

RUISKUVALUMUOTIN LÄMPÖKUVAUS JA PINNOITTAMINEN

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Muovitekniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2010
Tommi Miettinen

Lahden ammattikorkeakoulu
Muovitekniikka

TOMMI MIETTINEN: Ruiskuvalumuotin lämpökuvaus ja pinnoittaminen

Muovitekniikan opinnäytetyö, 25 sivua, 0 liitesivua

Kevät 2010

TIIVISTELMÄ

Tämän työn aiheena oli ruiskuvalukoneen muotin pinnoittaminen ja sen lämpökuvaaminen. Työn tarkoituksena oli löytää muotille optimaalinen pinnoite, jotta sitä pystyttäisiin kuvaamaan lämpökameralla paremmin ja tutkimaan lämpökuvien avulla muotin lämpötilajakaumia ruiskuvaluprosessin eri vaiheissa. Ruiskuvalumuotin lämpökuvaaminen ja kunnollisten lämpökuvien saaminen on ollut hankalaa varsinkin korkeissa lämpötiloissa, koska muotin metallipinta on kiiltävä. Muotin onnistuneen lämpökuvauksen avulla prosessista saataisiin arvokasta tietoa ja näin kehitettyä prosessia.

Muottiteräksen lisäksi pinnoitettavaksi materiaaliksi valittiin myös kuparia. Pinnoitusmenetelmiksi teräkselle päädyttiin valitsemaan termisiin ruiskutusmenetelmiin perustuva sinkkiruiskutus kaariruiskutusmenetelmällä, kuulapuhallus ja raepuhallus. Kuparin pinnoitusmenetelmissä taas päädyttiin kuulapuhallukseen, oksidointiin sekä kahteen edellä mainittuun yhdessä. Lisäksi mukana kokeessa olivat myös puhdas teräs ja kupari. Pinnoitusten teon jälkeen kappaleet siirrettiin kiertoilmauniin, jossa niitä lämmitettiin lämpökuvausta varten. Uunia lämmitettiin tiettyihin lämpötiloihin ja kappaleista otettiin lämpökuva joka lämpötilassa. Kuvien ottamisen jälkeen ne siirrettiin tietokoneelle ja kappaleista selvitettiin niiden emissiivisyydet eri lämpötiloissa tietokoneohjelman avulla.

Saaduista emissiivisyysarvoista tehtiin taulukko sekä kuvaaja joista voitiin arvioida eri pinnoitusten soveltuvuutta ruiskuvalumuottiin lämpökuvausta ajatellen. Muottiin sopivalla pinnoitteella tuli olla ensisijaisesti korkea emissiivisyysarvo. Arvon täytyi olla korkea, koska pinnasta, jossa on korkea emissiivisyysarvo saa helpommin ja parempia lämpökuvia, kuin emissiivisyydeltään matalammasta. Parhaimmat emissiivisyydet käsitellyissä kappaleissa olivat teräskappaleista raepuhalletulla ja kuparikappaleista kappaleessa jolle tehtiin sekä kuulapuhallus että oksidointi. Näistä kahdesta pinnasta kuparipinnalla oli paremmat emissiivisyysarvot. Raepuhalletun teräskappaleen paremmuus esimerkiksi kuulapuhallettuun nähden selittyy sen karkeammalla pinnalla. Tästä voidaan päätellä, että mitä karkeampi pinta kappaleessa on, sitä korkeampi siinä on emissiivisyys. Kuulapuhalletun ja oksidoidun kuparipinnan tapauksessa taas on nähtävissä kappaleen karkeisuuden aiheuttama emissiivisyyden nouseminen. Oksidointi taas aiheutti kuparikappaleen pinnan tummumisen, joka myös osaltaan nostaa sen emissiivisyyttä, koska tumma pinta säteilee vähemmän ympäristön lämpöä kuin esimerkiksi kiiltävä pinta.

Avainsanat: Pintakäsittely, lämpökuvaus, emissio

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Plastics Engineering

MIETTINEN TOMMI: Thermal imaging and coating of injection molds

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering

25 pages

Spring 2010

ABSTRACT

The topic of this work was the coating and thermal characterization of molds used in injection molding. The purpose was to find the optimal coating to the mold, so that you would be able to photograph it better and investigate the mold's temperature distribution in different stages of the injection moulding process with the thermal images.

Thermal imaging of injection moulding molds and getting proper pictures of them has been difficult due to the shiny metal surface of the mold, especially at high temperatures. With the successful thermal imaging of the process, you would be able to get valuable information and thus develop the process.

In addition to mold steel, copper was also selected as a material to be coated. The coating methods for steel in this work were zinc spraying based on thermal injection methods, pellet blasting and grain blasting. The coating methods for copper were pelletblasting, oxidation and the two above together. Basic steel and copper were also tested. After the coatings were made, the testpieces were carried to a convection oven where they were heated for thermal imaging. The oven was heated to certain temperatures and thermal images of the testpieces were taken at every temperature. After the pictures were taken, they were transmitted to a computer and the emissivity of the pieces was determined with the help of a computer program. A table and describer were made from the solved emissivity values, which made it possible to assess the suitability of each coating for injection moulding mold in terms of thermal imaging. High emissivity value was a high priority for suitable coating for molds. A high emissivity value was a high priority for a suitable coating for the mold. The value had to be high because it is easier and better to take pictures of a surface with high emissivity than a surface with low emissivity.

The best emissivity values in the processed pieces were in grain blasted steel pieces and in copper pieces with both pellet blasting and oxidation on it. Of these two surfaces the copper piece had a better emissivity value. The superiority of a grain blasted piece compared to a pellet blasted piece is explained by its coarser surface. From this it can be concluded that the coarser surface the item has, the higher its emissivity is. As for the case of pellet blasted and oxidized copper surfaces, a rise of emissivity can be seen, caused by hardening. Oxidation caused the tarnishing of the surface which also contributes to rising of emissivity, because a dark surface radiates less heat from the environment than a glossy surface.

Key words: surface finishing, thermal imaging, emission

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	LÄMPÖKUVAUKSEN PERUSTEITA	2
2.1	Lämpö- eli infrapunasäteily	2
2.1.1	Emissiivisyys	3
2.1.2	Mustan kappaleen säteily	3
2.1.3	Planckin- ja Boltzmannin lait	4
2.2	Lämpökuvauksen historiaa	6
3	METALLIN PINNOITTAMINEN	8
3.1	Terminen ruiskutus	8
3.2	Kaariruiskutus	10
3.3	Rae- ja lasikuulapuhallus	11
4	RUISKUVALUMUOTTI	13
5	KOKEELLINEN OSUUS	13
5.1	Pinnoitukset ja muut käsittelyt	13
5.2	Lämpökuvaus	16
5.3	Kuvien analysointi	17
6	YHTEENVETO	20
6.1	Teräskappaleiden tulokset	20
6.2	Kuparikappaleiden tulokset	21
6.3	Työn onnistuminen	22
	LIITTEET	26

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan eri pinnoitteiden soveltumista ruiskuvalukoneen muotin ulkopintaan lämpökuvasta ajatellen. Muotille pyritään löytämään sopiva pinnoite, jolloin siitä saisi parempia kuvia lämpökameralla, ja lämpötilajakaumat näkyisivät kuvissa selvemmin ja ruiskuvaluprosessin muotin lämpötiloista saataisiin paremmin tietoa. Pintaan pyritään saamaan mahdollisimman korkea emissiivisyys, jolloin sitä olisi helpompi kuvata, eikä ulkopuolisia heijastuksia ilmenisi. Ruiskuvalu-
muotista ei ole saatu kunnollisia lämpökuvia ilman pinnoitusta varsinkaan, jos käytössä ei ole ollut kunnollista lämpökameraa.

Työssä pinnoitusmenetelmiksi valitaan termisiin ruiskutusmenetelmiin perustuva sinkkiruiskutus kaariruiskutusmenetelmällä, kuulapuhallus ja raepuhallus. Mukaan kokeeseen otetaan myös käsittelemätön puhdas metallipinta. Kokeessa tutkitaan myös kuparipintojen soveltuvuutta lämpökuvaukseen, ja mukana tutkimuksessa on neljä eri käsittelyllä käsiteltyä kuparikappaletta. Kuparikappaleisiin tehdään kolme erilaista pinnoitusta: oksidointi eli hapettaminen, kuulapuhallus sekä molemmat näistä yhdessä. Myös käsittelemätön kuparikappale on tutkimuksessa mukana. Näistä kahdeksasta eri pinnasta pyritään löytämään paras mahdollinen pinta ruiskuvalumuotille lämpökuvasta ajatellen. Koekappaleista tutkitaan myös niiden emissiivisyyksiä eri lämpötiloissa.

2 LÄMPÖKUVAUKSEN PERUSTEITA

Lämpökamera on saavuttanut yhä suurempaa suosiota ainetta rikkomattomana testausmenetelmänä eli NDT-menetelmänä monissa eri sovelluksissa. Kamera on monivuotisen kehityshistoriansa aikana kokenut varsin suuren muodonmuutoksen. Yleinen mielikuva painavasta ja hankalatoimisesta laitteesta, jonka käyttämiseen tarvittiin suurin piirtein insinöörikoulutusta, on väistymässä. Ilmaisinteknologian raju kehitys ja elektroniikan miniatyrisointi on johtanut siihen, että lämpökamera on pieni videokameran näköinen laite, jonka käytön helppous yllättää useimmat. Lämpökuvaus perustuu siihen, että kamera mittaa kuvattavan kohteen lähettämää lämpö- eli infrapunasäteilyä. Lämpökamera vastaanottaa lämpösäteilyä, mittaa sen voimakkuuden ja muuttaa sen lämpötilajakauman perusteella kuvaksi. (Opetushallitus 2010)

2.1 Lämpö- eli infrapunasäteily

Infrapuna on pitkäaaltoisempaa sähkömagneettista säteilyä kuin näkyvä valo. Lähinnä näkyvän valon aluetta olevaa infrapunaa kutsutaan lähi-infrapunaksi ja sen aallonpituus on 1-3 μm . Aallonpituusalueella 3-5 μm sijaitsee lyhytaaltoalue ja välillä 8-12 μm pitkäaaltoalue. Lämpösäteilyä lähettää jokainen kappale, jonka lämpötila on yli absoluuttisen nolapisteen eli -273°C . Infrapunasäteily liikkuu valonnopeudella, kuten muukin sähkömagneettinen säteily. Säteilyn voimakkuus korreloi kappaleen todelliseen lämpötilaan. (Infradex Oy 2010a)

Täydellistä mustakappaletta, jota kutsutaan myös täydelliseksi säteilijäksi, luokunottamatta jokainen kappale myös heijastaa muista lähteistä tulevaa säteilyä. Kappaleen pintamateriaalirakenne määrittelee, kuinka suuri osa kappaleesta tulevasta säteilystä on sen itsensä lähettämää (emittoimaa). Metalliset paljaat pinnat heijastavat enemmän ympäristön energiaa kuin itse lähettävät. Tästä johtuen kiiltäviä metalleja ei voida, varsinkaan matalissa lämpötiloissa (noin alle 100°C), mitata ollenkaan. (Infradex Oy 2010a)

2.1.1 Emissiivisyys

Emissiivisyys tarkoittaa kappaleen lähettämän säteilyn määrää verrattuna täysin mustan kappaleen säteilyyn. Emissiivisyyttä merkitään yleensä kreikan pienellä epsilon-kirjaimella ϵ . Luonnossa ei käytännössä esiinny täysin mustia kappaleita, joiden emissiivisyys $\epsilon = 1$. Näin ollen kaikkien kappaleiden $\epsilon < 1$. Jos kappaleen heijastuvuus on suuri, emissiivisyys on pieni. Mitä suurempi emissiivisyys, sitä vähemmän kappale heijastaa ympäristön energiaa ja sitä enemmän kappale säteilee lämpöä. Emissiivisyys voidaan ilmoittaa eri aallonpituusalueille. Useimmiten emissiivisyys ilmoitetaan pitkäaaltoiselle säteilylle. Kappaleiden jäähtymissäteily on yleensä enimmäkseen pitkäaaltoista infrapunasäteilyä. (Wikipedia 2010a ; Infradex Oy 2010a)

2.1.2 Mustan kappaleen säteily

Jos hehkuvaksi kuumennetun kappaleen säteilemä valo hajotetaan spektriiksi, saadaan jatkuva spektri, joka sisältää kaikkia aallonpituuksia. Hehkuvan kappaleen säteily on voimakkainta tietyllä aallonpituudella, joka riippuu kappaleen lämpötilasta. Sekä lyhyemmällä että pitemmillä aallonpituuksilla säteily on heikompa. Mitä korkeampi lämpötila on, sitä lyhyempi on säteilyn maksimin aallonpituus ja sitä sinisemmältä kappale näyttää. Tämän voi havaita esimerkiksi kuumentamalla rautatankoa hiilloksessa. Aluksi se säteilee näkymätöntä infrapunasäteilyä. Lämpötilan kohotessa tanko alkaa hehkua ensin tummanpunaisena, sitten se muuttuu punaiseksi, oranssiksi ja keltaiseksi. Jos lämpötilaa pystytään vieläkin kohottamaan, alkaa väri muuttua sinertäväksi. (Mustan kappaleen säteily 2010)

Hehkuvan kappaleen spektrin muoto riippuu pelkästään lämpötilasta, eikä esimerkiksi siitä, mitä ainetta kappale on. Tällaista säteilyä sanotaan mustan kappaleen säteilyksi. Esimerkiksi tavallinen hehkulamppu säteilee varsin hyvin mustan kap-

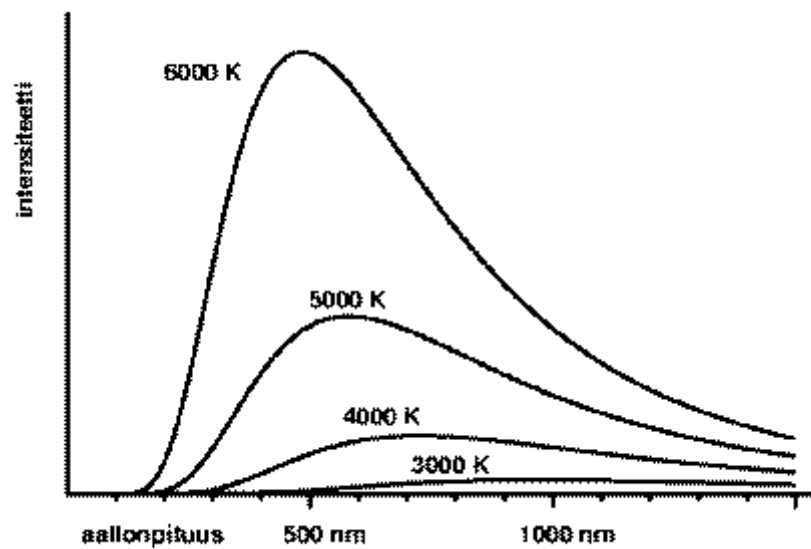
paleen tavoin. Lampun lämpötila on kuitenkin matala, joten suurin osa energiasta menee hukkaan lämpösäteilynä. (Mustan kappaleen säteily 2010)

2.1.3 Planckin- ja Boltzmannin lait

Teoreettisen selityksen säteilyn aallonpituusjakautumalle antoi Max Planck vuonna 1900. Siksi mustan kappaleen spektriä kuvaavaa lauseketta sanotaankin Planckin funktioksi. Kun lämpötila kasvaa, säteily voimistuu kaikilla aallonpituuksilla. Säteilyn kokonaisteho riippuu voimakkaasti lämpötilasta; voidaan osoittaa, että se on verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. Lämpötilan kohotessa voimakaimman säteilyn kohta siirtyy kohti lyhyempiä aallonpituuksia, eli kohti spektrin sinistä päätä. Sen vuoksi hehkuvan kappaleen väri muuttuu sinisemmäksi lämpötilan kohotessa. (Mustan kappaleen säteily 2010)

Mustan kappaleen säteily oli yksi ensimmäisistä ilmiöistä, joiden selittämisessä klassinen fysiikka epäonnistui täydellisesti. Jos mustan kappaleen säteilyä yrittää johtaa perinteisen fysiikan avulla, saa tulokseksi, että säteilyn voimakkuus kasvaa rajatta aallonpituuden lyhentyessä. Tulos on selvästi mahdoton, koska sen mukaan kaikki ympärillämme olevat kappaleet levittäisivät ympärilleen hengenvaarallisia määriä röntgen- ja gammasäteilyä. (Mustan kappaleen säteily 2010)

Planckin teoria oli erikoinen, mutta osoittautui oikeaksi. Musta kappale koostuu hiukkasista, jotka värähtelevät sitä voimakkaammin, mitä korkeampi niiden lämpötila on. Värähtelyn voimakkuus puolestaan liittyy hiukkasen energiaan, mutta kaikki energiatilat eivät ole kuitenkaan mahdollisia ja vain tietyt erilliset energiatilat ovat sallittuja. Olettamalla hiukkasten voivan olla vain tietyissä tiloissa Planck pystyi johtamaan todellisuutta vastaavan säteilylain. (Mustan kappaleen säteily 2010)



KUVIO 1. Planckin funktioita muutamilla lämpötilan arvoilla (Mustan kappaleen säteily 2010)

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

Planckin laki mustan kappaleen säteilystä (Wikipedia 2010b)

jossa:

T on mustan kappaleen absoluuttinen lämpötila

h on Planckin vakio

c on valonnopeus

k on Boltzmannin vakio (Wikipedia 2010b)

Planckin mustan kappaleen säteilylaista voidaan johtaa nykyinen Stefan Boltzmannin laki. Stefanin–Boltzmannin laki on fysikaalinen laki, jonka mukaan mustan kappaleen säteilemä teho pinta-alaa kohti on suoraan verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin.

$$M = \sigma T^4 .$$

Verrannollisuuskerrointa σ kutsutaan Stefanin–Boltzmannin vakioksi. Sen arvo on

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = (5,670400 \pm 0,000040) \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} .$$

Siten musta kappale, jonka pinta-ala on 1 cm^2 , säteilee lämpötilassa 1000 K suunnilleen teholla $5,7 \text{ W}$. Lain havaitsi kokeellisesti Jožef Stefan vuonna 1879. Teoreettisesti sen johti termodynamiikan pohjalta Ludwig Boltzmann vuonna 1884. Stefanin–Boltzmannin lain avulla voidaan laskea esimerkiksi arviot Aurinkokunnan planeettojen pintalämpötiloille. (Wikipedia 2010b) (Wikipedia 2010c)

2.2 Lämpökuvauksen historiaa

Sähkömagneettisen spektrin infrapunainen kaista löytyi sattumalta vuonna 1800, kun tähtitieteilijä Sir William Herschel törmäsi ilmiöön etsiessään uutta optista suodatinmateriaalia. Kun Herschel julkaisi löytönsä, hän kutsui tätä uutta sähkömagneettista spektrin aluetta ´termometriseksi spektriiksi´ ja säteilyä pimeäksi lämmöksi. Tämän läpimurron jälkeen infrapunatutkimista jatkoi moni muu tiedemies. (Infradex Oy 2010b)

Ensimmäinen nk. lämpökuva tuli mahdolliseksi Sir John Herschelin työn ansiosta. Kuva perustui siihen, että ohuesta ölykerroksesta haihtuu öljyä sen mukaan, missä määrin sen eri kohtiin kohdistuu lämpösäteilyä. Lämpökuva näkyi öljykalvosta heijastuvasta valosta interferenssi-ilmiöiden taittaessa sitä eri tavoin. John Herschel onnistui myös tuottamaan ensimmäisen alkeellisen kuvan paperille jota hän sitten kutsui lämpökuvaksi. (Infradex Oy 2010b)

Seuraava merkittävä läpimurto tapahtui kun Samuel Langley keksi bolometrin vuonna 1880. Kyseessä oli ohut mustattu platinaliuska, joka kytkettiin wheatstonen sillan toiseen varteeseen. Herkkä galvanometri reagoi, kun piiriin kohdistettiin infrapunasäteilyä. Nestemäisiä kaasuja infrapunaa tutkimuksessa alkoi ensimmäisenä käyttää Sir James Dewar, joka käytti mm. nestemäistä tyyppiä jäähdyttimenä tutkiessaan alhaisia lämpötiloja. Vuosien 1914-1918 sodan aikana kehitettiin kaksi käänteentekevää infrapunailmaisinta: kuvanmuunnin ja fotoni-ilmaisin. Kuvanmuuntimen avulla saatettiin ensimmäistä kertaa ”nähdä” pimeässä. Fotoni-ilmaisinta alettiin tutkia enemmän vasta toisen maailmansodan jälkeen. Sotilassalaisuuksiin perustuvat säädökset estivät kokonaan lämpökuvaustekniikan edistymistä koskevan tiedoittamisen. Salailu alkoi väistyä vasta 1950-luvun puolivälissä, jolloin vastaavia lämpökuvauslaitteita alkoi tulla myös siviilimarkkinoille sekä teollisuuden käyttöön. (Infradex Oy 2010b)

3 METALLIN PINNOITTAMINEN

Materiaalien pinnoitus on erittäin laaja alue, johon sisältyy lukuisia eri menetelmiä maalauksesta hitsaukseen ja materiaaleja keraameista polymeereihin. Tavoite on kuitenkin kaikissa sama eli muuttaa pinnan ominaisuuksia haluttuun suuntaan. Jos pinnoittamisella voidaan saavuttaa haluttu lopputulos, on otettava huomioon monta osatekijää. On tunnettava pinnoitettavan kohteen olosuhteet, ongelma, pinnoittamisella haettu vaikutus, pinnoitevaihtoehdot ja pinnoitus-menetelmät. Samalla on oltava käytössä kunnossa olevat pinnoituslaitteet sekä riittävä osaaminen. (Terminen ruiskupinnoituksen perusteet 2010)

3.1 Terminen ruiskutus

Termistä ruiskutusta voidaan hyvällä syyllä pitää kaikista monipuolisimpana teollisena pinnoitusmenetelmänä hyvin laajan pinnoitemateriaalivalikoiman ansiosta. Termisen ruiskutuksen voimakkaaseen suosioon ovat vaikuttaneet mm. seuraavat tekijät: (Tunturi & Tunturi 1999, 69)

- Käytettävissä on hyvin laaja valikoima erilaisia pinnoitemateriaaleja, jotka sisältävät mm. useita puhtaita metalleja, metalliseoksia, kovametalleja, keraameja, muoveja sekä monia näiden yhdistelmiä.
- Pinnoitteiden ominaisuudet, kuten kulumiskestävyys, kovuus ja tartuntalujuus ovat erinomaisia.
- Pinnoitteen valmistusnopeus on suuri ja se sopii myös laajoille pinnoille.
- Kylmäpinnoitusmenetelmässä lämmöntuonti perusaineeseen on alhainen; poikkeuksena ns. sulautuspinnoitus.
- Pinnoituksen kustannuksen ovat riittävän alhaiset monien sovellusten kannalta. (Tunturi & Tunturi 1999, 69)

Termisellä ruiskutuksella tarkoitetaan pinnoitusprosesseja, joissa pinnoitteen valmistamiseen käytettävä lisäaine kuumennetaan kokonaan tai osittain sulaan tilaan ruiskun sisä- tai ulkopuolella ja viedään kaasuvirtauksen avulla esikäsitellylle

pinnalle (SFS-EN 657). Ruiskutettu pinnoite muodostuu salapisaroiden törmätessä pinnoitettavan materiaalin pintaan, jossa ne litistyvät ja jäähtyvät suurella nopeudella. Kaikkia materiaaleja joiden sulamis- ja kiehumislämpötilan ero on riittävä, voidaan ruiskuttaa termisesti. (Tunturi & Tunturi 1999, 69)

Aikaisemmin terminen ruiskutus tunnettiin lähinnä korjaukseen ja kunnostukseen käytettävänä menetelmänä; jota kutsuttiinkin yleisesti metalliruiskutukseksi. Nykyisin termisellä ruiskutuksella valmistetaan pinnoitteita myös erilaisiin teknisesti vaativiin käyttösovelluksiin, ja se voi olla esimerkiksi yhtenä osavaiheena teollisen tuotannon valmistusketjussa. Tyypillisiä käyttökohteita termiselle ruiskutukselle ovat: (Tunturi & Tunturi 1999, 69)

- kuluneiden tai väärin koneistettujen koneenosien kunnostus
- kulumiskestävyyden parantaminen (abraasio, eroosio, adheesiokuluminen jne.)
- osien painon pienentäminen (esim. alumiini perusaineena ja kulutusta kestävä pinnoite)
- korroosionesto
- pintaominaisuuksien muuttaminen
- korkeissa lämpötiloissa tapahtuvan hapettumisen ja korroosion estäminen
- lämmöneristys korkeissa lämpötiloissa
- lämmönjohtokyvyn parantaminen
- sähkönjohtokyvyn parantaminen
- sähköneristys
- pinnan kitkakertoimen muuttaminen
- välyksen säätö kuluvilla pinnoitteilla
- koristepinnoitteet (Tunturi & Tunturi 1999, 69)

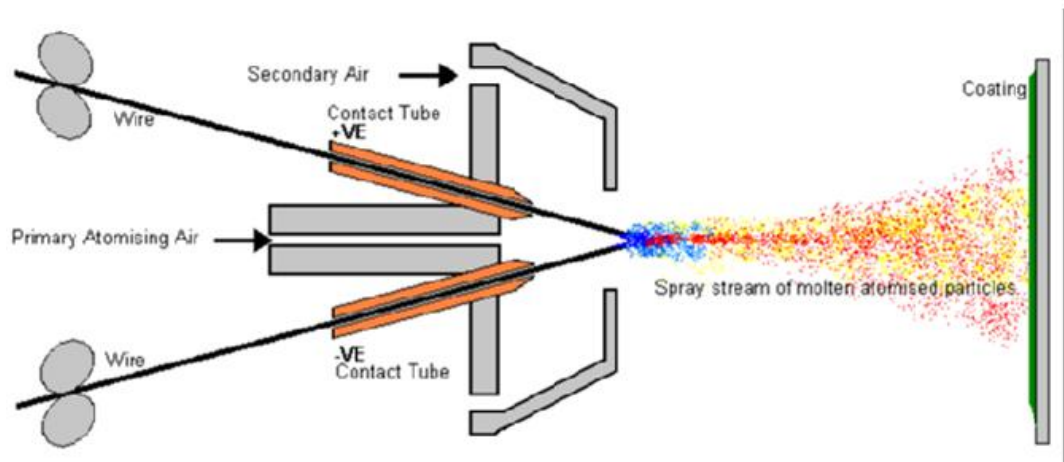
3.2 Kaariruiskutus

Valokaariruiskutus on tehokas menetelmä, jonka pinnoiteominaisuudet ovat suuremman pisanopeuden vuoksi parempia kuin lankaliekkiruiskuksessa (terminen ruiskutusmenetelmä). Valokaariruiskutuksen suuri sulatuskapasiteetti johtuu siitä, että menetelmässä käytetään hyväksi tehokasta sähkövalokaarta. Ruiskutuspiistolissa toisiaan vasten syötettävät metallilangat on kytketty elektrodien avulla sähköisesti suurta sähkövirtaa syöttävään tasavirtateholähteeseen. Kun metallilankojen kärjet kohtaavat toisensa, välillä palava valokaari sulattaa metallilankaa jatkuva-toimisesti. Sulaneet pisarat puhalletaan erillisen paineilmavirtauksen avulla työstettävän kappaleen pintaan. (Tunturi & Tunturi 1999, 71)

Valokaariruiskutuksessa käytettäviä lisäainelankoja ovat erilaiset hiiliteräkset, nikkelpohjaiset seokset, kromiteräkset, ruostumattomat teräkset, kuparipohjaiset seokset (pronssit, messinki, valkometalli), pehmeät metalliseokset (alumiini, sinkki) sekä molybdeeni. Ainoa vaatimus valokaariruiskutuksessa käytettäville langoille on niiden sähkönjohtavuus. Kaariruiskutuksen pinnoitusteho on ruiskutettavan lisäaineen lisäksi suuresti riippuvainen käytetystä virran voimakkuudesta. Suuremmalla virralla saadaan suurempi sulatusteho (kg/h). (Tunturi & Tunturi 1999, 71-72)

Valokaariruiskutusta käytetään mm. suurten pintojen korroosiosuojaukseen, kulumista ja korroosiota kestävien metalliseospinnoitteiden (esim. kromiteräs) valmistukseen sekä korkeanlämpötilan eroosioita ja korroosiota kestävien pinnoitteiden valmistamiseen energiateollisuuden laitteisiin. Kaariruiskutuksella ruiskutetaan vain kylmäpinnoitteita. Nykyisin kaariruiskutuksessa käytetään paljon erilaisia

ydintäytelankoja, jotka ovat monipuolistaneet ja lisänneet merkittävästi menetelmän suosiota. (Tunturi & Tunturi 1999, 72)



KUVIO 2. Valokaariruiskutuksen periaate (Termisen ruiskupinnoituksen perusteet 2010)

3.3 Rae- ja lasikuulapuhallus

Raepuhalluksen periaatteena on paineilman avulla puhaltaa rakeita suurella nopeudella käsiteltävälle pinnalle. Avopuhalluksessa käytetään tavallisesti käsin ohjattavaa avopuhaltavaa suihkupuhdistuslaitetta, jota käytetään suurten työkohteiden puhdistukseen, mutta myös pienempien teräsrakenteiden puhdistukseen ulko- ja sisätiloissa. Se soveltuu sekä kertakäyttöisille että talteenotettaville raemateriaaleille. Puhallusaineen ja paineilman seos johdetaan raepuhaltimesta kumiletkua pitkin työkohteeseen, jossa se vapaana suihkuna sinkoutuu puhdistettavaa kappaletta vasten. Avopuhalluksessa käytetään yleensä kvartsi- tai luonnonhiekkaa etenkin, jos puhalletaan ulkona tai rakeita ei muutoin saada talteen. (Rae- ja hiekkapuhallus 2010)

Puhalluskaappeja, erillisiä puhallushuoneita tai erityyppisiä sinkoja käytettäessä rakeiden talteenotto ja puhdistus uudelleenkäyttöä varten on mahdollista. Raepuhallushuoneissa puhdistusrakeet putoavat lattiaristikon läpi, ja ne kuljetetaan eri tavoin ensin pölynpoistolaitteen lävitse ja sitten uudelleen puhalluskammioon syöttösäiliöön. Rakeiden talteenotto tapahtuu joko käsin lakaisemalla ja seulomalla,

imuroimalla, mekaanisilla kuljettimilla tai pneumaattisilla kuljettimilla. Uudelleenkäytettävä puhallusaine puhdistetaan epäpuhtauksista ja hienojakeisista rakeista joko ”tuuliseuloilla” tai laskeutumiserottimilla. (Rae- ja hiekkapuhallus 2010)

Puhalluskaappi on puhallustila jonka etuseinässä on tarkkailuluukku ja reiät, joissa on kumikäsineet käsiä varten. Työntekijä työskentelee kaapin ulkopuolella. (Rae- ja hiekkapuhallus 2010)



KUVIO 3. Puhalluskaappi

Raepuhalluksen puhallusaineet jaetaan aineominaisuuksiltaan metallisiin ja ei-metallisiin rakeisiin. Käyttöominaisuuksiltaan ne voidaan jakaa kertakäyttöisiin ja uudelleen käytettäviin rakeisiin. Rakeen muoto voi olla pyöreä, särmikäs tai lieriömäinen. Rakeiden koko vaihtelee hienosta karkeaan. Teräshiekka on raesuuruudeltaan 0,4 – 0,6 mm ja kvartsihiekka 0,4 – 2,0 mm. Yleensä puhallusaine sisältää tasaisesti raekooltaan erilaisia jyväsiä, jolloin saadaan paras puhallustulos. (Rae- ja hiekkapuhallus 2010)

Kuulapuhallus eroaa raepuhalluksesta menetelmänä ainoastaan käytettävän puhallusrakeen verran. Lasikuularakeella saadaan jonkin verran hienompi pinta kappaleeseen, ja se on hieman hellävaraisempi menetelmä raepuhallukseen verrattuna.

4 RUISKUVALUMUOTTI

Ruiskuvalukoneessa muotti eli työkalu tarvitaan kappaleiden muodon aikaansaamiseen. Se on yksi tärkeimpiä osatekijöitä ruiskuvalukappaleen valmistuksessa. Muotin keskeisimpiä tehtäviä ovat muovisulan vastaanottaminen, kaasujenpoisto, keernatoiminnot, kappaleen jäähdyttämisen ja valmiin kappaleen ulostyöntö. Muotissa voi olla yksi tai useampi pesä. Ruiskuvalumuotin osat valmistetaan tavallisesti karkaistavasta työkaluteräksestä erilaisilla työstömenetelmillä, joista tärkeimpiä ovat jyrshintä-, eri kipinätyöstö- ja eri hiontamenetelmät. (Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 1999, 93-94)

5 KOKEELLINEN OSUUS

Kokeen suunnittelu aloitettiin miettimällä sopivia pinnoitusmenetelmiä, jotka voisivat toimia muotin pinnassa hyvin ja joista saisi kunnollisia lämpökamerakuvia. Pitkällisen pohdinnan jälkeen päädyttiin valitsemaan pintakäsittelymenetelmiksi termisiin ruiskutusmenetelmiin perustuva sinkkiruiskutus kaariruiskutusmenetelmällä, raepuhallus sekä kuulapuhallus.

5.1 Pinnoitukset ja muut käsittelyt

Koekappaleeksi ei varsinaisesti otettu ruiskuvalumuottia itseään vaan sitä vastaavaa metallia olevat kappaleet. Koekappaleeksi valittiin ontto neljäsiivuinen teräspalkki, josta sahattiin neljä samanmittaista pätkeä. Kappaleiden pituus oli 100 mm,

leveys 50 mm, ja seinämänpaksuus 5 mm. Näistä pätkestä kolmeen tehtiin eri pinnoitteet, ja yksi jätettiin käsittelemättä. Näiden neljän teräskappaleen lisäksi eri käsittelyitä tehtiin vertailun vuoksi myös kuparilevyihin, joiden mitat olivat 50*100*1 mm. Kuparilevyjäkin oli kokeessa mukana neljä.

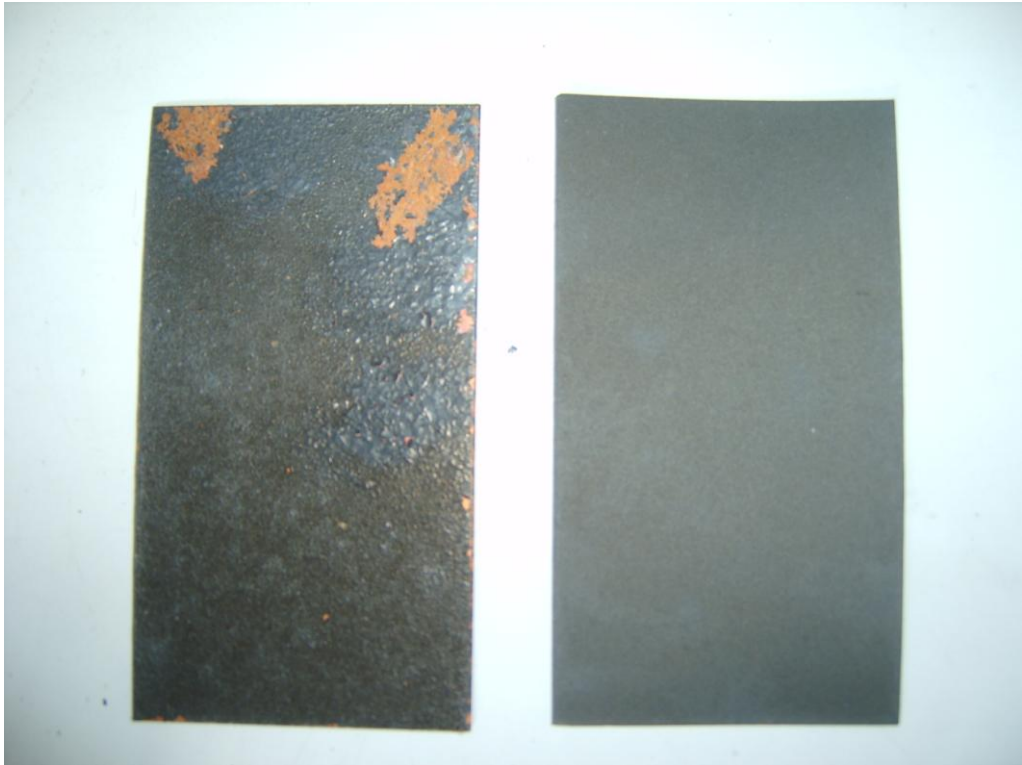
Teräskappaleiden sahaamiseen jälkeen aloitettiin varsinaiset pinnoitustyöt joista ensimmäisenä oli vuorossa raepuhallus. Puhallus suoritettiin yhdelle kappaleelle puhalluskaapissa. Teräspalkin neljästä sivusta yksi käsiteltiin niin kuin kaikissa muissakin pintakäsittelyissä. Käytetty rae oli uudelleen käytettävää alumiinioksidia (NK24), jonka halkaisijaksi mitattiin 1mm. Raepuhalletusta pinnasta tuli hieman karheampi kuin lasikuulapuhalletusta.

Kun yksi teräskappale saatiin raepuhalletuksi, puhallusrakeeksi vaihdettiin hieman hienompijakoinen lasikuula. Lasikuularakeen halkaisijaksi mitattiin 0,3mm. Puhalluspaikkana käytettiin samaa puhalluskaappia kuin raepuhalluksessakin. Kun raepuhaltamalla käsiteltiin vain yksi teräskappale, niin lasikuulalla käsiteltiin yhteensä neljä kappaletta, joista kaksi olivat teräskappaleita ja kaksi kuparikappaleita. Yhteen teräskappaleista jätettiin pelkkä lasikuulakäsittely ja toisessa kappaleessa lasikuulapuhallus toimi esikäsittelynä sinkkiruiskutusta varten. Toiselle lasikuulapuhalletuista kuparikappaleista tehtiin jälkikäsittelynä oksidointi ja toiseen jäi pelkkä lasikuulakäsittely. Ohuet kuparilevyt olivat melko hankalia puhallaa, koska ne pyrkivät käyristymään puhallettaessa.

Sillä aikaa kun koekappaleita rae- ja lasikuulapuhallettiin, kaksi uunia oli lämpimässä. Toinen uuneista lämmitettiin 300°C asteeseen. Tähän uuniin laitettiin tunniksi lasikuulapuhaltamalla esikäsitelty teräskappale. Sekä lasikuulapuhallus että kappaleen lämmitys tehtiin esikäsitelynä, koska ne auttavat merkittävästi siihen lopullisena tulevan sinkkipinnoitteen kiinnittymistä. Kun kappale oli ollut noin tunnin verran uunissa, se otettiin pois, ja siihen ammuttiin nopeasti sinkkipinnoite valokaariruiskutusmenetelmällä, ettei se ehtisi paljoa jäähtyä.

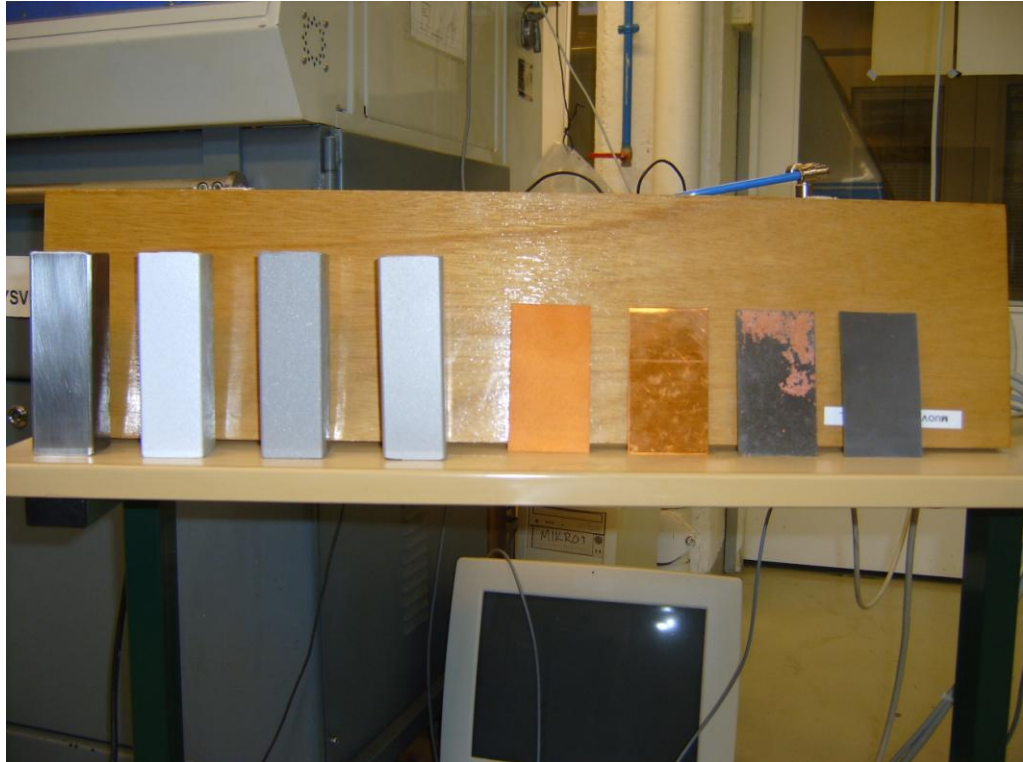
Samaan aikaan toinen uuni oli lämmitetty 500°C asteeseen, ja sinne laitettiin lasikuulapuhallettu kuparikappale sekä käsittelemätön kuparikappale noin tunniksi.

Tässä uunissa tarvittiin korkeampi lämpötila sen takia, että kappaleisiin saatiin varmasti hyvä hapettunut eli oksidoitunut pinta. Käsittelemättömän kappaleen pintaan ei oksidointi kunnolla tarttunut, kuten allaolevasta kuvasta näkee. Tästä voidaan päätellä että sileän kappaleen pintaan oksidointi ei tartu kunnolla.(KUVIO 4.)



KUVIO 4. Oksidoidut kuparikappaleet. Vasemmalla käsittelemätön kuparilevy ja oikealla lasikuulapuhallettu

Lopputuloksena pintakäsittelyjen jälkeen kasassa oli yhteensä kahdeksan erilaisilla pinnoitteilla (tai ilman) olevaa kappaletta. Teräskappaleista kasassa olivat käsittelemätön, sinkkiruiskutettu, raepuhallettu ja lasikuulapuhallettu ja kuparikappaleista käsittelemätön, lasikuulapuhallettu, oksidoitu sekä lasikuulapuhallettu/oksidoitu kappale.



KUVIO 5. Kaikki koekappaleet. Teräsappaleet vasemmalta alkaen: puhdas-, sinkitty-, raepuhallettu- ja kuulapuhallettu teräs. Kuparikappaleet vasemmalta alkaen: kuulapuhallettu-, puhdas-, oksidoitu- sekä kuulapuhallettu/oksidoitu kupari.

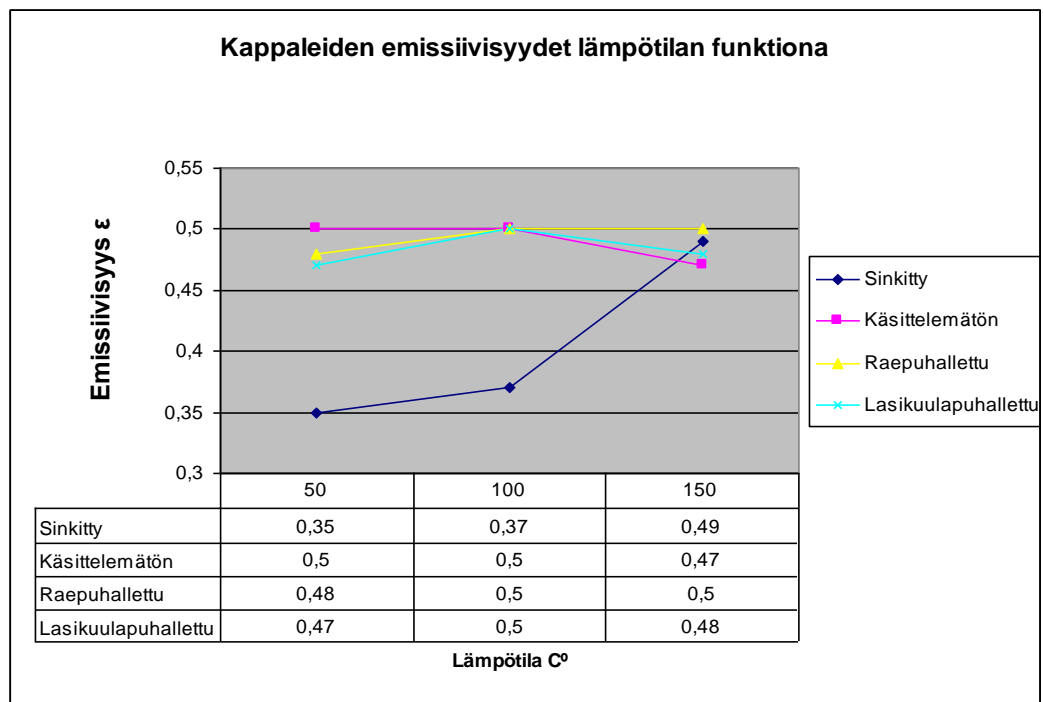
5.2 Lämpökuvaus

Seuraavaksi kaikki kappaleet aseteltiin laboratoriossa kiertoilmauuniin. Lämpötiloiksi, joissa kappaleita tutkittaisiin, päätettiin ottaa kolme eri lämpötilaa viidenkymmenen asteen välein 50°C asteesta alkaen. Eli siis lämpötilat 50, 100 ja 150 astetta. Aina kun uuni oli lämmennyt tavoitelämpötilaan, uunin ovi avattiin ja pyrittiin ottamaan lämpökuva mahdollisimman nopeasti koekappaleista, etteivät ne ehtisi kovin paljon jäähtyä. Jokaisessa tutkimuslämpötilassa otettiin muutama kuva epäonnistuneiden kuvien varalle, joista sitten paras valittiin tutkimuskohteeksi. Käytetty lämpökamera oli Fluke Ti25 ja uuni Termaks-merkkinen.

5.3 Kuvien analysointi

Kun kuvat oli saatu otettua joka lämpötilassa, oli ohjelmassa niiden analysointi PC:lla Smartview-ohjelmalla. Otetuista kuvista valittiin tutkittavaksi parhaiten onnistuneet kustakin lämpötilasta, eli yhteensä kolme lämpökuvaa. Kuvista tutkittiin eri materiaalien emissiivisyyksiä, ja mitattava piste otettiin kunkin kappaleen keskikohdasta. Emissiivisyys saatiin selville manuaalisesti muuttamalla emissiivisyysarvoa niin, että kuva saatiin näyttämään oikeaa lämpötilaa, kun kuvan otto- lämpötila oli tiedossa. Kuvista saaduista tiedoista tehtiin Excel-ohjelmalla kaavio teräskappaleille ja kaavio kuparikappaleille, jotka ovat nähtävissä alapuolella.

TAULUKKO 1. Teräskappaleiden emissiivisyydet eri lämpötiloissa

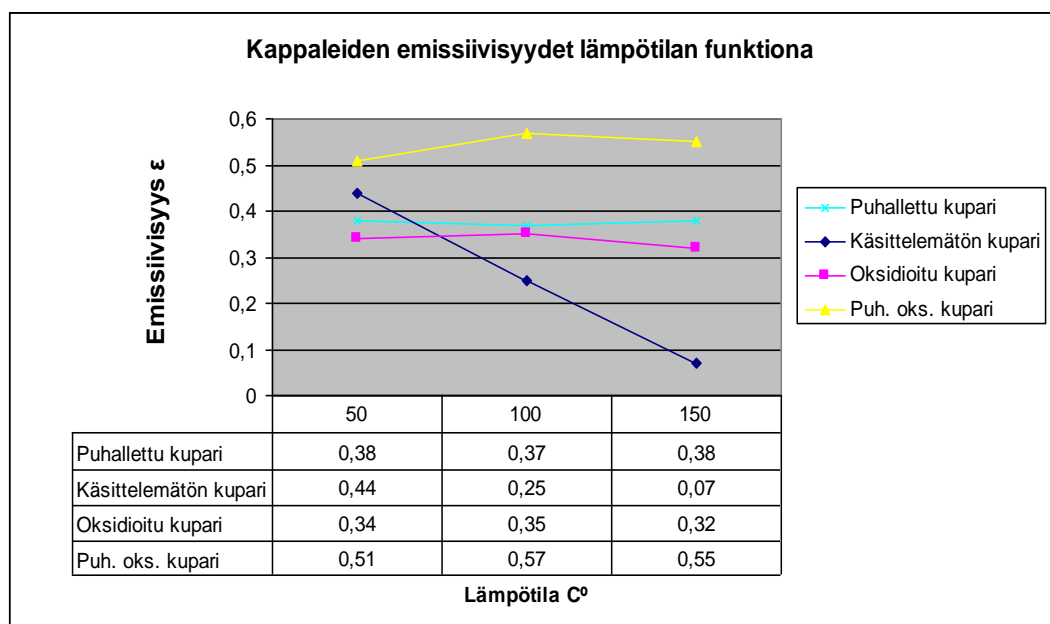


Tavoitteena oli siis saada emissiivisyyttä nostettua, jolloin pinta säteilisi enemmän omaa kuin ympäristön lämpöä. Teräskappaleista nähdään, että käsittelemättömässä kappaleessa on jostain syystä korkein emissiivisyys 50°C lämpötilassa, mutta lämpötilan noustessa 150°C-asteeseen sillä on pinnoista huonoin arvo. Sinkityn kappaleen lämmönsäteily on selvästi huonoin alemmissä lämpötiloissa, mutta 150°C-asteessa se on toiseksi paras pintamateriaali.

Pintojen emissiivisyysarvoissa oli enemmän eroja matalissa lämpötiloissa kuin korkeissa. Tuloksista kuitenkin voidaan nähdä miten raepuhalluksella puhalletussa pinnassa on parempi emissiivisyysarvo korkeissa lämpötiloissa kuin toisilla materiaaleilla. Tästä voidaan tehdä se johtopäätös, että mitä karkeampi pinta, sen korkeampi emissiivisyys. Lasikuulapuhallettu pintahan on hieman vähemmän karkea. Toisekseen käsittelemättömässä pinnassa on 150°C lämpötilassa nähtävissä se, kuinka pinta alkaa heijastaa ympäristön energiaa korkeassa lämpötilassa. Sinkityn pinnan emissiivisyys näyttäisi nousevan dramaattisesti sadasta asteesta ylöspäin, ja se saattaisi jo 200°C asteessa olla paras pintamateriaali näistä pinnoista, mutta näillä tiedoilla valitsisin pinnaksi raepuhalletun pinnan, vaikka se ei tuokaan suurta muutosta. Yleensä ruiskuvaluprosessissa muotin lämpötilat liikkuvat kuitenkin välillä 20-150°C. (Järvelä, Syrjälä & Vastela 2000, 16-37)

Kirjallisuudesta lähimmät näitä pintoja olevat arvot ovat hiekkapuhallettu teräs 700°C 0,7ε, sinkki 50°C 0,20ε ja etsattu kiiltävä teräs 150°C 0,16 ε. Näistä arvoista on paha lähteä analysoimaan oikein mitään, koska materiaali ja mittauslämpötilat ovat jonkin verran eroavat. (Infradex Oy 2010c)

TAULUKKO 2. Kuparikappaleiden emissiivisydet eri lämpötiloissa



Kuparikappaleiden emissiivisyyksissä olikin sitten enemmän eroja kuin teräskappaleissa. Paras emissiivisyys oli ylivoimaisesti lasikuulapuhalletussa ja oksidoidussa kuparissa joka lämpötilassa. Käsittelemättömän kuparin emissiivisyys odotetusti laski lämpötilan noustessa, vaikka 50°C asteessa sillä olikin toiseksi paras arvo. Tämäkin kiiltävä materiaali alkaa korkeissa lämpötiloissa heijastaa enenevässä määrin ympäristön energiaa. Lasikuulapuhalletulla kuparilla oli niukasti korkeampi emissiivisyysarvo jokaisessa lämpötilassa kuin oksidoidulla kuparilla. Oksidoidun kuparin pienempään emissiivisyysarvoon luultavasti osaltaan vaikutti hapetuskerroksen huono tarttuminen kuparin pintaan. Näistä materiaalivaihtoehdoista muotin pintaan melko selvä valinta olisi siis lasikuulapuhallettu ja oksidoitu kuparipinnoite. Tumma oksidipinnoite lasikuulapuhalluksella suoritettun karkaisun kanssa nähtävästi toimii paremmin kuin jompikumpi pinnoitteista yksinään.

Kirjallisuudesta lähimmät näitä pintoja olevat arvot ovat hapettunut kupari 50°C 0,6-0,7 ε, kiillotettu kupari 100°C 0,03ε (Infradex Oy 2010c)

6 YHTEENVETO

Tässä työssä oli tarkoituksena löytää ruiskuvalumuotille optimaalinen pinnoite lämpökuvasta varten. Pinnoituksia päädyttiin itse ruiskuvalumuotin sijaan tekemään muotin materiaalia vastaaviin teräskappaleisiin ja erillisiin kuparikappaleisiin. Pinnoitettavaksi materiaaleiksi päädyttiin valitsemaan sekä terästä että kuparia. Teräskappaleille pinnoitusmenetelmiksi päädyttiin pohdinnan jälkeen valitsemaan termisiin ruiskutusmenetelmiin perustuva sinkkiruiskutus kaariruiskutusmenetelmällä, kuulapuhallus sekä raepuhallus. Kuparikappaleiden pinnoitusmenetelmiksi päädyttiin valitsemaan oksidointi, eli pinnan hapettaminen korkeassa lämpötilassa, lasikuulapuhaltaminen sekä molemmat edellämainitut yhdessä. Näiden kuuden eri pinnoituksen lisäksi tutkittiin myös puhdasta teräs- ja kuparipintaa. Pinnoitusten tarkoituksena oli saada nostettua kappaleiden emissiivisyyksiä, jotta niitä olisi parempi kuvata lämpökameralla.

Pinnoitusten jälkeen kappaleet siirrettiin kiertoilmauuniin. Uunia lämmitettiin ensin 50 sitten 100 ja lopuksi 150°C asteeseen, joista jokaisessa lämpötilassa otettiin koekappaleista lämpökuva. Kuvien ottamisen jälkeen oli edessä niiden analysointi tietokoneohjelman avulla. Kun tiedossa oli kuvien ottamislämpötilat saatiin ohjelman avulla selville eri kappaleiden emissiivisyydet eri lämpötiloissa selville.

6.1 Teräskappaleiden tulokset

Pinnoitetuissa teräskappaleissa ei hirveästi eroja emissiivisyyksissä ilmennyt puhtaaseen teräkseen nähden. Suurin eroavaisuus oli sinkityn pinnan todella paljon matalampi ja sitä kautta huonompi emissiivisyysarvo kahdessa alimmassa kuvatussa lämpötilassa, mutta 150°C asteen lämpötilassa se oli toiseksi paras materiaali. Kysymykseksi jääkin, olisiko sinkityn pinnan emissiivisyys tuosta vielä noussut lämpötilan kohotessa? Ruiskuvaluprosessissa muotin lämpötilat liikkuvat kuitenkin 20-150°C asteen lämpötiloissa, joten sinkkipinnan emissiivisyyden mahdollinen nousu lämpötilan kohotessa ei juuri auttaisi tässä sovelluksessa.

Tavallisen teräspinnan emissiivisyys melko odotetusti laskee lämpötilan noustessa. Kyseessä on kiiltävä pinta, joka heijastaa ympäristön lämpöä sitä enemmän, mitä lämpötila nousee. Pinnalla oli huonoin emissiivisyysarvo korkeimmassa 150°C:n lämpötilassa.

Rae- ja kuulapuhalletun kappaleen tuloksista voi päätellä sen, että mitä karkeampi pinta kappaleessa on, sitä korkeampi on kappaleen emissiivisyys. Raepuhalluksessa puhallusrakeena on aavistuksen kuulapuhallusta karkeampi rae, mikä näkyy siinä että raepuhalletun kappaleen emissiivisyys on hieman suurempi kuulapuhallettuun nähden joka lämpötilassa.

Teräspintojen emissiivisyydet eivät hirveästi eroa enää 150°C lämpötilassa. Emissiivisyydeltään korkeimman ja matalimman materiaalin ero on vain 0,3 yksikköä. Näiden tulosten perusteella valitsisin muotin pinnoitteeksi kuitenkin raepuhalluksen, jolla siis on korkein emissiivisyysarvo 150°C lämpötilassa, ja arvo oli matalimmassakin lämpötiloissa hyvä.

6.2 Kuparikappaleiden tulokset

Kuparikappaleiden pinnoissa esiintyikin sitten enemmän eroavaisuuksia emissiivisyyksissä teräskappaleisiin nähden. Puhtaan käsittelemättömän kuparin emissiivisyys laski odotetusti sitä mukaa, kun lämpötilaa nostettiin ollen 150°C asteessa enää 0,07ε. Tässä toistuu sama ilmiö kuin puhtaalla teräksellä, kun kyse on kiiltävästä materiaalista, joka heijastaa ympäristön lämpöä.

Puhtaan kuparin oksidointi ei onnistunut odotetulla tavalla. Oksidikerros ei kiinnittynyt pintaan kunnolla ja lähti jo pienellä kosketuksella kuoriutumaan pois. Tämä luultavasti johtui kappaleen sileästä pinnasta, johon hapettumiskerros ei tarttunut kunnolla. Kuulapuhallettuun kappaleeseen oksidointi taas tarttui mainiosti juuri karkeasta pinnasta johtuen. Kuparikappale, jossa oli sekä oksidointi että kuulapuhallus, olikin ylivoimaisesti paras kuvatuista kappaleista. Sen emissiivisyys oli paras jokaisessa lämpötilassa. Oksidoinnin aiheuttama kappaleen tummentuminen luultavasti aiheuttaa emissiivisyyden nousua. Tämä kun yhdistetään kuula-

puhalluksella aikaansaatuun karkeaan pintaan, niin tulos on ymmärrettävä. Kun katsoo oksidoidun kappaleen ja kuulapuhalletun kappaleen emissiivisyyksiä eri lämpötiloissa ja vertaa niitä molemmat kyseiset käsittelyt omaavaan kappaleeseen, on niiden yhteenlaskettu emissiivisyys eri lämpötiloissa melkein yksi yhteen sellaisen kappaleen kanssa, joihin on tehty molemmat käsittelyt.

Kuparipinnoista muottiin valitsisin siis ilman epäröintiä pinnan, jossa on sekä kuulapuhalluskäsittely että oksidointi. Ja teräspinnoista ja kuparipinnoista yksi valittaessa valintani kohdistuisi myös edellämämainittuun kuparipintaan. Pinnoitetujen teräspintojen emissiivisyydet eivät kuitenkaan olleet hirveästi käsittelemättöä teräspintaa paremmat.

6.3 Työn onnistuminen

Testituloksista olisi saattanut saada luotettavammat tulokset jos mittauksia eri lämpötiloissa olisi ollut esimerkiksi kolme kappaletta, ja näistä olisi otettu keskiarvo. Toinen vaihtoehto olisi ollut lisätä enemmän mittauslämpötiloja välille 50-150°C. Joistakin otetuista lämpökuvista myöskin näki, että kiiltävämetallinen kiertoilmauunin pinta selvästi heijasti lämpöä kappaleiden reunoihin. Tämä oli nähtävissä varsinkin reunimmaisissa kappaleissa. Täten uunin vuoraaminen esimerkiksi kumilla tai muulla korkeaemissiivisellä materiaalilla olisi saattanut olla hyvä idea. Kappaleet olisivat myös saaneet olla jonkin verran enemmän erillään toisistaan uunissa mahdollisten heijastumien estämiseksi, mutta tämä ei ollut uunin koon vuoksi mahdollista. Lisäksi saman kuvauskulman ja varmistamiseksi lämpökameralla olisi voinut olla jonkinlainen teline, minkä päältä kuvat olisi otettu

Työn tulosten arvot (emissiivisyydet) jäävät jonkin verran kirjallisuudessa olevia arvoja alemmaksi. Toisaalta kirjallisuudesta ei edes löytynyt ihan vastaavien pintojen emissiivisyyksiä, joita kokeessa testattiin. Kokeessa mitattiin myös tavallisen mustan kumin emissiivisyyttä 150°C asteessa, koska sen arvo kirjallisuudesta tiedettiin (Infradex Oy 2010c) ja se on noin 0,95. Mittaamalla kumin emissiivisyy-

deksi saatiin vain 0,77, josta voidaan päätellä, että muutkin mittaustulokset ovat hieman alakanttiin.

Loppujen lopuksi saadut tulokset ovat kuitenkin melko uskottavia ja kokeessa löytyi parikin eri pinnoitetta joita voisi harkita ruiskuvalumuotin pinnoitteeksi. Lisäksi tutkimus osoittaa että, mahdollisissa jatkotutkimuksissa kannattaisi kokeilla yhä karkeampiin ja tummempiin pintoihin päin siirtymistä niin kupari- kuin teräspinnoissa.

Lähteet

1. Opetushallitus. 2010. Mekaniikka. Lämpökamera [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.6.2010]
http://www.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k5_lampokamera.html
2. Infradex Oy. 2010a. Lämpösäteilyn teoriaa: mitä on lämpösäteily ja infrapuna [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.6.2010] <http://infradex.com/teoria.html>
3. Infradex Oy. 2010b. Lämpösäteilyn historiaa [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.6.2010] <http://infradex.com/pdf/historia.pdf>
4. Wikipedia. 2010a. Emissiivisyys. [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.6.2010]
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Emissiivisyys>
5. Zubenelgenubi. 2010. Mustan kappaleen säteily [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.6.2010]
<http://www.astro.utu.fi/zubi/radiat/black.htm>
6. Wikipedia. 2010b. Planckin laki [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.6.2010]
http://fi.wikipedia.org/wiki/Planckin_laki
7. Wikipedia. 2010c. Stefan-Boltzmannin laki [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.6.2010]
http://fi.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmannin_laki
8. Termisen ruiskupinnoituksen perusteet. 2010. [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.6.2010]
<http://stolen.wata.fi/koulu/korresto/Termisen%20ruiskupinn.%20perusteet%202007%20luento.ppt>
9. Kurri, V., Malén, T., Sandell, R., Virtanen, M. 2010. Muovitekniikan perusteet. 3. tarkistettu painos. Helsinki: Hakapaino. [Viitattu 14.6.2010]

10. Tunturi, P., Tunturi, P. 1999. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittelyt. 3. painos. Tampere: Tammer-Paino Oy. [Viitattu 14.6.2010]

11. KAMAT – tietokortti. 2010. Rae- ja hiekkapuhallus [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.6.2010]
<http://www.ttl.fi/partner/kamat/tietokortteihin/Documents/Raejahiekkapuhallus.pdf>

12. Infradex Oy. 2010c. Emissiivisyystaulukot [verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.6.2010] <http://www.infradex.com/pdf/emissiivisyys.pdf>

13. Järvelä, P., Syrjälä, K. Vastela, M. 2000. Ruiskuvalu. 3. painos. Tampere: Plastdata Oy. [Viitattu 14.6.2010]

LIITTEET