajapinta

Kuvassa 8 on esitetty 25 % Fe sideainetta sisältävän reaktiivisen liitosvalun rakenne. 25 % sideainetta oli suurin sideaine määrä jolla saatiin aikaiseksi onnistunut liitosvalu. Pinnoitteen sisältämä huokoisuus oli jonkin verran suurempi kuin 12 % sideaineella.

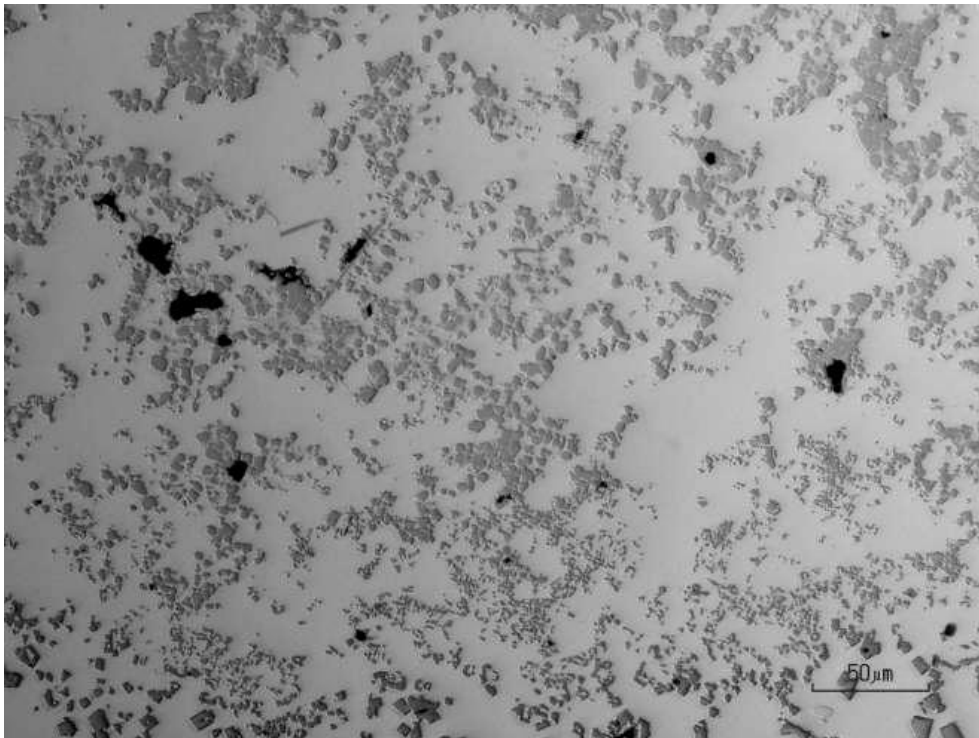


Kuva 8. Valuteräksen (alla) ja 25 % Fe TiC komposiitin rajapinta ja pinnoitteen rakenne.

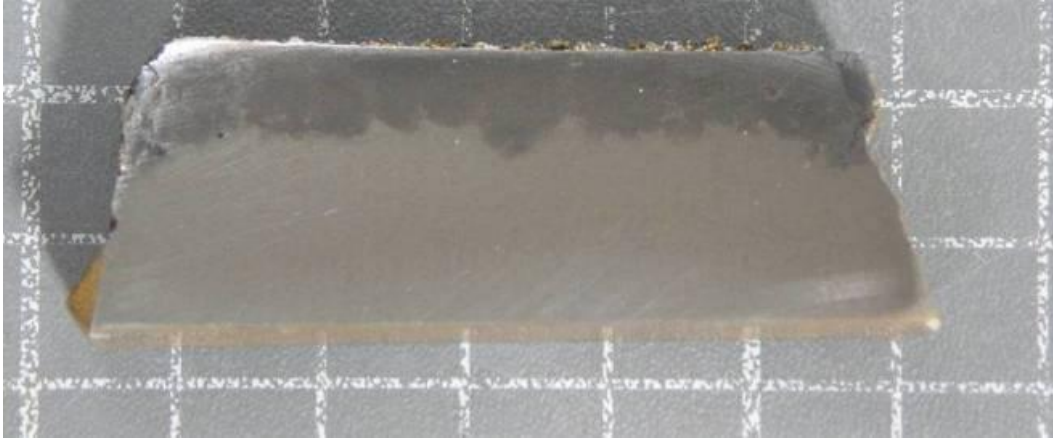


Pyrittäessä löytämään paras mahdollinen koostumus TiC-sideainemetalli komposiitille, tehtiin runsaasti kokeita erilaisilla kombinaatioilla. Kokeissa havaittiin mm. alistökiömetrisen hiilen määrän vaikuttavan positivistisesti tulokseen. Sideaineen valinta havaittiin myös oleelliseksi, koska esim. duplex teräs, jota käytettiin useissa kokeissa korroosionkestävyyden ja valumateriaalin samanlaisuuden vuoksi, osoittautui huonommaksi valinnaksi kuin esim. Fe tai Ni. Duplex teräs aiheutti mm. haitallisia faaseja ja voimakkaampaa räiskymistä valettaessa kuin Fe. Optinen mikroskooppikuva parafiinitiivistetystä esipuristeesta valmistetusta komposiittipinnoitteesta on esitetty kuvassa 9.

Suuremman sulamäärän tiivistämisvaikutusta ja samalla suuremman lämpömäärän vaikutuksen testaamisen vuoksi tehtiin muutama koevalu suuremmalla n 100 kg kappaleella Peiron Oy:llä Kokemäellä. Kuvassa 10 on esitetty koevalumallin pintaan kiinnitettyä kaavatun pinnoiteinsertin makroskooppikuva. Kuvasta 10 voidaan nähdä rakenteen olevan tiivis ja pinnoitteen olevan tyypillisesti hyvin kiinnittynyt kappaleeseen.

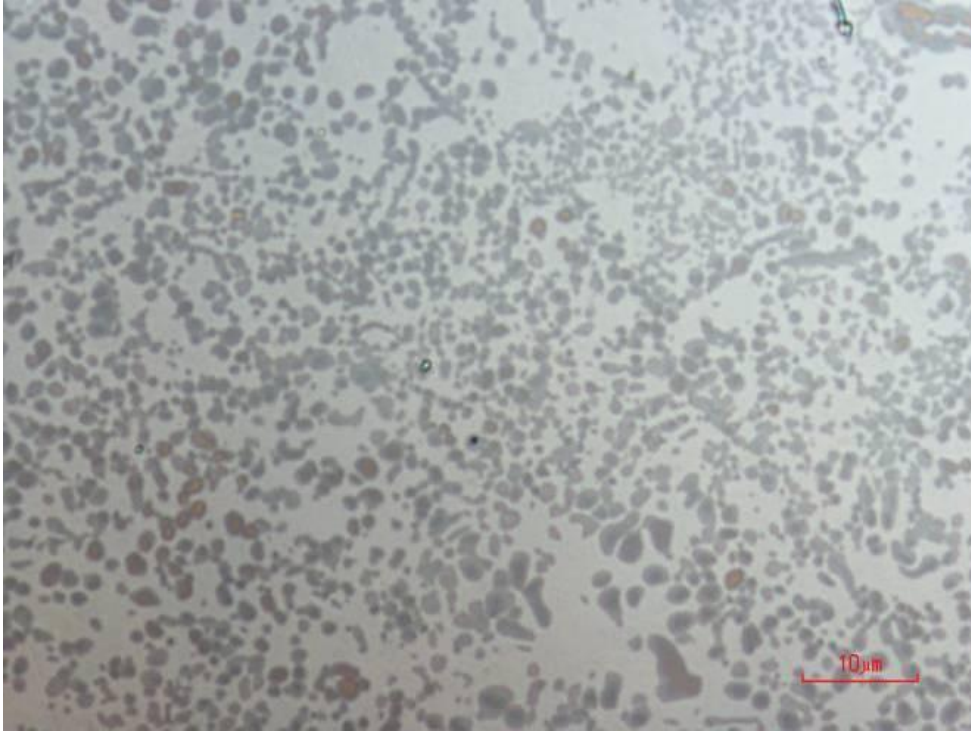


Kuva 9. Optinen mikroskooppikuva parafiinitiivistetystä esipuristeesta valmistetusta komposiittipinnoitteesta.

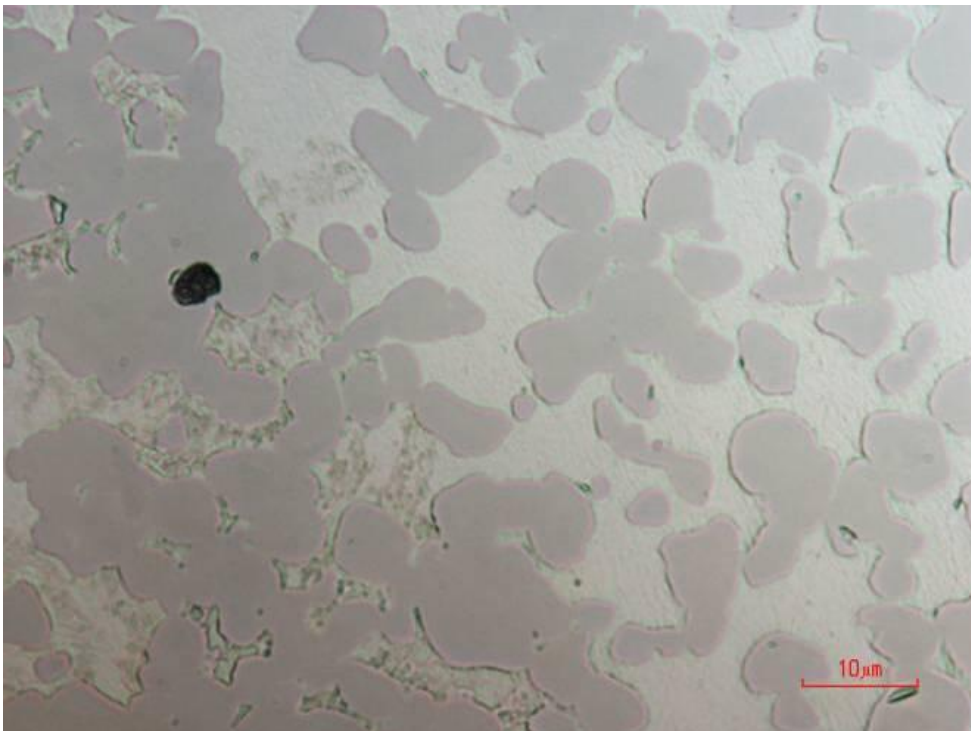


Kuva 10. Peiron Oy:llä valettu suuremman kappaleen makroskooppinen poikkileikkaus. Taustaruudun koko 10x10 mm.

Suurimmaksi haasteeksi projektissa havaittiin pinnoitteiden herkkä kulumisen/siirtyminen valuvaiheessa. Koska käytännössä valussa esiintyy virtaava metallisula ja TiC:n muodostusreaktio aiheuttaa pehmeän, osin sulan materiaalin muodostumisen pitää virta ja pehmeä pinnoitemateriaali erottaa toisistaan kriittisimmän kaatovaiheeseen ajaksi. Parhaat tulokset saavutettiin suojaamalla insertti teräslevyllä, joka estää insertin kulumisen mutta sulaa pois sopivassa vaiheessa ja aikaansaa siten liitoksen. Levyn paksuudeksi pääteltiin 2-3 mm riippuen mm. TiC-reaktion lämmöntonnistasta, sulan yllilämmöstä, kappaleen koosta jne. Slurrien tapauksessa lujitekerroksen valmistaminen osoittautui haasteeksi mm. alhaisemman reaktiivisuuden, matalamman tiiveyden sekä väliaineena käytetyn veden jäämien takia. Toisaalta slurrien käyttö mahdollistaa ohuiden kerrosten ja vaikeiden muotojen valmistamisen. Kuvassa 11 on esitetty a) suojalevyttä ja b) suojalevyllä tehtyjen kokeiden jälkeiset rakenteet. Voidaan havaita, että ilman suojalevyä karbidikoko jäi pienemmäksi, mikä todennäköisesti johtuu inserttikerrokseen tunkeutuvasta suuremmasta metallimäärästä. Tämä on yleinen trendi myös puristamalla tiivistetyissä SHS-kappaleissa. Suurempi sideainemäärä pienentää karbidikokoa.



a)



b)

Kuva 11. Lujitteen partikkelikoon vertailu optisella mikroskopiolla. a) ST20G1 ilman suoja levyä tehty valu b) ST20G2 2 mm suoja levyn kanssa tehty valu.

Tiivistääkseen pinnoitteen sulan pitäisi tunkeutua inserttiin ja täyttää sen kolot. Siksi lujiteinsertin olisi hyvä hajota reaktion ja syntyvien kaasujen voimasta. Valitettavasti mitä rajummaksi reaktio ja kaasunmuostus tehdään sitä hallitsemattomammaksi valutapahtuma osoittautui tehdyissä valukokeissa.

Huomion arvoiseksi seikaksi havaittiin pinnoitteen tiivistymisen ja paikallaan pysymisen lisäksi pinnoitteen ja valusulan väliset reaktiot ja niistä seuraavat haitalliset faasit. Erityisesti hiilen diffundoituminen terässulaan aiheuttaa kromikarbideja. Myös muita haitallisia faaseja havaittiin, kuten esimerkiksi sulan suuren tyyppi-liukeneman aiheuttama titaaninitridi. Sulan puhtauteen kiinnitettiin huomiota ja inserteissä kokeiltiin mm. alihilisiä TiC+Mo -koostumuksia kromikarbidien välttämiseksi. Nitridien ja karbidien määrää saatiin selvästi vähennettyä. Molybdeenin poistaminen vaikutti lähinnä muodostuvan TiC:n kokoon kasvattaen karbideja. Mikroskooppisesti ei muuta muutosta havaittu. Sideaineen valinnalla voitiin vaikuttaa erilaisten haitallisten reaktiotuotteiden muodostumisen estämiseen. Puhdas rauta käyttäytyi parhaiten. Erityisesti runsasseosteisella ruostumattomalla teräksellä sitä vastoin syntyi haitallisia faaseja ja myös valutapahtuma oli rauhattomin. Taulukoissa 6, 7 ja 8 on esitetty joidenkin näytteiden kovuusprofiilit. Tuloksista voidaan havaita kovuuksien keskiarvon olevan n. 600 – 950 HV ja keskihajonnan varsin pientä. Pinnoitteita voidaan pitää varsin homogeenisinä eli rakenteissa ei esiinny merkittäviä määriä heikkoja kohtia.

Taulukko 6. Vertailunäytteinä käytettyjen valunäytteiden kovuusmittaustulokset.

Näyte	ST17R5	ST16R1	ST17R6	ST16R2	ST17R4	ST17R7
HV3	572	574	543	579	510	797
	599	594	622	601	638	797
	601	599	624	641	669	837
	606	616	643	681	736	866
	622	641	669	712	767	879
	641	690	681	756	789	888
	746	703	696	841	893	940
Keskiarvo	614	628	648	678	720	853
Keskihajonta	18	39	26	60	64	37

Taulukko 7. Sideaineen vaikutus lujitekerroksen kovuuteen. Suluissa on esitetty vertailuaineiston heikoin ja suurin keskiarvo.

Näyte	ST16R2 12%D22/A890	ST15R8 12%Ni/A890	ST11R8 12%Fe/A890
HV3	579	722	440
	601	793	554
	641	809	586
	681	837	596
	712	858	646
	756	888	660
	841	1222	681
Keskiarvo	678 (614 – 853)	837	608
Keskihajonta	60	38	44

Taulukko 8. Hiilipitoisuuden vaikutus lujitekerroksen kovuuteen.

Näyte	ST15R8	ST17R2
	50:50/12%Ni/A890	46:54/12%Ni/A890
HV3	722	599
	793	614
	809	619
	837	635
	858	638
	888	678
	1222	696
Keskiarvo	837	637
Keskihajonta	38	25
Näyte	ST17R6	ST15R7
	36:64/12%Ni/A890	36:64/12%Ni/A890
HV3	696	854
	722	893
	746	955
	756	1013
	916	1070
	960	1244
	991	1251
Keskiarvo	820	1035
Keskihajonta	110	134

Mielenkiintoisin tulos kovuusmittauksissa on näytteen ST16R4 huomattavasti korkeampi kovuus muihin inserteistä valmistettuihin näytteisiin nähden. Tässä näytteessä ei ole molybdeenijauhetta insertissä D22-sideaineen sisältämän molybdeenin lisäksi. Tämä tulos voi viitata siihen, että molybdeenirikas kerros titaanikarbidipartikkelien ympärillä vähentää lujitteen kovuutta.

#### 4.1 Kulutuskokeet

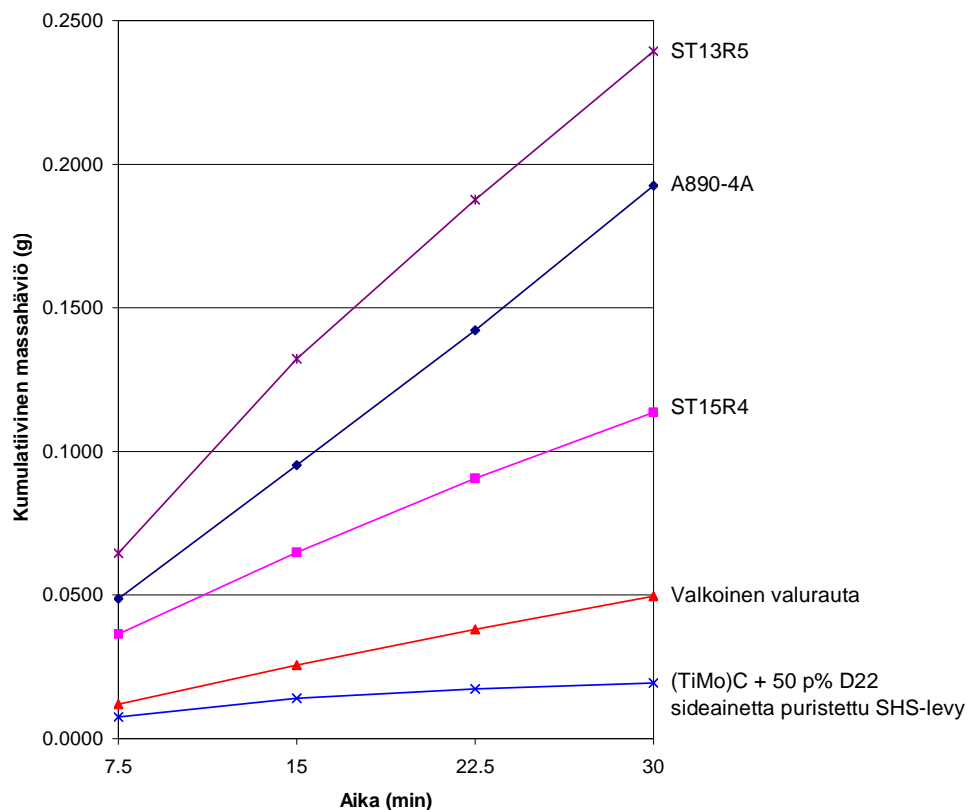
Valituille TiC-komposiitti pinnoitteille tehtiin kulutuskokeita sekä kumipyöräabraasiolla, että murskaavalla pin-on-disk kokeella. Tavoiteena oli saavuttaa vähintään valkoisen valuraudan kulumiskestävyys. Kuvassa 12 on esitetty murskaavan pin-on-disk kokeen koelaitte.

Kulutuskokeissa TiC+Mo pinnoitettu valukappale kesti kulutusta selvästi paremmin kuin duplex teräsvalu. SHS:llä valmistettu TiC - 50% D22 komposiitti kesti kulutusta kuitenkin vielä paremmin. Ero johtuu pinnoitteen erilaisesta tiivistymismekanismista ja koostumuksesta. Koetulokset on esitetty kuvassa 13.





Kuva 12. Murskaavan pin-on-disk abraasiokulutuslaitteiston osia. Näytetapin kulutettavan tasaisen pinnan pinta-ala on 1000 mm<sup>2</sup> ja näytetapin korkeus on 35 mm. Alustalevyn halkaisija on 160 mm. Abrasiivia rajoittavan seinän sisähalkaisija on 150 mm.



Kuva 13. Kulutuskokeiden tulokset murskaavassa pin-on-disk kokeessa.

## 5.0 Yhteenveto

Yleisesti tuloksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon valamisen yleinen luonne. Yleensä valetuissa tuotteissa esiintyy luonnostaan huokosia. Toisaalta valamisessa parametrivaihteluista ja valettavien seosten ominaisuuksista johtuen kappaleiden mikro- tai makrorakenteessa esiintyy ilman reaktiivisia pinnoitteitakin vaihtelua.

Projektissa onnistuttiin tekemään parhaimmillaan tiiviitä pinnoitteita suhteellisen pienille alueille kohdistetusti. Pinnoitteen ja valun rajapinta oli synnyttyään aina tiivis. Universaalia ratkaisua ei löydetty, mutta keinoja räätälöidä ratkaisu kuhunkin sovellukseen sopivaksi löydettiin. Tietyin rajoituksin tällä menetelmällä voidaan liittää kovametallikappale valuun haluttuun kohtaan.

Ville Oksasen TTY:llä tehtävä diplomityö käsittelee lujitekerroksessa ja sen läheisyydessä ilmeneviä haitallisia karbideja sekä niiden poistamiseksi tehtäviä lämpökäsittelyjä. Diplomityö tullaan toimittamaan projektin osallistujille myöhemmin.

## 6.0 Jatkotutkimusehdotukset

Molybdeenia käytetään yleisesti rauta-/teräskomposiiteissa, mutta sen käyttäytymisestä sulassa ja jähmettymisen aikana sekä molybdeenin roolista kustutuksessa löytyy hyvin vähän tietoa kirjallisuudesta ja sitä olisikin hyvä tutkia lisää, mikäli sitä aiotaan käyttää lujitteissa tai seosaineena komposiiteissa. Olisi hyvä tutkia myös molybdeenin vaikutusta kappaleiden mekaaniisiin ominaisuuksiin verrattuna pelkillä TiC-partikkeleilla lujitettuihin komposiitteihin. Mikäli TiC-lujitettujen valurautojen kehitys nähdään tärkeänä, tulisi TiC-lujitteen rajapintailmiöitä tutkia perusteellisemmin.

Mallinnuksen osalta olisi tärkeää tehdä tulosten validointi eli pyrkiä mittaamaan todellisia lämpötiloja valun aikana mahdollisimman läheltä inserttiä. Saatuja tuloksia verrattaisiin sitten mallilla laskettuihin tuloksiin. Toisena jatkotutkimusehdotuksena olisi sulan virtauksen huomioiminen yhdessä lämmönsiirtomallin kanssa.

Liitosvaluissa erityisesti terästä raudan päälle valettaessa sopivan välikerroksen löytäminen saattaisi edesauttaa liitoksen syntyä. Sopivan pinnoitteen käytöllä voitaisiin esilämmitystarve ja fluksin tarve välttää.

Reaktiivisen liitovalun tapauksessa universaalien menetelmien löytäminen vaikuttaa hankalalta. Suurella todennäköisyydellä on mahdollista löytää useisiin kappaleisiin ja niiden paikallisiin pinnoitustarpeisiin sopiva lujitekoostumus – paksuus – lisäystapa – valutapa - valukappale - materiaali jne. kombinaatio jonka avulla tavoite saavutetaan. Jatkotutkimus edellyttää valamistekniikan kehittämistä sopivaksi tälle pinnoitustavalle. Reaktiivisesti liitosvaletut pinnoitteet ovat omimmillaan erikoistapauksissa tai erityisesti johonkin kappaleeseen optimoidulla/räätälöidyllä valutavalla. Yhdessä simuloinnin kanssa saattaisi olla mahdollista kehittää työkalu erilaisten kappaleiden valmistamiseksi. Slurrien käyttöä applikointimenetelmänä pitäisi tutkia enemmän. Toisaalta esimerkiksi vakuuivalua olisi hyvä tutkia.



## 7.0 Tulosten hyödyntämissuunnitelma

Projektissa kehitettiin perinteistä liitosvalutekniikkaa ja reaktiivista liitosvalua. Projektiin osallistuneelle yritykselle syntyi projektin aikana uusi tuote liitosvalusta. Projektin aikana tehtiin myös toiselle osallistujayritykselle liitosvalukokeita. Näiden kokeiden tulokset olivat lupaavia ja tulosten perusteella on mahdollista kehittää uusi liitosvalutuote.

Reaktiivisen liitosvalun osalta potentiaalisimmiksi sovelluskohteiksi osoittautuivat pinta-alaltaan muutamien kymmenien neliösenttien kokoiset ja paksuudeltaan 1-5 mm pinnoitteet suhteellisen isossa kappaleessa. Näin Ti ja C välisen, jopa kiivaankin, reaktion aiheuttama häiriö jää vähäiseksi. Potentiaalisin valumateriaali tulosten perusteella olisi valurauta. Hieman alihillinen Ti-C-seos näyttää toimivan parhaiten. Teräsvaluissa hauraiden faasin tarkka kontrolli tulee huomioida. PASTOJEN KÄYTTÖÄ OHUIDEN, alle 1 mm pinnoitteiden tekoon myös monimutkaisille kappaleille voidaan pitää potentiaalisena erityisesti sellaisten muottien valuun, joissa esiintyy vähäistä sulan huuhtelua.

Korroosionkestävyydeltään parannettuja valukappaleita voidaan valmistaa perinteiseen liitosvalutekniikkaan perustuen. Suurimmat hyödyt ovat matalaseosteiden valuraudan (halpa) liittämässä runsaasti seostettuun, korroosionkestävään teräslaatuun. Reaktiivisella liitosvalulla haluttu ruostumattomien terästen lujittaminen ei projektin aikana täysin toteutunut tuotteeksi asti. Teräsvalujen tutkimuksellista kehitystyötä on vielä jatkettava, jotta syntyisi parempi käsitys ilmiöistä hauraiden faasin muodostumiselle sekä ratkaisu niiden kontrolloimiseksi. Suoraviivaisempaan tuotekehityksenä voidaan reaktiivisia insertti- ja pastalujitteita kehittää valimoissa suoraan valurautaisten valutuotteiden paikalliseen lujittamiseen. Intensiivinen kehitystyö valimoissa olisi luontevaa jatkoa projektissa syntyneille osaamisille ja tuloksille, jotta kehitetyt ratkaisut saataisiin tuotteiksi.

## 8.0 Julkaisut, kansainvälinen yhteistyö ja koulutukselliset tavoitteet

-D-työ, Lauri Niittyinen, Paikallisesti lujitettujen rauta- ja teräsvalujen simulointimahdollisuudet, TKK, 2008.

-D-työ, Hannu Heikkinen, Titaanikarbidin ja rautaseosten kostutus, Teknillinen korkeakoulu, 2.12.2009.

-Characterization of functional gradient structures in duplex stainless steel castings Tiusanen, Jyri; Rissa, Kati; Ritvonen, Tapio; Lagerbom, Juha; Keskiäho, Kaisu; Lepistö, Toivo, Estonian Journal of Engineering, Selected papers of the 18th International Baltic Conference on Engineering Materials and Tribology, BALTMATRIB 2009; p. 24. Vol. 15 (2009) No: 4, 293-300.

-Cast bonding of cast irons to ferritic stainless steel, The 7th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, PRIMC 7, 1-5.8.2010, Australia.

-Microstructure and properties of TiC metal matrix composite coatings by cast bonding, J. Lagerbom, C. Cingi, T. Ritvonen, P. Lintunen, K. Keskiäho, J. Tiusanen, V. Rauta, PM2010 Powder metalurgy word congress, Firenze, 10.14.10, 2010.

-Tapio Rltvonen, Tailored properties for cast surface by using exothermic reaction, esitelmä Functional Scientific Day by TEKES, 1.4.2009.

-Miia Kiviö, TKK, vieraili 1 kk ajan japanissa tekemässä kostutuskulmamittauksia metallisulilla. Jatkossa on tarkoitus jatkaa vierailuja tarpeen mukaan suunnitellusti. seuraavan Japanin vierailun ajankohta on syksyllä 2009.

-.Kansainvälinen yhteistyö ICETECin, Islanti, DTU:n Tanska ja TKKn välillä.