



KYLMÄPLASMAN VAIKUTUS PINNOITTEIDEN KIINNIPYSYVYYTEEN

Opinnäytetyö

Pasi Seppänen

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tuotantotekniikka

Hyväksytty _____._____._____

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIikka KUOPIO

Koulutusohjelma

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tekijä

Pasi Seppänen

Työn nimi

Kylmäplasman vaikutus pinnoitteiden kiinnipysyvyyteen

Työn laji

Päiväys

Sivumäärä

Opinnäytetyö

10.12.2010

35 + 6

Työn valvoja

Yrityksen yhdyshenkilö

Tekn. lisensiaatti, lehtori Mika Mäkinen

Toimitusjohtaja Risto Finne

Yritys

Kuopion Konepaja Oy, Kuopio

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia kylmäplasmalla suoritettujen pinnan esikäsitellyn vaikutusta termisen ruiskutuksen menetelmin tehtyjen pinnoitteiden kiinnipysyvyyteen ja tarttuvuuteen. Pääasiassa tutkittiin pinnoitettavien komponenttien esikäsitelyä, jossa käytettiin atmosfääristä kylmäplasmapuhdistusta. Työssä testattiin yritykselle uudentyyppistä pintojen esikäsitelymenetelmää, jolla pyrittiin lisäämään automaation käyttöä termisessä ruiskutuksessa.

Työssä tehtiin kolme erilaista tutkimussovellusta, joissa vertailtiin plasmakäsitteltyjen ja ei-plasmakäsitteltyjen testikappaleiden eroja sekä mahdollisen oksidikerroksen vaikutusta pinnoitteiden kiinnipysyvyyteen. Lisäksi tutkittiin pinnoituksessa käytettyä jauhetta. Pinnoitteita tutkittiin adheesiokokeilla sekä optisella mikroskoopilla, jolla tutkittiin pinnoitteiden levinneisyyttä substraattiin ja mitattiin pinnoitejauheen partikkelikoot.

Tehdyissä kokeissa pinnoitteet olivat hyvin kiinni substraatissa. Adheesiokokeilla ei pystynyt määrittämään pinnoitteiden kiinnipysyvyyttä. Työssä todettiin kylmäplasmakäsittelyllä olevan vaikutusta rajapinnan puhtauteen. Pinnoitejauheen partikkelikoot poikkesivat hieman toimittajan antamista arvoista, mikä ei kuitenkaan vaikuttanut pinnoitteiden mikrorakenteisiin.

Avainsanat

kylmäplasma, terminen ruiskutus

Luottamuksellisuus

julkinen

SAVONIA-UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree Programme

Mechanical Engineering and Production Technology

Author

Pasi Seppänen

Title of Project

Effect of Cold Plasma Treatment on Coating Adhesion

Type of Project

Date

Pages

Final Project

December 10, 2010

35 + 6

Academic Supervisor

Company Supervisor

Mr Mika Mäkinen, Lecturer (Lic. Tech.)

Mr. Risto Finne, Managing Director

Company

Kuopion Konepaja Oy , Kuopio

Abstract

The aim of this final year project was to study the effect of cold plasma preprocessing on the adhesion of thermal sprayed coatings. The research included preprocessing of test pieces, in which atmospheric cold plasma was used. The preprocessing of surfaces was tested in order to increase the use of automation in the thermal spraying process.

In the work three different studies were carried out in which plasma treatment was compared to untreated parts. Differences in these parts and the effects of possible oxide layers between the substrate and the coatings were also studied. Furthermore, the powder used in thermal spraying was examined. The coatings were examined with adhesion tests and on optical microscope, on which the distribution of the coatings on the substrate level was studied and particle sizes of coating powder were measured.

In the tests all the coatings were very close to the substrates. Adhesion tests were not able to determine the permanence of the coatings. It was proved that cold plasma has an effect on the cleanness of the interface. The particle sizes of coating powder deviated a little from the values given by the supplier but it has not effected the micro structures of the coatings.

Keywords

cold plasma, thermal spraying

Confidentiality

public

ALKUSANAT

Kiitän opinnäytetyön aiheen valinnasta ja lähtötietojen selvittämisestä Kuopion Konepaja Oy:n toimitusjohtaja Risto Finneä sekä myyntijohtaja Jukka Finneä. Kiitän myös ohjaavaa opettajaa tekn. lisensiaatti, lehtori Mika Mäkistä, Tampereen Teknillisen Yliopiston professori Petri Vuoristoa ja tohtoritutkija Kari Niemeä sekä Konepajan työntekijöitä, joilta sain arvokasta tietoa työn suorittamisesta.

Lisäksi kiitokset vaimolle ja tyttärelleni, jotka kannustivat työn tekemisessä. Kiitän myös koulun laboratoriohenkilökuntaa, joiden kanssa tein paljon yhteistyötä sekä kaikkia muita opinnäytetyöhön osallistuneita henkilöitä.

Kuopiossa 10.12.2010

Pasi Seppänen

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	7
2 YHTEISTYÖKUMPPANIT	8
2.1 Kuopion Konepaja Oy	8
2.2 Tampereen Teknillinen Yliopisto	8
3 PROSESSI	9
3.1 Viitekehys	9
3.2 Työnkulku	9
4 KYLMÄPLASMA	11
4.1 Kylmäplasma	11
4.1.1 DC-purkaus	11
4.1.2 Radioaaltopurkaus	13
4.1.3 Mikroaaltopurkaus	14
4.2 Teknologia	14
4.3 Pintojen modifioiminen	14
4.4 Pintojen puhdistus	15
4.5 Sovellukset teollisuudessa	15
4.6 Edut	16
5 ADHEESIO	17
6 TERMINEN RUISKUTUS	18
6.1 Pintojen esikäsittely	18
6.2 Ruiskutus menetelmänä	18
6.3 Ruiskutuslaitteistoja	21
7 ADHEESIOKOE	22
7.1 Liima-aine	22
7.2 Vetolaitteisto	22
7.3 Pinnoitteen esikäsittely	22
7.4 Prosessi	23
7.5 Tuloksien tulkintaa	23
7.6 Raportointi	24
8 TYÖSSÄ KÄYTETTYJÄ AINEITA JA MENETELMIÄ	25
8.1 Pinnoitejauhe	25
8.2 Liima	25

8.3 Kylmäplasma puhdistus	25
8.4 HVOF-ruiskutus.....	26
9 TYÖN SUORITUS JA TULOKSIA.....	27
9.1 Tutkimussovellukset	27
9.2 Testikappaleet ja niiden esivalmistelu	27
9.3 Kylmäplasma puhdistus ja ruiskupinnoitus	28
9.4 Adheesiokokeet pinnoitteille.....	29
9.5 Optiset mikroskooppitutkimukset.....	30
10 TULOSTEN ANALYSOINTI.....	33
11 YHTEENVETO	34
LÄHTEET.....	35
LIITTEET Vetokoetuloksia	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on tutkia kylmäplasmalla suoritetun pinnan-esikäsittelyn vaikutusta termisen ruiskutuksen menetelmin tehtyjen pinnoitteiden kiinnipysyvyyteen ja tarttuvuuteen. Työ liittyy osana Tampereen Teknillisen Yliopiston (TTY:n) NewSpray-projektiin, jossa Kuopion Konepaja Oy oli mukana. Pääasiassa tutkitaan pinnoitettavien komponenttien esikäsittelyä, jossa käytetään atmosfääristä kylmäplasmapuhdistusta. Työssä testattiin yritykselle uudentyypistä pintojen esikäsittelymenetelmää, jolla pyrittiin lisäämään automaation käyttöä termisessä ruiskutuksessa.

Työssä tutkitaan ja tehdään adheesiokokeita, joilla pyritään selvittämään kylmäplasma-käsittelyn sekä oksidikerroksen vaikutusta pinnoitteen kiinnipysyvyyteen. Työssä käytetään TTY:n lähettämiä testikappaleita, jotka raepuhalletaan Kuopion Konepajalla haluttuun pinnankarheuteen. Testikappaleiden profiilit pyritään saamaan lähes samanlaisiksi ennen pinnoitusta.

Työssä ruiskutetaan HVOF (suurnopeusliekkiruiskutus) -menetelmällä WOKA (volframikarbidi) 3653 -pinnoite plasmakäsitellyille sekä käsittelemättömille kappaleille, minkä jälkeen niitä tutkitaan ja vertaillaan keskenään. Tutkimuksissa yritetään selvittää kylmäplasmapuhdistuksen hyötyä HVOF-ruiskutusprosessissa sekä luoda yhteistyötä Savonian ja TTY:n välille.

Työssä on esitelty pintojen esikäsittelyä kylmäplasmalla, työssä käytettyä termisen ruiskutuksen menetelmää sekä adheesiokokeen tutkimuksia ja tuloksia. Yhteistyökumppanina työssä oli Kuopion Konepaja Oy, joka tunnetaan erityisesti laadukkaasta metalliruiskutuksesta. Yrityksen toimitusjohtaja Risto Finne toimii yrityksen puolelta yhdyshenkilönä opinnäytetyössä ja toisena yhteistyökumppanina toimii TTY, jonka materiaalitekniikan laboratoriossa suoritettiin testikappaleiden tutkimuksia. Tutkimukset TTY:n tiloissa suoritti tohtoritutkija Kari Niemi.

2 YHTEISTYÖKUMPPANIT

2.1 Kuopion Konepaja Oy

Kuopion Konepaja Oy on vuonna 1982 perustettu teollisuuden kunnossapitoyritys. Asiakaskunta koostuu lähes kaikkien teollisuusalojen merkittävistä yrityksistä. Yrityksen toiminta perustuu joustavaan asiakaslähtöiseen palveluun. Yritys tarjoaa asiakkailleen kokonaistaloudellisesti kannattavia vaihtoehtoja kunnossapito- ja korjaustoimintaan. Kuopion Konepaja Oy on tunnettu korkeasta laadusta ja varmasta toimituksista sekä nopeasta toimitusajasta. Normaalien kunnossapitokoneistuksien lisäksi yrityksen erikoisosaamiseen kuuluvat erilaiset termiset pinnoitukset, dynaaminen tasapainotus, ARC-keraamikomposiittipinnoitus sekä nivelakseleiden kunnostus. Yritys toimittaa myös räätälöityjä kovametalli- ja alumiinioksidituotteita teollisuuden tarpeisiin. [1]

Yritys on pyrkinyt profiloitumaan erityisesti laadukkaan termisen ruiskutuksen hallitseväksi yritykseksi. Yrityksen pinnoitustekniikan aihepiiriin liittyy termisesti ruiskutetut pinnoitteet mukaan lukien kaari-, HVOF- ja sulautustekniikoilla valmistetut pinnoitukset. [1]

2.2 Tampereen Teknillinen Yliopisto

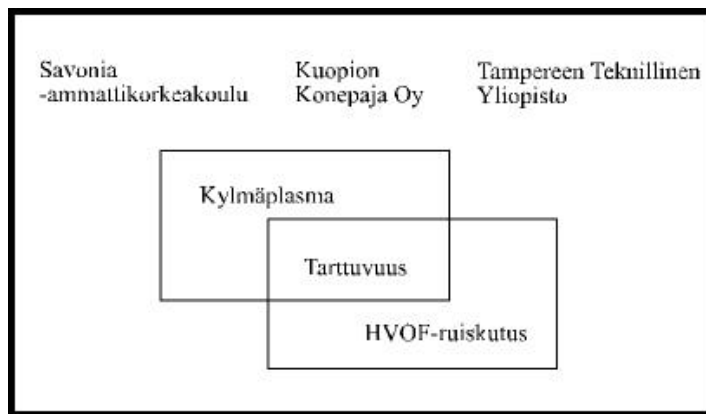
TTY:n materiaaliopinlaitos toimii materiaalitekniikanosaston alaisuudessa. Materiaaliopinlaitoksen tutkimustoiminta perustuu korkeatasoiseen tietämykseen materiaalien rakenteesta, ominaisuuksista, prosessoinnista sekä niihin liittyvistä tutkimuksista. Laitos tekee laajaa yhteistyötä suomalaisen teollisuuden kanssa soveltavan materiaalitutkimuksen alueella. Laitos on perustettu vuonna 1969 ja tällä hetkellä laitoksessa työskentelee noin 150 henkilöä. Laitoksenjohtaja on professori Veli-Tapani Kuokkala. [2]

Materiaalitekniikan laboratoriota johtaa professori Petri Vuoristo. Pinnoitustekniikan laboratorion erikoisosaamiseen kuuluvat kulumisen, korroosion, tarttuvuuden, kitkan, korkealämpötilankeston, rakenteen, tiiveyden ja pintaominaisuuksien määrittäykset sekä koepinnoitukset ja sovellustestit. [2]

3 PROSESSI

3.1 Viitekehys

Opinnäytetyössä yhteistyökumppanina sekä asiantuntijoina olivat Savonia-ammattikorkeakoulu, Kuopion Konepaja Oy ja TTY. Asiantuntijoilla saatu tieto vaikutti tutkimusprosessiin merkittävästi. Työni keskeisimmät asiat ovat kylmäplasma, HVOF-ruiskutus sekä adheesiotutkimus. Savonia-ammattikorkeakoulu antoi kylmäplasmalaitteiston käytettäväksi ja Kuopio Konepaja Oy HVOF-ruiskutusmahdollisuuden sekä tilat pinnoitetyön toteutukseen. TTY antoi testikappaleet sekä tietoa adheesiokokeisiin sekä mikroskooppitutkimuksiin. Prosessi päättyi pinnoitteiden adheesiokokeisiin ja niistä tehtäviin mikroskooppitutkimuksiin. Kuvassa 1 on esitetty työn viitekehys.



Kuva 1. Viitekehys.

3.2 Työnkulku

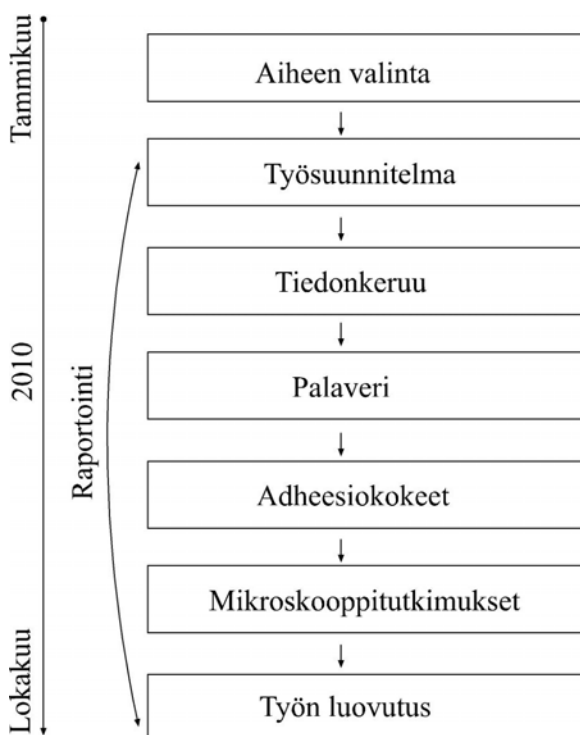
Opinnäytetyöhöni kuului tutkimustyö, joka on kuvattu työnkulkukaaviossa (kuva 2). Lopullinen opinnäytetyön aiheen valinta päätettiin Kuopion Konepajalla yrityksen toimitusjohtajan Risto Finnen sekä opinnäytetyön ohjaajan Mika Mäkisen kanssa. Opinnäytetyössä päätettiin tehdä tutkimus kylmäplasmalla suoritetun pinnan esikäsittelyn vaikutuksesta termisen ruiskutuksen menetelmin tehtyjen pinnoitteiden kiinnipysyvyyteen ja tarttuvuuteen.

Ennen adheesiotyön aloittamista pidettiin kokous, jossa käsiteltiin tarkemmin tutkimustyösovelluksia. Kokoukseen osallistuivat lisäksi Mika Mäkinen, Esa Jääskeläinen, Risto Finne, Jukka Finne sekä TTY:n edustajat Tamlikin johtaja Jari Erkkilä ja tohtori-

tutkija Kari Niemi materiaaliopin laitokselta. Kokouksessa päätettiin, että tutkitaan lisäksi myös pinnoitejauhe, jolla pinnoitukset tehdään. Adheesiokokeen standardin ja kokeessa käytettävän liiman tiedot saatiin Kari Niemeltä.

Adheesiokokeet aloitettiin esivalmistelemalla testikappaleet ennen raepuhaltamista. Raepuhallukset suoritettiin työsuunnitelmaa noudattaen. Raepuhallusten jälkeen kaikki kappaleet hitsattiin pyöritysjiigiin ja suoritettiin välittömästi plasmapuhdistus puhdistettaville testikappaleille ja heti perään HVOF-ruiskupinnoitus.

Pinnoitteiden adheesiokokeita jatkettiin konetekniikan laboratoriossa. Liimausprosessiin kehiteltiin puristin, jolla testikappaleet voitiin puristaa kiinni vetosauvoihin liima-aineen levittämisen jälkeen. Liimauksen ja puristamisen jälkeen kappaleet siirrettiin uuniin kuivumaan, minkä jälkeen suoritettiin vetokoe liimatuille kappaleille. Vetokokeen jälkeen testikappaleista otettiin poikkileikkauskuvat TTY:llä. Pinnoitejauheen partikkelikoot tutkittiin koulun laitteistolla.



Kuva 2. Työnkulkukaavio.

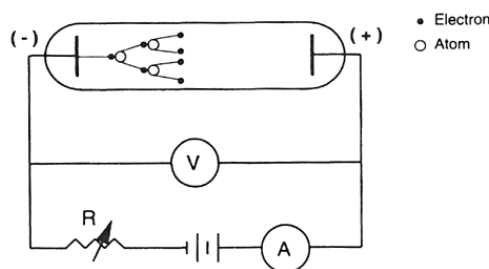
4 KYLMÄPLASMA

4.1 Kylmäplasma

Kylmäplasma koostuu tavallisesti viritetyistä atomeista, jotka on tuotettu jatkuvalla virralla, radioaalloilla tai mikroaalloilla, jota on sovellettu kaasuun. Plasmakemiassa kylmäplasmaa hallitaan pääasiallisesti elektronienergialla ja kaasunlämpötilalla. Siksi plasman luomisessa on vähän merkitystä, millä menetelmällä energiat ja lämpötilat puretaan. Menetelmän ja laitteen valitseminen purkamiseen määräytyy vaatimuksen ja prosessimäärien perusteella joustavuudesta, prosessin yhdenmukaisuudesta ja kustannuksista. [3, s. 24.]

4.1.1 DC-purkaus

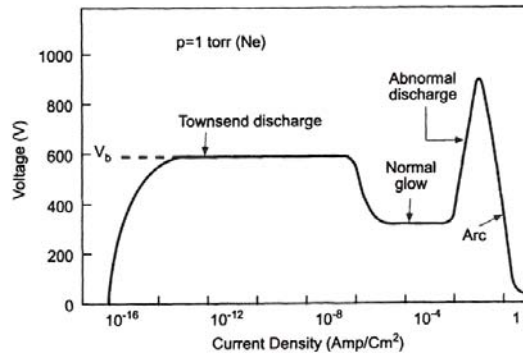
Virtalähteet, joita käytetään ylläpitämään jännitteellä tuotettuja kylmäplasmaa, ovat yleensä vakiojännitteisiä. Kylmäplasma tuotetaan reaktorissa soveltamalla jännitettä kahden johtavan elektrodin välillä, jotka on sijoitettu kaasuun matalapaineessa, kuten kuvassa 3 on kuvattu. Kuvassa näkyy pieni määrä vapaita elektroneja, joita on aina kaasussa ionisaation seurauksena. Vapaat elektronit voidaan myös tuottaa valoionisaatiolla tai kenttä emissiolla. Kun jännite on sovellettu kaasuun, puretaan se elektroniputkessa lisäämällä vähitellen saatavissa olevat sähkökentällä kiihdytetyt vapaat elektronit, josta saadaan liike-energiaa aikaan. Samanaikaisesti elektronit menettävät energiaa yhteentörmäyksissä atomien tai kaasun molekyylien kanssa. [3, s. 25.]



Kuva 3. DC –kylmäplasmapurkaus. [3, s. 25.]

Alussa kun elektronin energia on liian matala virittymään tai ionisoimaan kohdetta siitä seuraa, että yhteentörmäykset eivät välttämättä ole joustavia. Keskimääräinen osa elektronienergiasta, joka on menetetty kimmoisassa törmäyksessä kaasuatomin tai molekyylien kanssa menetetään 10^{-5} osa elektronin koko liike-energiasta. Sillä välin elektroni jatkaa energian saamista yhteentörmäyksien välillä, kunnes se saavuttaa riittävästi energiaa aiheuttaakseen kohteiden ionisaation joustamattomien yhteentörmäyksien välityk-

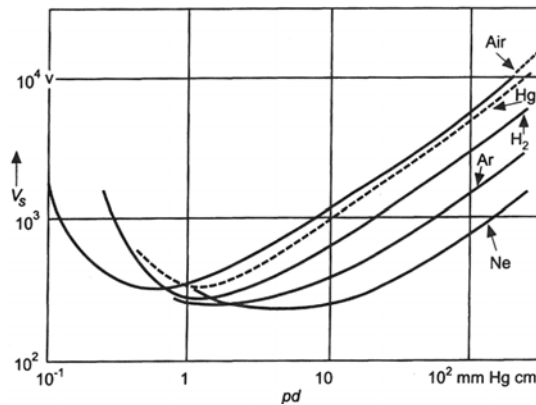
sellä. Energian siirtyminen joustamattomissa yhteentörmäyksissä tekee energiansiirron tehokkaammaksi. Sähkökenttä nopeuttaa vuorostaan taas uusia elektroneja, jotka on tuotettu ionisaatioprosessissa ja tuottaa enemmän ionisaation vaikutuksella neutraaleja atomeja tai kaasun molekyyliä. [3, s. 26.]



Kuva 4. Kuvaus jännitteestä kylmäplasmapurkauksen aikana. [3, s. 26.]

Kuvassa 4 on kuvaus jännitteestä, kun se saavuttaa tietyn kynnsarvon, joka koostuu kolmen samanaikaisen prosessin vaikutuksesta. Sähkökenttä nopeuttaa ioneja, jotka osuvat katodiin riittävällä energialla aiheuttaakseen toissijaisten elektronien emission. Toissijaiset elektronit vuorostaan muodostavat enemmän ioneja yhteentörmäyksellä kaasun neutraalien atomien kanssa. Vasta muodostetut ionit ovat kiihdytettyjä ollakseen katodeja, jossa yhteentörmäykset tuottavat enemmän elektroneja, jotka vuorostaan tuottavat enemmän ioneja. Samanaikaisesti liike poistaa plasmasta elektroneja, jotka on luotu yhteentörmäyksiön ionisoimisessa ja positiivisten ionien kanssa toisissa prosesseissa muodostamalla negatiivisia ioneja. [3, s. 26.]

Läpilyöntijännite DC:n purkamisessa määräytyy purkamisen perusteella, joka käsittelee kaasupainetta ja elektroniputken kokoa. Paschenin laki on nimetty tämän riippuvuuden takia, joka heijastaa itse asiassa kylmäplasma purkauksen riippuvuutta toissijaisilla elektroneilla. Jos elektrodien välillä välimatka tai paine on liian pieni toissijaiset elektronit, joita on eritetty katodista voivat saavuttaa anodin käydessään läpi vain hyvin pienen määrän yhteentörmäyksiä luomatta riittävää määrää ioneja, joita vaaditaan toissijaisten elektronien uudistumista varten. Toisaalta, jos paine on liian korkea, elektronit eivät voi hankkia riittävästi energiaa yhteentörmäyksiön välillä tuottaakseen riittävästi ioneja. Jos elektrodien välillä välimatka on liian suuri, vain pieni osa tuotetuista ioneista onnistuu saavuttamaan katodin ja luomaan toissijaisia elektroneja. [3, s. 27.] Kuvassa 5 on kuvattu läpilyöntijännite arvoja eri kaasuille.



Kuva 5. Lämpilyöntijännite arvoja eri kaasuille. [3, s. 28.]

Useimpia kaasuja varten vähimmäislämpilyöntijännite on 100 – 500V välillä. Epäpuhtaudet kaasussa voivat vähentää lämpilyöntijännitettä joko ionisaation välityksellä tai kun niillä on matala ionisaatiopotentiaali. [3, s. 28.]

4.1.2 Radioaaltopurkaus

Virtalähteitä käytetään tietyissä taajuuksissa, joita käytetään ylläpitämään radiotaajuus plasmajärjestelmiä. Käytetyin taajuus on 13.56 MHz, mutta joskus käytetään 27.12 MHz:n ja 40.68 MHz:n taajuuksia. Radiotaajuus generaattorit on suunniteltu tuottamaan 50:n Ω pysyvää impedanssia. Kylmäplasma purkauksen impedanssi on kuitenkin paljon korkeammalla ja vaihtelee prosessiparametrien mukaan. Impedanssi pitää olla yhteensopiva sähköverkoston kanssa radiotaajuus virtalähteen ja reaktorin välillä. Suurin osa energiasta kääntyy takaisin virtalähteeseen sen sijaan että olisi absorboitunut plasmaan. Yhteensopiva yksikkö sijaitsee fyysisesti niin lähellä kuin mahdollista energia elektrodiä. Yhdensuuntaisissa lautasreaktoreissa yhteensopivaa yksikköä käytetään tavallisesti tukemaan energiaelektrodiä. [3, s. 93–94.]

Pitämällä yllä jännitteen purkamista radiotaajuudella johtava elektrodi täytyy lisätä reaktorin sisään, joka on suorassa yhteydessä plasmaan. Joissakin tapauksissa pidetään etuoikeutettuna elektrodien olemista reaktorin ulkopuolella, jolla vältetään prosessin likaantumista, koska materiaalista poistuu elektrodit. Sellaiset ongelmat voidaan ratkaista vuorottelemalla purkamisen polaarisuutta. [3, s. 31.]

Kun vuorottelevaa sähkökenttää sovelletaan pienellä taajuudella (<100 Hz) kahden purkamisputken elektrodin välillä, se syö elektrodia vuorotellen katodina tai anodina. Sen jälkeen lämpilyöntipotentiaali ylitetään kullakin puolikkaalla jaksolla ja saavutetaan kylmäplasma purkaus. Jännitteen laskeuduttua jakson aikana lämpilyöntiarvon alle purkaus sammuu. Kun sähkökentän taajuus kasvaa kriittisen ionitaajuuden yläpuolella, aika jonka positiiviset ionit tarvitsevat siirtyäkseen elektrodien välillä tulee kasvamaan puolik-

kaalla jaksolla sähkökentässä. Ionit luodaan lähellä anodia koska katodia ei voi saavuttaa ennen kuin kentän suunta kääntyy. [3, s. 32.]

4.1.3 Mikroaaltopurkaus

Mikroaaltoplasmaa pidetään yllä liittämällä mikroaltoaenergia plasmakaasuun. Mikroaallot kerätään virtalähteistä, jotka tuottavat 2,45 GHz taajuutta. Mikroaalloilla plasman viritystila on samankaltainen kuin radioaalloilla, kun erot aiheutuvat vain taajuuksista. Tyypillisessä mikroaalloilla tuotetussa plasmassa sähkökentän vahvuus on $E_0 \approx 30 \text{ V/cm}$, koska yhteentörmäyksessä elektronin maksimaalinen amplitudi mikroaltoaajuuksissa on $< 10^{-3} \text{ cm}$ ja elektronin hankkima vastaava enimmäisenergia yhden jakson aikana on 0,03 eV. Tämän suuruinen energia on pieni pitääkseen yllä plasmaa, siksi mikroaalloilla purkaminen on vaikeampaa matalapaineissa kuin DC:llä tai radiotaajuudella. Mikroaaltojen absorptio on funktio elektronien yhteentörmäystaajuudesta ja on siksi riippuvainen myös paineesta purkamisen aikana. Mikroaaltojen taajuus 2,45 GHz tehostaa mikroaaltojen absorptiota heliumissa 5 - 10 torr. Käytettäessä muita kaasuja optimaalinen paine on 0,5 - 10 torr. [3, s. 39.]

4.2 Teknologia

Paineilmalla toimivaa plasmateknologiaa on sovellettu pintojen puhdistukseen, aktivointiin tai parantamaan materiaalissa adheesiota ennen jälkikäsitelyä. Kylmäplasmalaitteisto voidaan asentaa tuotantolinjastoihin integroimalla se olemassa olevaan prosessiin. Laitteiston sisällyttäminen olemassa olevaan tuotantoprosessiin tarvitsee vain paineilmaa ja sähköä. Kylmäplasmalaitteistolla tehtävä pintojen esikäsitelyprosessi on ympäristöystävällinen. [4]

4.3 Pintojen modifioiminen

Kylmäplasmakäsittelyä käytetään eniten metalleille, muoveille sekä keraameille. Kylmäplasmaa on sovellettu teknologiassa laajasti metallurgiasta tietokonesirujen valmistukseen asti. Useimmissa sovelluksissa kylmäplasmaa käytetään kiinteitten pintojen esikäsitelyyn. Plasmakäsittelyllä pintaa ei varsinaisesti muokata, mutta pintaominaisuuksia modifioidaan. Kylmäplasma tuottaa energisten hiukkasten yhtenäisen esikäsitelyn positiivisten ja neutraalien ionien sekä elektronien avulla, joilla voidaan hallita esikäsitelyä. Kylmäplasmakäsittelyssä perusaineet joutuvat pommituksen kohteeksi energisillä hiukkasilla, jotka antavat sekä fyysisiä että kemiallisia vaikutteita perusaineen pinnalle. [3, s. 151–152.]

4.4 Pintojen puhdistus

Kylmäplasmalla puhdistavan prosessin tavoitteena on poistaa pinnalle jääneitä orgaanisia sekä epäorgaanisia yhdisteitä, kuten rasvaa, likaa, pölyä ja metallioksiedeja. Kylmäplasmapuhdistuksella voidaan korvata märkäpesu. Joissakin pinnanmuodoissa voi märkäprosessipuhdistus olla ongelmallista. Ongelmat saattavat alkaa esimerkiksi vaikeudesta saada neste pieniin aukkoihin ja sieltä pois. Nestemäisissä kemikaaleissa hiukkasten valvonta on erittäin vaikeaa. Plasmapuhdistus voi vähentää näitä ongelmia merkittävästi, koska hiukkaset kaasussa ovat helpompia hallita. Nestemäisiä kemikaaleja käytettäessä orgaaniset epäpuhtaudet saattavat alkaa säiliöistä ja välineistä, joita käytetään määrissä puhdistavissa operaatioissa. Orgaanisia epäpuhtauksia voidaan poistaa kohtalaisen helposti plasmapuhdistusta käyttäen. [3, s. 160.]

Kylmäplasmalaitteistolla suoritettavan pintojen esikäsitteilyn seurauksena muovien, metallien tai keraamien pintaenergiat kasvavat merkittävästi. Pinta puhdistuu huokoisten syvyyteen asti. Tällä tavalla pinnasta tulee puhdas ja aktiivinen ja sen tarttumisominaisuudet paranevat. Puhdistaminen kylmäplasmalla tuottaa ihanteelliset olosuhteet muovin, metallin tai keraamin myöhemmälle päällysteelle. Kylmäplasmakäsittely ei vaurioida käsiteltävää pintaa. [4]

4.5 Sovellukset teollisuudessa

Kylmäplasmapuhdistusta käytetään etupäässä ajoneuvoteollisuudessa esikäsitteilyvaiheena. Plasmakäsittelyä käytetään ajoneuvojen maalattavien pintojen aktivointiin ja puhdistukseen ennen maalausta. Autojen valmistuksessa käytettäviä osia voidaan puhdistaa hyvin tehokkaasti 0-potentiaalinen johdosta. Tällaisia osia ovat ilmapvirtausmittarit sekä tutka-anturit. [4]

Kylmäplasmapuhdistusta käytetään myös lentokoneiteollisuudessa komposiittiosien puhdistuksessa. Komposiittien kerrosmateriaalit koostuvat hiilikuitulujitemuovista, joista valmistetaan muoteissa osia suhteellisen korkeissa lämpötiloissa. Tässä prosessissa komposiittiosiin jää epäpuhtauksia, jotka voivat vaikuttaa maalin kiinnittymiseen tai liimausprosessiin. [4]

Kylmäplasman käytöllä voidaan esikäsitellä myös elektroniikkateollisuuden komponentteja, joissa sähkön- ja lämmönjohtokyky haittaavat valmistusprosessia. Esimerkiksi tietokoneitten osien, LCD-näyttöjen tai mikropiirien puhdistamisessa on hyödynnetty kylmäplasmaa. [4]

Lääketieteellisessä teknologiassa kylmäplasmateknologiaa käytetään steriilien pakkausten tai pintojen tuotannossa. Puhdistusmenetelmää käytetään monilla muillakin teollisuuden aloilla, kuten pakkaus, kotitalouslaite- sekä tekstiiliteollisuudessa. [4]

4.6 Edut

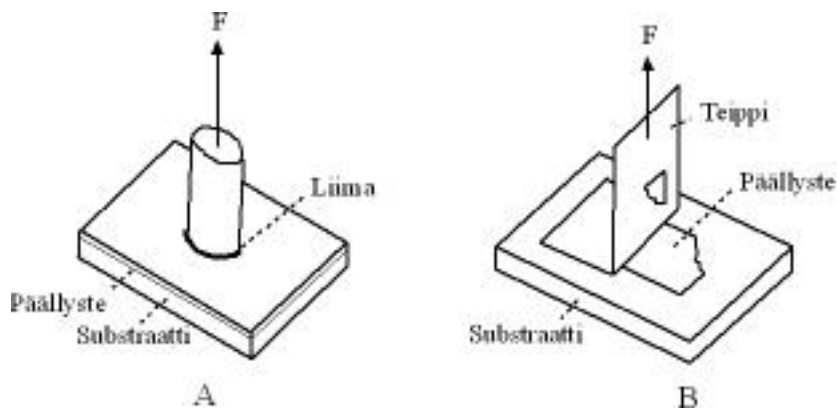
Pintojen esikäsitely kylmäplasmalla on tehokas tapa aktivoida ja puhdistaa pintoja. Plasmalaitteisto on myös hyvin helppo integroida olemassa olevaan tuotantolinjaan. Plasmajärjestelmät ovat myös ympäristöystävällisiä, tilaa säästäviä ja käyttökustannuksiltaan edullisia. Kylmäplasmapuhdistuksella voidaan liuotteiden käyttöä korvata, muun muassa bentseenin tai asetonin, joita käytetään yleisesti puhdistuksessa. Kylmäplasman käytöllä voidaan esikäsitellä myös elektroniikkateollisuuden komponentteja, joissa sähkön- ja lämmönjohtokyky haittaavat valmistusprosessia. Geometrialtaan monimutkaisille kappaleille puhdistus onnistuu myös, koska plasma tunkeutuu uurteisiin ja pieniin alueisiin hyvin. Kylmäplasmakäsittelyn pääetuna voidaan pitää materiaalin ominaisuuksien muuttumattomuutta, koska prosessissa käsiteltävällä pinnalla reagoivat vain plasman ionit. [4]

5 ADHEESIO

Adheesivoima on erilainen jokaisessa materiaalissa. Adheesiolla tarkoitetaan eri pintojen välissä olevaa vetovoimaa tai materiaalissa olevaa sisäistä voimaa, jota kutsutaan myös koheesioksi. Adheesion voimakkuuteen substraatin ja päällysteen rajapinnalla vaikuttaa eniten kemiallinen vuorovaikutus. Kemiallisessa tarttumisessa kaksi eri materiaalia kohtaa yhtymäkohdassa. Voimakkainta tarttuminen on, kun materiaalien atomit jakavat tai vaihtavat uloimpia elektrodeja. Tätä kutsutaan dispersiiviseksi. Dispersiivinen kiinnittyminen tapahtuu, kun kahden erillisen pinnan pinta-atomit muodostavat kovalenttisiä, ioni- tai vetysidoksia. Vuorovaikutusenergia kahden molekyylin kesken sisältää positiivisia ja negatiivisia latauksia. Näitä voimia kutsutaan myös van der Waalsin voimiksi. [5]

Vuorovaikutusenergia seuraa tyypillisesti atomien välimatkaa toisistaan pintavoimista riippumatta. Päällysteen ja perusaineen atomien välillä vuorovaikutusenergioiden voimat ovat heikkoja ja sitoutumisenergia on noin 0,1 eV atomiparia kohti. Plasmafysiikassa on käytännöllistä käyttää elektronivoltia yksikkönä. Elektronivolti (symboli eV) kuvaa energiamäärää ($1 \text{ eV} = 1,6021773 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Kovalenttiset metallisidokset antavat parhaimmat sidosenergiat, jotka voivat olla 1 ja 10 eV välillä. Kahden eri materiaalin välinen adheesivoima riippuu materiaalien pintaenergioista, morfologiasta sekä menetelmästä, jolla materiaalit on yhdistetty. [6]

Adheesivoima määritetään yleensä käytännön kokeilla. Kuvassa 6 on esitetty pari menetelmää.



Kuva 6. Adheesivoiman määrittämisen menetelmiä: (A) vetokoe; (B) teippikoe.

6 TERMINEN RUISKUTUS

6.1 Pintojen esikäsitteleminen

Pintojen esikäsitteilyllä on merkittävä vaikutus termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden suorituskykyyn, erityisesti niiden adheesiovoimaan substraatissa ja siten niiden suojaavaan vaikutukseen. Ruiskutettavan pinnoitteen adheesion varmistamiseksi substraatin pinta on valmistettava huolellisesti. Pinnasta on poistettava hilse, ruoste, pöly sekä muut epäpuhtaudet mekaanisella puhdistuksella. Rasvojen ja öljyjen poistamiseen voidaan käyttää kuumennus-, kastamis- ja ruiskutusprosesseja, joiden kanssa voidaan käyttää mekaanisia puhdistusmenetelmiä. Vesipohjaiset pesuliuokset tai orgaaniset liuottimet ovat sopivia käytettäväksi myös puhdistukseen. Puhdistuksen jälkeen suoritetaan raepuhallus, jolla saadaan sopivasti karhennettua ja aktivoitua sekä kasvatettua tehollista pintaa-ala kappaleen pinnalla. Raepuhalletusta pinnasta poistetaan pintarakeet ja pöly joko imuroimalla tai puhaltamalla pinta kuivalla ja öljyttömällä paineilmalla. [7, s. 98–102.]

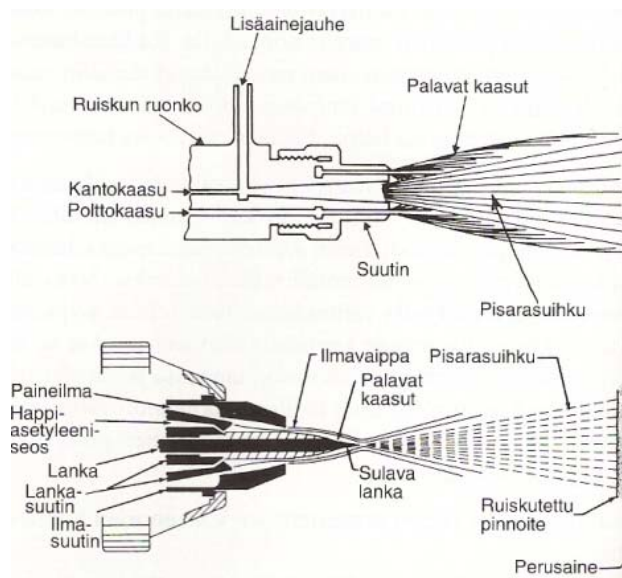
6.2 Ruiskutusmenetelmä

Terminen ruiskutus on yksi käytetyimmistä teollisesti käytetyistä teknisten pinnoitteiden valmistusmenetelmistä ja sitä voidaan hyvällä syyllä pitää monipuolisimpana pinnoitusmenetelmänä laajan pinnoitemateriaalivalikoiman ansiosta. Termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden käyttö teollisuudessa on saavuttanut paljon suosiota hyvän kulumiskestävyyden, kovuus- ja tartuntalujuuden vuoksi. [8, s. 69.]

Teromisella ruiskutuksella tarkoitetaan pinnoitusprosesseja, joissa pinnoitteen valmistamiseen käytettävä lisäaine kuumennetaan kokonaan tai osittain sulaan tilaan ruiskun sisä- tai ulkopuolella josta se kulkeutuu hienojakoisena hiukkassumuna kaasuvirtauksen avulla esikäsitellylle pinnalle. Pinnoitettavan kappaleen pinta ei sulaa prosessin aikana. Terminen ruiskutus soveltuu miltei kaikenlaisille kiinteille materiaaleille. Myös monenlaisia muoveja voidaan pinnoittaa termisellä pinnoituksella, jos käytetään asianmukaista ruiskutusprosessia ja kyseiselle materiaalille sovellettua pintakäsittelymenetelmää. Ruiskuttaa voi periaatteessa millä hyvänsä materiaalilla kunhan se ei sublimoidu valokaareissa tai plasmassa eikä hajoa kulkiessaan liekin läpi. Sularuiskutus on erityistapaus, koska siinä materiaalia käsitellään sulassa tilassa. Termisessä ruiskutuksessa käytettäviä ruiskutuspinnoitemateriaaleja ovat metallit ja metalliseokset, metallikeraamit, kovia faaseja sisältävät materiaalit, oksidikeraamit, muovit sekä useat yhdistelmäaerialit. [9, s. 10.]

Terminen ruiskutusmenetelmä voidaan jakaa työkappaleen ja pinnoitteen työlämpötilan mukaan joko kylmäpinnoitukseen tai sulautuspinnoitukseen. Tehtaässä pinnoitus kylmäpinnoitus menetelmällä, työkappaleen lämpötila ei ylitä $200\text{ }^{\circ}\text{C}$:ta. Kylmäpinnoituksessa lisäaine on sulana tai plastisessa tilassa, kun se purkautuu ruiskutuspuistolista. Pinnoite syntyy kerrosrakenteesta, jonka yksittäiset sulapisarat muodostavat jähmettyessään alustan pinnalle. Pinnoittamisen aikana pinnoite ja perusaine eivät sekoitu keskenään, minkä vuoksi käsiteltävän osan perusaineen ominaisuudet eivät muutu. Sulautuspinnoituksessa lisäaine ruiskutetaan kappaleen pinnalle yleensä liekkiruiskutusmenetelmällä. Tämän jälkeen tehdään lämpökäsittely, jossa pinnoitekerros sulautetaan eli sintrataan. Sulautuksen aikana työkappale kuumenee yleensä $1000\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen. Korkean lämpötilan vuoksi pinnoite tiivistyy ja pinnoitteen ja perusaineen välille syntyy luja metallurginen liitos. [9, s. 11.]

Termisiä ruiskutusmenetelmiä on useita. Tärkeimmät teollisessa käytössä olevat menetelmät ovat liekkiruiskutus langalla, liekkiruiskutus jauheella, kaariruiskutus, plasmaruiskutus, tyhjiöplasmaruiskutus sekä suurnopeusliekkiruiskutus eli HVOF- ja detonaatoruiskutus. Kuvassa 7 on esitetty liekkiruiskutuksen menetelmiä. [8, s. 70.]



Kuva 7. Liekkiruiskutuksen menetelmien periaatteet. [8, s. 70.]

Ruiskutusmenetelmä, millä pinnoitus halutaan tehdä, valitaan yleensä energiatuonti tavun mukaan. Kuvassa 8 on esitetty kaavio muodossa eri termisiä ruiskutusmenetelmiä energiataulun mukaan.



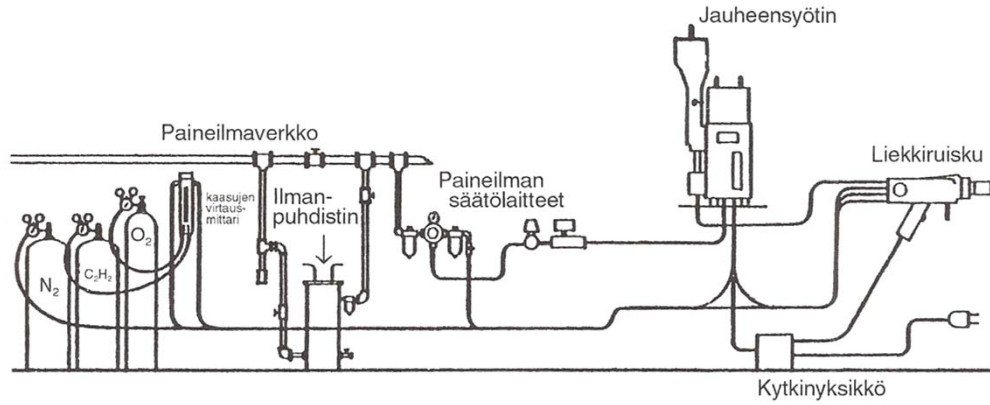
Kuva 8. Termisen ruiskutuksen menetelmiä energialähteen mukaan luokiteltuina. [10, s. 14.]

Termisen ruiskutuksen kaikissa prosesseissa käytetään teollisuuskaasuja. Pääasiassa käytetään seuraavia kaasuja:

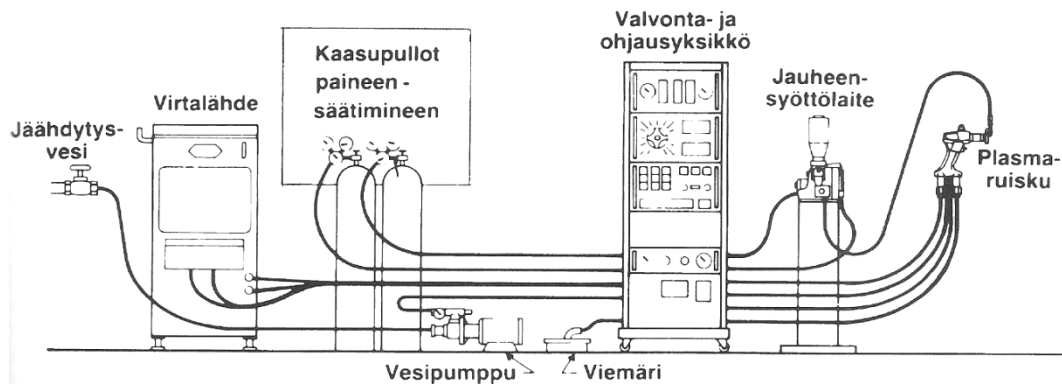
- polttokaasuna: asetyleeni (C_2H_2), propaani (C_3H_8), propeeni (C_3H_6), eteeni (C_2H_4), vety (H_2), maakaasu
- plasmakaasuna: argon (Ar), helium (He), vety (H_2), typpi (N_2) ja niiden seokset
- hapetuskaasuna: happi (O_2)
- suojakaasuna: argon (Ar), typpi (N_2)
- kiihdytys- tai hajotuskaasuna: paineilma, typpi (N_2), argon (Ar)
- jauheensyöttökaasuna: argon (Ar), typpi (N_2)
- jäähdyttäjäkaasuna: paineilma, hiilidioksidi argon (CO_2). [7, s 116–122.]

6.3 Ruiskutuslaitteistoja

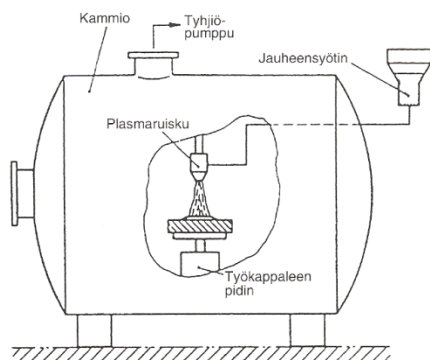
Kuvissa 9-11 on esitelty ruiskutuslaitteistoja.



Kuva 9. Jauheliiekkiruiskutuslaitteisto. [8, s. 71.]



Kuva 10. Plasmaruiskutuslaitteisto. [8, s. 73.]



Kuva 11. Tyhjiöplasmaruiskutuslaitteisto. [8, s. 73.]

7 ADHEESIOKOE

Pinnoitteiden adheesiokokeissa käytetään standardia ASTM-C633. Tämä koemenetelmä kattaa pinnoitteen kiinnittymisasteen määrittämisen. Koe koostuu perusaineen pinnan päällystämistä, jossa pinnoite saatetaan vetorasitustilaan perusaineesta. Menetelmää sovitetaan erityisesti vaativiin pinnoitteisiin, joita tuotetaan termisessä ruiskutuksessa. Koemenetelmä suoritetaan normaali lämpötilassa mutta voidaan myös suorittaa matalammassa lämpötiloissa. Menetelmää käytetään laaduntarkkailussa ja uusien termisesti ruikutettavien pinnoitteiden tartunnan kehittämisessä. Menetelmä on hyödyllinen termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden kiinnipysyvyyden lujuuksien vertaamista varten. Tämä testausmenetelmä rajoittuu kuitenkin kokeilemaan termisesti tuotettuja pinnoituksia, joiden paksuus on vähemmän kuin 0,038 mm. Rajoitus on määrätty vain jos käytetään tarttuvaa liima-ainetta kokeessa. Liima-aine pyrkii tunkeutumaan pinnoitteeseen ja saattaa mitätöidä tuloksia, jos pinnoitteet eivät ole riittävän paksuja. [11, s. 2.]

7.1 Liima-aine

Liima-aineen vaatimuksena on pystyä liittymään pinnoitteeseen, jolla on ainakin yhtä kova lujuus kuin pinnoitteen kiinnittymislujuus. Liimoja on joko huoneen lämmössä tai uunissa kovettuvia. Parhaimmat ja lujimmat liimaukset saavutetaan liimoilla, jotka kovettuvat uunissa kovassa lämpötilassa. On kuitenkin muistettava että, liimoilla jotka vaativat korkeaa lämpötilaa saattaa viskositeetti vähentyä. Liimoissa kannattaa huomioida myös liiman lujuuden heikkeneminen iän myötä. [11, s. 3.]

7.2 Vetolaitteisto

Testauksessa käytettävä kone pitää myös mukautua kokeessa tarvittaviin vaatimuksiin, joita ovat vetolujuuden tai kiinnittymisen määrittäminen. Veto pitää pystyä suorittamaan nopeudella välillä 0,013 – 0,021 mm/s. Koneessa pitää olla vetolaite, joka pystyy rekisteröimään enimmäiskuormituksen ennen kuin repeämä ilmenee. Laitteessa kuuluu olla myös itse oikenevat vetoleuat, koska pinnoitteen ja perusaineen välille ei sallita muita kuormituksia. [11, s. 2.]

7.3 Pinnoitteen esikäsittely

Pinnoitteen pinta pitää oikoa hiomalla tai koneistamalla, jos pinnoitteen paksuus on yli 0,025 mm. Ennen pinnoitteen oikomista pitää huomioida hiotaanko pinta vai koneistetaanko, koska eri pinnoitemateriaalit eivät kestä välttämättä koneistusta. Tavallisesti

pinnoite aineiden valmistajilla on suositukset julkaistuna tai saatavilla pintojen jälkikäsitteily tavasta. Suositeltava pinnan jälkikäsitteily on hiominen.

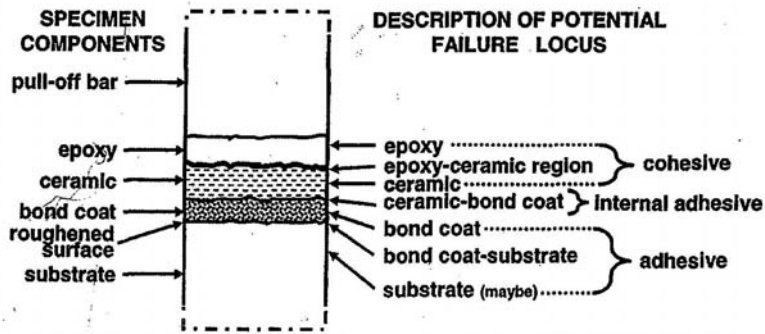
Oikomisen jälkeen pinnoitteen pinta on puhdistettava öljystä, rasvasta tai leikkuunesteistä. Pinta kannattaa puhdistaa vielä hiomalla se hiekkapaperilla. Sopiva pinnoitteen pinnankarheus valmistetaan liiman valmistajan määräyksien mukaisesti. [11, s. 5.]

7.4 Prosessi

Prosessissa ensimmäiseksi pinnoitetaan testikappaleet käyttäen termistä ruiskutusta, jonka jälkeen viimeistellään pinta tarvittaessa. Ennen liimausta valmistellaan liima sopivaksi ennen kuin liima levitetään kiinnityspäihin, jotka kiinnitetään testikappaleeseen. Kaikenvaralta kannattaa valmistaa päällystämättömiä kappaleita liima-aineen kiinnitysvahvuuden mittauksen varalta tässä vaiheessa. Liiman kuivumisen jälkeen suoritetaan pinnoitteen irtivetäminen testikappaleista kunnes kappaleet repeävät toisistaan. Enimmäiskuormitus pitää muistaa kirjata ylös. [11, s. 5.]

7.5 Tuloksien tulkintaa

Minkä tahansa tuloksien tulkinta riippuu tarkoituksesta tämän koemenetelmän käyttämiselle ja epäonnistumiselle. Kiinnittyminen tai lujuusarvo edustaa heikointa osaa pinnoitteesta tai rajapinnassa. Kiinnittymislujuus annetaan pinnoitteelle, joka on kokonaan pinnoitteen tai perusaineen rajapinnassa. Pinnoitteelle annetaan lujuus jos repeämä on vain pinnoitteen sisällä. Liima-aineen pettäminen saattaa olla myös tyydyttävä tulos laaduntarkkailukokeessa. Liima-aineen lujuus yleensä tämänlaisessa kokeessa pitää olla suurempi kuin vaadittava kiinnipysyvyys lujuus pinnoitteella. Tuloksissa pitää muistaa huomioida uuden tyyppiset liimat, koska tyyppillisesti lujuus termisesti ruiskutettuihin pinnoituksiin saattaa vaihdella 55 MPa:n molemmin puolin riippuen pinnoitemateriaalista. [11, s. 5.]

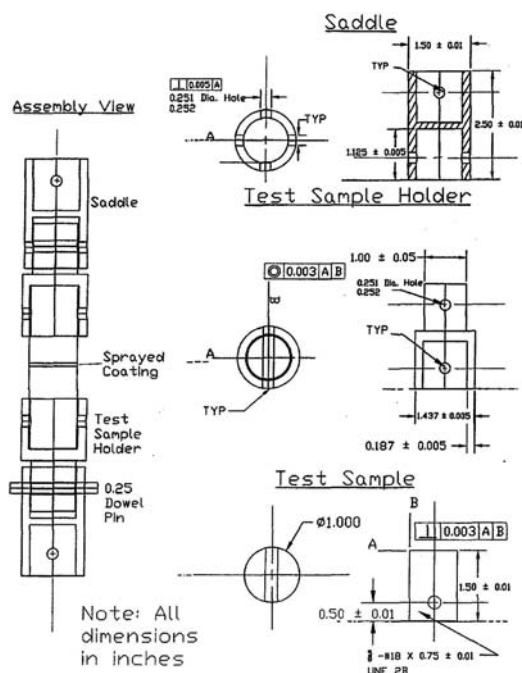


Kuva 12. Eri kerroksien nimeäminen ja potentiaalinen kuvaus epäonnistumisen alueista liimauksen aikana. [11, s. 5.]

7.6 Raportointi

Adheesiokokeesta tehtävä raportti pitää sisällään seuraavanlaisia asioita:

- pinnoitemateriaali ja terminen ruiskutusmenetelmä sekä ruiskutusparametrit
- ruiskutetun pinnoitteen paksuus
- perusmateriaali
- perusmateriaalin pinnan valmistamisen tarkka selvitys
- testikappaleiden määrä ja selvitys tutkimuksesta
- jokaisesta tehdystä näytteestä otettava enimmäislujuus mitta
- keskimääräinen kiinnittyminen ja lujuuden maksimi sekä minimiarvot MPa
- epäonnistumisen kuvaus pinnoitteen ja perusaineen rajapinnassa, pinnoitteessa tai liimassa tapahtuneesta virheestä
- liiman testaus perusmateriaalilla. [11, s. 6.]



Kuva 13. Geometria adheesiokokeesta. [11, s. 7.]

8 TYÖSSÄ KÄYTETTYJÄ AINEITA JA MENETELMIÄ

8.1 Pinnoitejauhe

Työssä käytetään pinnoitejauheena WOKA (volframikarbidi) 3653:sta, joka soveltuu hyvin termiseen ruiskutukseen. Kemialliselta koostumukseltaan jauhe on volframia sekä hiiltä (C) 5,1–5,8 %, kobolttia (Co) 9–10,5 %, kromia (Cr) 3,5–4,5 % ja rautaa <0,3 %. Jauhepartikkeleiden morfologia on pallonmuotoista ja kooltaan $45 \pm 11 \mu\text{m}$. Jauhetta sovelletaan yleisesti HVOF-ruiskutusprosesseissa. Jauheen standardi on EN 1274–11.20. [12, s. 7.]

Pinnoitejauheessa oleva volframi muodostaa hiilen kanssa kovia karbideja. Seosaineena hiili lisää lujuutta ja samalla heikentää iskusitkeyttä. Kobolttia taas käytetään sideaineena, koska se lisää sitkeyttä ja lujuutta. Kromi antaa seokselle kromikarbidia. Rautaa tarvitaan pelkästään seostamiseen. [13, s. 20, 29, 34.]

8.2 Liima

Työssä käytetään HTK ULTRA BOND epoksihartsiliima-ainetta. Liiman tartuntalujuus määräytyy DIN 50160:n mukaan. Liima tarttuu hyvin metalleihin, keraameihin sekä muoveihin. Liiman lujuus on 100 MPa. [14]

Ennen liimausta liiman valmistajan antamien ohjeiden mukaan liimattavat osat pitää olla puhtaita ja pinnat mekaanisesti valmistettuja. Rasvanpoistoon voidaan käyttää acetonia, metyleenikloridia tai trikolorietaania. Mekaanisessa pintojen valmistuksessa voidaan käyttää hiekkapaperia. [14]

Paras liimauslujuus saavutetaan 80 minuutissa $150 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa, 50 minuutissa $180 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa tai 35 minuutissa $190 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa. Liimauslujuus riippuu pinnoitemateriaalista ja pinnankarheudesta. Paras lujuus saavutetaan, kun pinnankarheus $R_t = 30 \mu\text{m}$ ja puristuspainetta on 70 N/cm^2 . [14]

8.3 Kylmäplasmapuhdistus

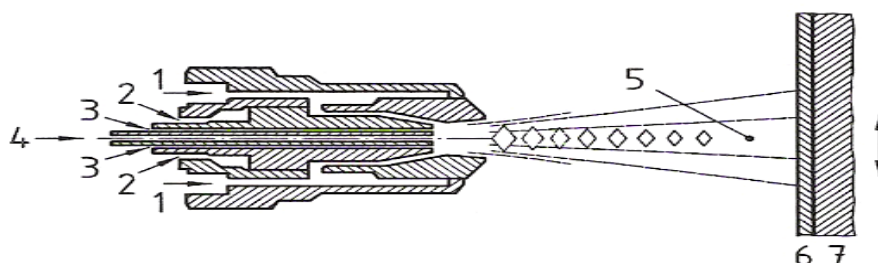
Plasmajärjestelmän tärkeimmät osat ovat plasmasuutin ja generaattori. Plasmasuutin, joka on suunnattu aineelliseen syöttöön, kehittää ja levittää plasmaa. Plasma generoidaan suuttimen sisällä suurjännitteellä staattorin ja roottorin välillä ja räjäytetään ulkona suuttimen välityksellä käyttökaasun avulla. [4]

Generaattori kehittää lyhytkestoisen ja positiivisen tai negatiivisen pulssijännitteen. Generaattori tuottaa alkuperäistä jännitettä ja hallitsee esikäsitteilyasemia sekä kontrollifunktioita. Operaattorin ohjausjärjestelmä ja tallennettu ohjelman kontrolli sijaitsevat generaattorissa. [4]

8.4 HVOF-ruiskutus

Tässä työssä termisesti ruikutetut pinnoitteet valmistetaan HVOF-ruiskutuksella eli suurnopeusliekkiruiskutuksella käyttäen kaasumaista polttoainetta. HVOF-ruiskutusprosessissa on tyypillistä suuri ruiskutettavan materiaalin lentonopeus, joka saavutetaan rakettimootorin kaltaisella sisäisellä poltolla paineistetussa kammiossa, jossa poltetaan hapen ja polttoaineena käytetyn kaasunseosta. Polttoaineena voidaan käyttää vetyä, asetyleeniä, propaania, propyleeniä tai metyyliasetyleeni-propadieenia. Polttokammiossa palaminen nostaa kaasun lämpötilaa ja painetta. Polttokammion ja ruiskun ulkopuolisen ilmatilan välinen paine-ero saa kaasun lentämään ruiskusta noin 1500–2000 m/s riippuen ruiskun mallista. [15, s. 10.]

Ruiskutettava jauhe syötetään polttokammion kautta kiihdytysputkeen. Polttokammiossa ja sitä seuraavassa kiihdytysputkessa jauhe alkaa sulaa. Kiihdytysputkessa partikkelien sulaminen jatkuu ja ne saavuttavat maksiminopeutensa. Sulaneet ja jähmeät partikkelit lentävät palokammion palokaasujen antaman kineettisen energian vaikutuksesta nopeasti kiihdytysputken läpi ja ulos suuaukosta. Sula tai jähmeä partikkeli lentää ruiskun suuaukosta kappaleen pintaan huoneilman läpi, jolloin partikkelit alkavat jäähtyä. Ulos purkautuva kaasuliekki suojaa ja lämmittää edelleen partikkeliä joitakin senttejä suuaukon ulkopuolella. Kappaleen pinnalla törmäyksen vaikutuksesta partikkeli lämpee hieman ja muokkautuu tiiviisti kappaleen pinnalle. [15, s. 10.] Kuvassa 14 on esitetty suurnopeusliekkiruiskutus kaasumaisella polttoaineella.



Kuva 14. Suurnopeusliekkiruiskutus kaasumaisella polttoaineella. 1 Paineilma, 2 Polttokaasu, 3 Happi, 4 Jauhe ja kantajakaasu, 5 Pinnoitesuihku, 6 Pinnoitekerrostuma, 7 Perusaine. [7, s. 36.]

9 TYÖN SUORITUS JA TULOKSIA

9.1 Tutkimussovellukset

Tutkimukset opinnäytetyössä on suunniteltu TTY:n, Kuopion Konepaja Oy:n ja Savonia-ammattikorkeakoulun kanssa. Perusaineena testikappaleissa käytettiin hiiliteräs S355:sta. Suoritettava pinnoitus testikappaleille on HVOF Woka 3653 paksuudeltaan 0,2 mm. Työssä oli kolme erilaista tutkimus sovellutusta:

1. Pinnan raepuhallus ja pinnoitus välittömästi. Toinen ilman plasmakäsittelyä ja toinen plasmakäsiteltyinä
2. Pinnan raepuhallus ja pinnoitus 2 vuorokauden kuluttua. Toinen ilman plasmakäsittelyä ja toinen plasmakäsiteltyinä ennen pinnoitusta
3. Pinnan raepuhallus ja pinnoitus 7 vuorokauden kuluttua. Toinen ilman plasmakäsittelyä ja toinen plasmakäsiteltyinä ennen pinnoitusta.

Kaikkia sarjoja tehtiin 2 kappaletta. Testikappaleista tehtiin adheesiokoe, jossa selvitettiin plasmakäsittelyn vaikutusta pinnoitteen kiinnipysyvyyteen ja mahdollisen oksidikerroksen vaikutusta kiinnipysyvyyden kannalta. Toinen sarja analysoitiin Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriossa ja toinen TTY:n Materiaaliopin laboratoriossa. Perusaineen profiili raepuhallettiin samanlaiseksi kaikista testikappaleista.

9.2 Testikappaleet ja niiden esivalmistelu

Pinnoitteiden adheesiokokeissa käytettiin halkaisijaltaan 25 mm ja paksuudeltaan 8 mm mitoiltaan olevia teräs kappaleita, joita oli yhteensä 12 kappaletta.

Kappaleet merkittiin stanssilla tunnistamisen helpottamiseksi. Kappaleisiin lyötiin tunnistenumerot oksidoitumis päivien mukaan (0.1, 0.2, 2.1, 2.2, 7.1 ja 7.2) kaksi samanlaista sarjaa.

Ruiskutetun pinnoitteen tarvittavan adheesion varmistamiseksi substraatti puhdistettiin huolellisesti poistamalla lika ja rasva sekä muut epäpuhtaudet ennen raepuhallusta käyttäen mekaanista puhdistusta. Testikappaleet raepuhallettiin suunnitelmaa noudattaen Kuopion Konepajan tuotantotilassa erityisessä raepuhalluskaapissa, jossa käytettiin alumiinioksidia pinnankarhentamiseen. Raepuhalluksella saatiin metallipinta sopivasti karhennettua ja aktivoitua sekä samalla kasvatettua tehollista pinta-alaa.

9.3 Kylmäplasmapuhdistus ja ruiskupinnoitus

Atmosfäärinen kylmäplasmapuhdistus suoritettiin FG5001 RD 1004 plasmasuuttimella varustetulla laitteella käyttämällä käyttökaasuna paineilmaa Kuopion Konepajan tuotantotilassa. Ennen plasmakäsittelyä testikappaleet hitsattiin pyöritysjiini kiinni. Hitsaus suoritettiin TIG-hitsaamalla. Testikappaleiden puhdistus suoritettiin pitämällä pyöritysjiiniä käsissä ja käyttämällä puhdistettavia testikappaleita noin kahden senttimetrin päässä plasmaliekistä viiden sekunnin ajan. Kuvassa 15 on plasmapuhdistuksessa käytetty laite.

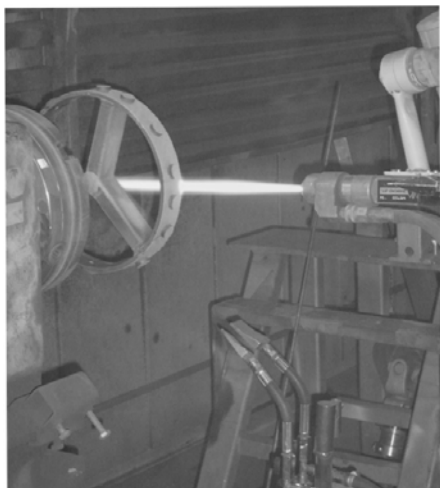


Kuva 15. FG5001kylmäplasmalaitteisto varustettuna RD1004 plasmasuuttimella.

Puhdistuksen jälkeen pyöritysjiini kiinnitettiin ruiskutuskopissa olevaan sorviin ruiskutusta varten. Ruiskutus suoritettiin Sulzer Metco DJ-hybrid 2700 ruiskulla käyttäen polttoaineena propaania. Taulukossa 1 on merkitty ruiskutuksessa käytetyt parametrit ja kuvassa 16 on esitetty ruiskutusprosessi.

Taulukko 1. Ruiskutusparametrit.

Happi	57 psi
Propaani	34.2 psi
Paineilma	48 psi
Jauheensyöttö	90 g/min
Ruiskutusetäisyys	220 mm
Kappaleen lämpötila	125 °C
Kappaleen pyörimisnopeus	120 m/min
Nousu ruiskutuksessa	4 mm/rpm
Pyyhkäisykerrat	30



Kuva 16. HVOF-ruiskutus testikappaleille.

9.4 Adheesiokokeet pinnoitteille

Standardista poiketen testikappaleisiin ei tehty kierrettä pinnoitteen vastapuolelle testikappaleeseen, koska vetosauvan kiinnitykseen päätettiin käyttää liimausta. Testikappaleen molemmille puolille sorvattiin vetosauvat, jotka liimattiin kiinni. Pinnoitteen puolelle sorvattiin vetosauvaan halkaisijaltaan 18 mm oleva kantaosa ja testikappaleen toiselle puolelle 25 mm kantaosa. Tällä tavoin varmistettiin vetosauvan irtoaminen vedon aikana.

Testikappaleiden ja vetosauvojen liimauksen onnistumiseksi suunniteltiin puristin. Puristin kehiteltiin mahdollisimman yksinkertaiseksi käyttämällä jousimenetelmää puristusvoiman saamiseksi. Jousena käytettiin auton venttiilijousta. Lisäksi koneistettiin ohjainholkit, joista yksi kiinnitettiin puristimen runkoon ja toiset holkit jousen molempiin päihin. Näin puristettavat kappaleet saatiin asetettua hyvin toisiaan vasten. Kiristysvoimakkuutta säädettiin kierremekanismilla. Jousen puristusvoimakkuus mitattiin tavallisella henkilövaakalla painamalla venttiilijousta käsin vaakaa vasten ja mittaamalla jousen puristuminen työntömitalla. Puristimia valmistettiin kaksi kappaletta.

Ennen testikappaleiden liimausta liimattavat pinnat hiottiin huolellisesti. Puhdistuksen jälkeen liima levitettiin tasaisesti liimattavalle pinnalle. Liiman laiton jälkeen aseteltiin liimattavat kappaleet oikeille paikoilleen puristimeen ja kiristettiin oikea kiristysvoimakkuus. Tämä prosessi on esitetty kuvassa 17. Testikappaleet siirrettiin seuraavaksi kuivumaan uuniin, jonka lämpötila oli 180 °C:tta. Kappaleita pidettiin uunissa 50 minuuttia.



Kuva 17. Liimauksessa olevia kappaleita puristimissa.

Liimattuja kappaleita irroteltiin Matertest-vetolaitteella, jonka toiminta perustui hydrauliseen vetoon. Vetoprosessissa vedettävä kappale kiinnitettiin leukojen väliin. Laite veti vetosauvoja erilleen niin kauan, kunnes vetosauva irtosi testikappaleesta. Kone tallensi tietokoneelle enimmäiskuormituksen. Ohjelma laski myös suurimman lujuuden. Taulukossa 2 on esitettyä vetokokeen tuloksia.

Taulukko 2. Vetämisen tulokset.

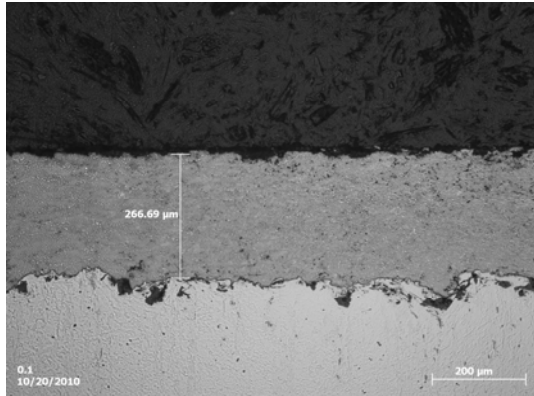
Koekappale	Suurin voima kN	Lujuus MPa
0.1	10,56	41,5
0.2	13,36	52,5
2.1	11,52	45,3
2.2	9,50	37,3
7.1	10,10	39,7
7.2	13,31	52,3

9.5 Optiset mikroskooppitutkimukset

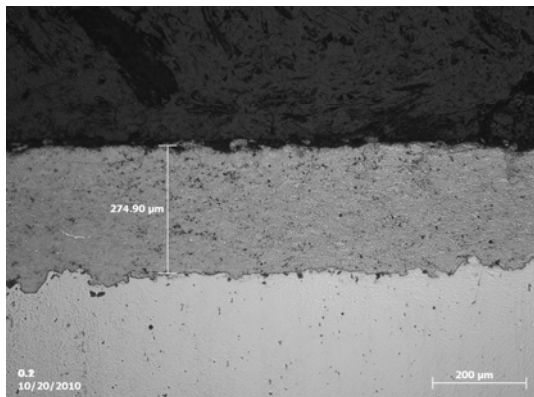
Optisia mikroskooppitutkimuksia varten testikappaleet jouduttiin halkaisemaan kahtia, koska testikappaleista otettiin poikkileikkauskuvat. Ennen halkaisuprosessia koneistettiin jigi, johon testikappaleet laitettiin halkaisun ajaksi. Halkaisun jälkeen testikappaleiden halkaistut pinnat hiottiin pöytämallisella tasohiomakoneella.

Seuraavaksi testikappaleet valettiin muottiin. Valamiskoneena käytettiin Buehler Simplimet 1000 -valamisautomaattia ja valamisaineena Buehler Bakelite Powder -merkkistä jauhetta. Muoteissa olevista testikappaleista kiillotettiin hiet ennen kuin niitä alettiin tutkimaan optisella mikroskoopilla. Koululla tehtyjen tutkimuksien jälkeen hiet lähetettiin TTY:lle tutkittaviksi. TTY:llä testikappaleista otettiin poikkileikkauskuvat, joista

voitiin tarkastella pinnoitteiden paksuutta ja huokoisuutta sekä mahdollista kylmäplasman vaikutusta. Kuvissa 18 ja 19 olevat poikkileikkaukset pinnoitteesta on otettu optisella mikroskoopilla 10-kertaisella suurennoksella. Koulun konelaboratoriossa tutkittiin ja kuvattiin ruiskutuksessa käytetyn volframikarbidi jauheen partikkelikokoja käyttäen 50-kertaista suurennosta (kuva 20).



Kuva 18. HVOF-menetelmällä valmistetun WC-Co-Cr -pinnoitteen poikkileikkaus optisella mikroskoopilla kuvattuna 0.1 testikappaleesta. Kuva otettu TTY:n Materiaalitekniikan laboratoriossa.



Kuva 19. HVOF-menetelmällä valmistetun WC-Co-Cr -pinnoitteen poikkileikkaus optisella mikroskoopilla kuvattuna 0.2 testikappaleesta. Kuva otettu TTY:n Materiaalitekniikan laboratoriossa.

Yllä olevien kuvien rajapinnalla näkyvät tummat kohdat ovat pinnan karhennuksesta jääneitä alumiinioksidipartikkeleita. Pinnoitteen pienet tummat pisteet ovat huokosia. WC-karbidit ovat kooltaan luokkaa 1 - 5 µm.

10 TULOSTEN ANALYSOINTI

Testikappaleiden adheesiokokeiden tulosten vertailuna voidaan käyttää TTY:llä tehtyjä tutkimuksia, jotka on suorittanut tohtoritutkija Kari Niemi. Tutkittavat testikappaleet on valmistettu lähes samoissa olosuhteissa, joten tuloksien vertailu on realistista. Koululla tehdyistä adheesiokokeiden tuloksista voidaan todeta että liimaliitokset eivät ole kestäneet toivotulla tavalla. Liimaliitokset ovat pettäneet pinnoitteen pinnasta. Liimaliitosten lujuudet vaihtelivat 52,5 MPa:n ja 37,2 MPa:n välillä. Keskiarvona liimaliitosten lujuus oli 44,7 MPa. Lujuuserot johtuvat pinnoitteiden pinnankarheuseroista sekä mahdollisesti jonkin verran liimauspuristuksen voimakkuuserosta ja kappaleen pitoasennosta uunissa. Liiman lujuus testattiin myös liimaamalla perusmateriaalit vastakkain, jolloin tulokseksi saatiin 89 MPa.

Kari Niemen tekemissä tutkimuksissa adheesiolujuus kaikilla pinnoitteilla oli yli 80 MPa ja liimaliitoksen lujuus pinnoitteiden pinnassa on ollut pienempi kuin pinnoitteen tartunta-alustassa.

Poikkileikkauskuvista ilmeni, että pinnoitetta ei ole lähtenyt irti liimavetokokeen aikana, koska pinnoitteet olivat lähes yhtä paksuja jokaisessa testikappaleessa. Plasmakäsitteltyjen kappaleiden rajapinnat ovat puhtaamman näköisiä kuin käsittelemättömien kappaleiden. Kylmäplasmakäsittely on poistanut pinnan karhennuksesta jääneitä epäorgaanisia epäpuhtauksia, mutta ei ole pystynyt irrottamaan pintaa syvemmälle tunkeutuneita alumiinioksidipartikkeleita. Mikrorakenne pinnoitteen ja substraatin rajapinnassa on lähes samanlainen, joten kylmäplasma ei ole vaikuttanut pinnoitteen levinneisyyteen.

Kokeissa käytetyn WOKA 3653 -pinnoitejauheen partikkelikoot poikkesivat jauhetoimittajan antamista arvoista. Partikkelikokojakauma pitäisi olla jauhetoimittajan mukaan $45 \pm 11 \mu\text{m}$. Partikkeleiden suurin koko oli $51,81 \mu\text{m}$ ja pienin $22,87 \mu\text{m}$, joten partikkelikoot eivät ole vaikuttaneet pinnoitteen mikrorakenteeseen, vaikkakin pienin partikkelikoko on alle sallitun arvon. Sulamisaste saattaa jäädä pienimmillä partikkeleilla liian korkeaksi, eli jauheen viipymäaika liekissä on liian pitkä, mistä seuraa partikkelin liika sulaminen, ennen kuin partikkeli kohtaa substraatin.

11 YHTEENVETO

Opinnäytetyöprosessi kokonaisuudessaan oli haastava, koska kylmäplasma puhdistuksen vaikutusta pinnoitteen kiinnipysyvyyteen termisessä ruiskutuksessa ei ole aikaisemmin tutkittu.

Tutkimuksissa havaittiin, että kaikkien testikappaleiden pinnoitteet olivat hyvin kiinni substraatissa. Volframikarbidipinnoitteiden irti saaminen liimavetokokeella on vaikeaa, koska HVOF-menetelmällä ruiskutettuna pinnoite tarttuu yli 80 MPa:n lujuudella substraattiin. Adheesiokokeilla ei pystytty määrittämään todellista adheesiolujuutta, koska liimaliitokset pettivät liian aikaisessa vaiheessa. Poikkileikkauksista ilmeni kylmäplasmakäsittelyllä olevan vaikutusta substraatin ja pinnoitteen rajapinnan puhtauteen.

Tällä työllä ei vielä voinut todistaa kylmäplasma puhdistuksella saatavaa etua HVOF-ruiskutusmenetelmällä tehtyjen pinnoitteiden kiinnipysyvyydestä, mutta tutkimustyötä kannattaisi kuitenkin jatkaa. Esimerkiksi voisi tutkia kylmäplasman vaikutusta korroosioon määrittämällä korroosiopotentiaalin sekä tehdä korroosiokokeita suolasumu-kaapissa. Lisäksi kylmäplasma puhdistusta kannattaisi kokeilla muilla käyttökaasuilla, kuten argonilla ja typellä, koska näillä kaasuilla voi olla vaikutusta pinnoitteiden tarttuvuuteen sekä korroosio-ominaisuuksiin. Kylmäplasma puhdistusta voisi kokeilla myös eri substraateille kuin S355 teräkselle sekä käyttää eri pinnoiteaineita ruiskutuksessa.

LÄHTEET

- 1 Kuopion Konepaja Oy. (2010). <http://www.kuopionkonepaja.fi/> [online].
- 2 Tampereen Teknillinen Yliopisto. (2010). <http://www.tut.fi/public/> [online].
- 3 Grill, Alfred. (1994). *Cold Plasma in Materials Fabrication, from fundamentals to applications*.
- 4 Kylmäplasmalaitteisto. (2010). <http://www.plasmamatreat.com/> [online].
- 5 Kendall, K. (1994). *Adhesion: Molecules and Mechanics*. Vol. 263 no. 5154 pp. 1720-1725.
- 6 B.E.N. Chapman, J.(1974). *Adhesion*. Vac. Sci. Technol. 11, 106.
- 7 Suomen standardisoimisliitto SFS. (2005). Metalliset ja muut epäorgaaniset pinnoitteet. Osa 3: Terminen ruiskutus.
- 8 Tunturi, Pirjo., Tunturi Pekka. (1999). *Metallien pinnoitteet ja pintakäsittelyt*. Metalliteollisuuden keskusliiton julkaisu nro 3.
- 9 Korhonen, Arto. (2004). Termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden kulumiskestävyyksien vertailu. Insinööriyö. Konetekniikan koulutusohjelma. Savonia-AMK, tekniikka, Kuopio.
- 10 TS-klubin seminaari. 08.01.2008, TTY Tampere. Termisen ruiskutuksen menetelmiä energialähteen mukaan luokiteltuina. [online, PDF].
- 11 ASTM C633-01. (2008) Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings. [online, PDF].
- 12 EN 1274 - 11.20. (2010). WOKA Thermal Spray Carbides_200602. [online, PDF].
- 13 Lepola, Pertti., Makkonen, Matti. (2003). *Materiaalit ja niiden käyttö*. WSOY- konetekniikka, Vantaa.
- 14 HTK ULTRA BOND.(2010). <http://www.htkhamburg.com/eng/pdf/ultrabond>. [online, PDF].
- 15 Korpiola, Kari., Jokinen, Petri. (2000). *Keraamipinnoitteiden valmistus HVOF-ruiskutuksella*. VTT-tiedote 2020. VTT Valmistustekniikka.



KOETULOKSET



Vetokoeohjelma FMT-ProgSys 8.0 T/TCB
MATERTEST OY

Aineenkoetuslaitteet ja testaussynterijärjestelmät.

Koekappaleryhmän yleiset tiedot

Vetokoe
 6 kappaletta

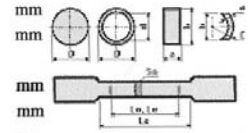
Tilaus Opinnäytetyö
 Erä 1
 Koekappale 1
 Huom Koekappale 0.1

Pinnoitteiden vetokoe

Koestuspäivä 16.8.2010
 Koestaja Pasi Seppänen

Syöttötiedot

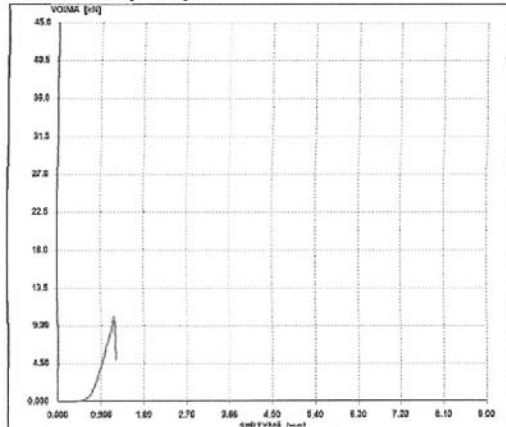
a	12,00	mm	Koepituus	Lc	100,00	mm
b	40,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,0	mm
D	18,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,0	mm
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,0	mm
Pinta-ala	So 254,47	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisija	Du	18,00	mm



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	10,557	kN	Kimmokerroin	E	3 160	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	41,5	N/mm ²	Korrelaatio		1,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 %	0,0 N/mm ²
		0,000000		Koeaika			s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokouroma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä



**KOETULOKSET**

Vetokoeohjelma FMT-ProgSys 8.0 T/TCB
MATERTEST OY

Aineenkoetuslaitteet ja testaussyinterijärjestelmät

Koekappaleryhmän yleiset tiedot

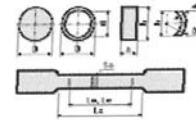
Vetokoe
 6 kappaletta

Tilaus Opinnäytetyö
 Erä 1
 Koekappale 2
 Huom Koekappale 0.2

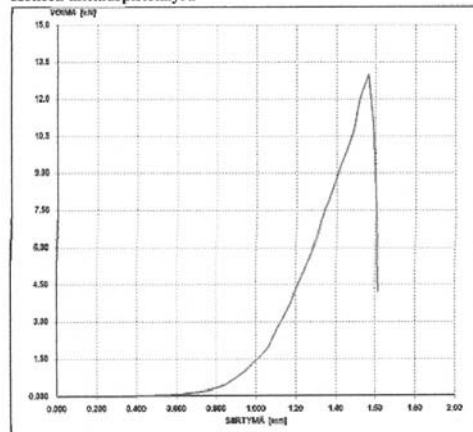
Koestuspäivä 16.8.2010
 Koestaja Pasi Seppänen

Pinnoitteiden vetokoe**Syöttötiedot**

a	12,00	mm	Koepituus	Lc	100,00	mm	
b	40,00	mm	Murtovenymä	alkumittapituus	Lo	0,0	mm
D	18,00	mm		loppumittapituus	Lu	0,0	mm
d	0,00	mm	Venymäanturi	alkumittapituus	Le	0,0	mm
Pinta-ala	So	254,47	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	18,00	mm

**Lopputulokset**

Suurin voima	Fm	13,359	kN	Kimmokerroin	E	3 337	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	52,5	N/mm ²	Korrelaatio		0,99	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika			s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokourouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä



KOETULOKSET



Vetokoeohjelma FMT-ProgSys 8.0 T/TCB

MATERTEST OY

Aineenkoetuslaitteet ja testaussyinterijärjestelmät

Koekappaleryhmän yleiset tiedot

Vetokoe
6 kappaletta

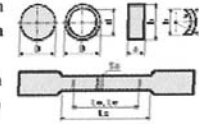
Tilaus Opinnäytetyö
Erä 1
Koekappale 3
Huom Koekappale 2.1

Pinnoitteiden vetokoe

Koestuspäivä 16.8.2010
Koestaja Pasi Seppänen

Syöttötiedot

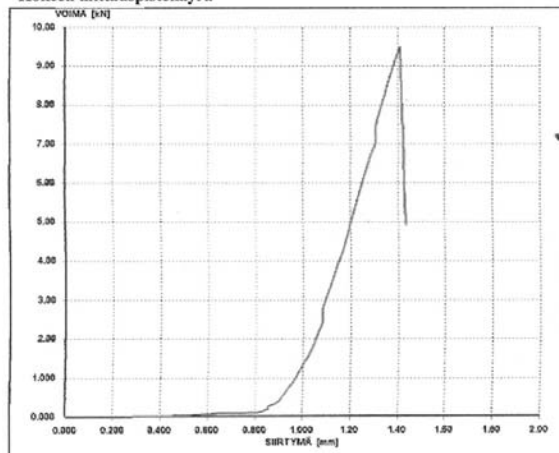
a	12,00	mm	Koepituus	Lc	100,00	mm
b	40,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,0	mm
D	18,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,0	mm
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,0	mm
Pinta-ala	So 254,47	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	18,00	mm



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	11,517	kN	Kimmokerroin	E	5659	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	45,3	N/mm ²	Korrelaatio		1,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00	N/mm ²
		0,000000		Koeaika			s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokouroma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä





KOETULOKSET



Vetokoeohjelma FMT-ProgSys 8.0 T/TCB
MATERTEST OY
 Aineenkoetuslaitteet ja testaussynterijärjestelmät

Koekappaleryhmän yleiset tiedot

Pinnoitteiden vetokoe

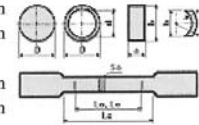
Vetokoe
 6 kappaletta

Tilaus Opinnäytetyö
 Erä 1
 Koekappale 4
 Huom Koekappale 2.2

Koestuspäivä 16.8.2010
 Koestaja Pasi Seppänen

Syöttötiedot

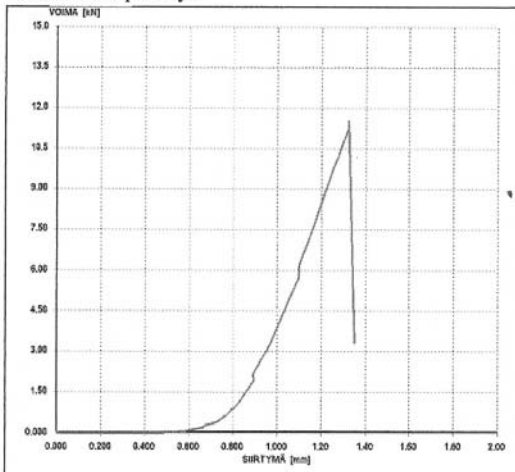
a	12,00	mm	Koepituus	Lc	100,00	mm	
b	40,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,0	mm	
D	18,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,0	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,0	mm	
Pinta-ala	So	254,47	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	18,00	mm



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	9,502	kN	Kimmokerroin	E	1 888	10 ⁹ N/mm ²
Lujuus	Rm	37,3	N/mm ²	Korrelaatio		0,99	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika			s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokuruuma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä



**KOETULOKSET**

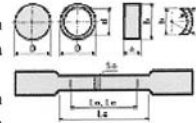
Vetokoeohjelma FMT-ProgSys 8.0 T/TCB

MATERTEST OY

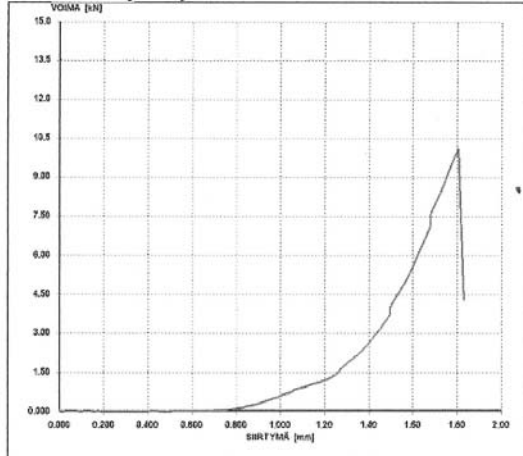
Aineenkoetuslaitteet ja testaussyinterijärjestelmät

Koekappaleryhmän yleiset tiedotVetokoe
6 kappalettaTilaus Opinnäytetyö
Erä 1
Kokkappale 5
Huom Koekappale 7.1**Pinnoitteiden vetokoe**Koestuspäivä 16.8.2010
Koestaja Pasi Seppänen**Syöttötiedot**

a	12,00	mm	Koepituus	Lc	100,00	mm	
b	40,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,0	mm	
D	18,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,0	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,0	mm	
Pinta-ala	So	254,47	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	18,00	mm

**Lopputulokset**

Suurin voima	Fm	10,096	kN	Kimmokerroin	E	1 780	10 ⁹ N/mm ²
Lujuus	Rm	39,7	N/mm ²	Korrelaatio		0,98	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika			s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokouroma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä



KOETULOKSET



Vetokoeohjelma FMT-ProgSys 8.0 T/TCB

MATERTEST OY

Aineenkoetuslaitteet ja testaussynterijärjestelmät

Koekappaleryhmän yleiset tiedot

Vetokoe
6 kappaletta

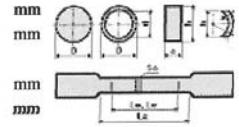
Tilaus Opinnäytetyö
Erä 1
Koekappale 6
Huom Koekappale 7.2

Pinnoitteiden vetokoe

Koestuspäivä 16.8.2010
Koestaja Pasi Seppänen

Syöttötiedot

a	12,00	mm	Koepituus	Lc	100,00	mm
b	40,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	0,0	mm
D	18,00	mm	loppumittapituus	Lu	0,0	mm
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,0	mm
Pinta-ala	So 254,47	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	18,00	mm



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	13,310	kN	Kimmokerroin	E	3 324	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	52,3	N/mm ²	Korrelaatio		0,99	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika			s
		0,000000		Murtovenymä	A	0,0	%
				Murtokurouma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä

