



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TONI TURHANEN
PAINEVALETUN ALUMIINISEOSKOMONENTIN PAINETIIVEY-
DEN JA KONEISTETTAVUUDEN PARANTAMINEN

Diplomityö

Tarkastajat: dosentti Juhani Orkas,
Associate Professor Pasi Peura
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 9. maaliskuuta 2016

TIIVISTELMÄ

TONI TURHANEN: Painevaletun alumiiniseoskomponentin painetiiveyden ja koneistettavuuden parantaminen
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 70 sivua
Toukokuu 2017
Materiaalitekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Metallimateriaalit
Tarkastajat: dosentti Juhani Orkas, Associate Professor Pasi Peura

Avainsanat: alumiiniseos, painevalu, painetiiveys, vuototiiveys, tiiviys, huokoisuus

Diplomityössä tutkittiin painevalettujen ovensuljinrunkojen paine- ja vuototiiveyttä. Alumiiniseoksesta kylmäkammiomenetelmällä valettujen runkojen valueräkohtaisen tiiveyden oli todettu vaihtelevan runkojen huokoisuudesta johtuen. Huokoisuus ja tästä aiheutuva öljyn vuotaminen rungon läpi aiheuttivat merkittäviä sisäisiä laatukustannuksia ja tuotannollisia ongelmia. Työn tavoitteena oli tunnistaa valurunkojen vuotomekanismit ja löytää potentiaalisia keinoja laatukustannusten alentamiseksi ja laadunvalvonnan kehittämiseksi. Tavoitteena oli selvittää lisäksi valurungon ja materiaalin koneistettavuutta yleisesti.

Työssä tutustuttiin valutoimittajan valmistusprosessiin, ovensulkimen rakenteeseen sekä ovensulkimen tuotantoprosessiin ja laadunvalvontaan. Vuotavissa ovensuljinrungoissa esiintyviä valuvirheitä tutkittiin ja vuotomekanismeja pyrittiin selvittämään murtopinta- ja metallografisen tarkastelun avulla. Korjaavia toimenpiteitä kartoitettiin rungon geometrian, valuprosessin, tuotantoprosessin ja laadunvalvonnan osalta. Valurungon geometriaa kehitettiin ja näiden runkojen vuototiiveyttä testattiin.

Tehtyjen tutkimusten perusteella todennäköisimpänä ja yleisimpänä vuotomekanismina pidettiin kaasuhuokoisuuden erityistyyppiä, kuplakanavaa. Valurungon geometriaa kehitettiin vuototiiveyden parantamiseksi ja kehitettyä runkoa testattiin muutosten toimivuuden varmentamiseksi.

ABSTRACT

TONI TURHANEN: Improving the pressure tightness and the machinability of an aluminium alloy high pressure die casting
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 70 pages
May 2017
Master's Degree Programme in Materials Engineering
Major: Metallic Materials
Examiner: Docent Juhani Orkas, Associate Professor Pasi Peura

Keywords: aluminium alloy, high pressure die casting, pressure tightness, leak-tightness, porosity

In this thesis the pressure and leak tightness of high pressure die cast door closer bodies were studied. The bodies cast of aluminum alloy by the cold chamber method had suffered of poor leak tightness. The leaking occurred through the walls of the casting through channels of porosity. Occasionally recurring leakages caused significant internal quality costs and harm to several production processes. The main objectives of this thesis were to identify root causes for leaking, to find potential means to lower quality costs and to improve quality control of the door closer bodies. Another objective was to study the machinability of the alloy and the door closer bodies.

The goal of this thesis work was to identify the main leaking mechanism of a door closer body casting and to find and plan corrective actions in cooperation with the foundry. The leaking mechanism was studied by fracture surface and metallographic examination of leak paths and their surrounding microstructure. The observations and the known conditions of the casting process were used to explain the formation of the found defects.

It was found that leaking occurred through a network of porosity that had most likely been formed as a combination of bubble damage and shrinkage. It was concluded that trails of bubbles would enable the formation of shrinkage driven porosity network. Machining would cut open these bubble trails allowing leakage. The casting design was improved and door closers with the new design were tested for leak tightness.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Abloy Oy:n Joensuun tehtaalla toimivalle Door Control -yksikölle. Diplomityön tarkastajina toimivat dosentti Juhani Orkas ja Associate Professor Pasi Peura.

Haluan osoittaa kiitokseni kaikille, jotka ovat tarjonneet apuaan, kannustaneet tai muutoin myötävaikuttaneet diplomityön syntymiseen. Erityiskiitokset haluan antaa dosentti Juhani Orkkaalle tasokkaasta ohjauksesta ja opetuksesta sekä Juha Nykäselle väsymättömästä tuesta opiskelijoiden hyväksi. Kiitoksen ansaitsevat myös kollegani, ystäväni, perheeni ja puolisoni, jotka ovat osaltaan luoneet edellytyksiä pitkäjänteisen työn suorittamiselle.

Joensuussa, 11.4.2017

Toni Turhanen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	ALUMIINISEOSTEN PAINEVALAMINEN	2
3.	PAINETIIVEYTTÄ ALENTAVAT VIRHEET ALUMIINISEOSPAINIVALUISSA.....	5
3.1	Oksidikalvojen ja kaasun sekoittuminen sulaan.....	6
3.2	Kaasuhuokoisuus.....	9
3.2.1	Kuplavirusheet.....	10
3.2.2	Kaasuhuukokset	13
3.2.3	Vetyhuokoisuus.....	14
3.3	Kutistumahuokoisuus	15
3.4	Huokoisuuden ehkäiseminen ja hallitseminen	18
4.	NÄYTEKAPPALEIDEN MURTOPINTA- JA METALLOGRAFINEN TARKASTELU	20
4.1	Valurungon materiaali.....	22
4.2	Murtopintatarkastelu	23
4.2.1	Näytteiden valmistus.....	23
4.2.2	Stereomikroskooppitarkastelu.....	24
4.3	Metallografinen poikkipintatarkastelu	29
4.3.1	Näytteiden valmistus.....	29
4.3.2	Tarkastelu optisella mikroskoopilla.....	30
5.	VALURUNGON PAINETIIVEYDEN PARANTAMINEN	39
5.1	Läpivuotojen syyt ja vuotomekanismit	42
5.2	Vuoto-ongelman ajoittaisuus.....	44
5.2.1	Kuplakanavien esiintyminen.....	44
5.2.2	Kaksoiskalvojen esiintyminen	45
5.3	Valurungon geometrian parantaminen ja koneistuksen kehittäminen	45
5.4	Valimon tuotantoprosessi.....	50
5.5	Korjaavia jälkikäsittelymenetelmiä.....	52
5.5.1	Tiivistäminen	52
5.5.2	Vuotokanavien mekaaninen sulkeminen	53
6.	VALURUNGON LAADUNVALVONTA	54
6.1	Painetiiveyden laadunvalvonta.....	54
6.2	Laadunvalvonnan kehittäminen	56
7.	MATERIAALIN KONEISTETTAVUUS.....	57
7.1	Valurungon koneistuksessa ilmenneet ongelmat	57
7.2	Mikrorakenteen vaikutukset koneistettavuuteen.....	59
8.	YHTEENVETO	67
	LÄHTEET.....	69

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Kylmäkammiopainevalukoneen periaatekuva. [3]</i>	2
Kuva 2.	<i>Al–Si-faasidiagrammi. [6]</i>	4
Kuva 3.	<i>Kaasukuplien ja kaksoisoksidikalvojen sekoittumiseen johtavaa sulan pinnan liikettä. [2]</i>	6
Kuva 4.	<i>Kaksoisoksidikalvojen väliin sulkeutuneita mikrokuplia sekä nosteen vaikutuksesta kohoava makrokupla. [2]</i>	8
Kuva 5.	<i>Periaatekuva kuplakanavan muodostumisesta ja luhistumisesta. [2]</i>	11
Kuva 6.	<i>Kuplakanavan kehittymisen vaiheet painevalussa.</i>	12
Kuva 7.	<i>Alumiinisulaan liunneen vedyn synnyttämän huokoisuuden tilavuusprosentti huokosten määrän ja koon suhteen. [2]</i>	14
Kuva 8.	<i>Periaatekuva alieutektisen Al–Si-seoksen jähmettymisestä kestopuotissa. [12]</i>	16
Kuva 9.	<i>Metallin kutistumisen kolme vaihetta. [2]</i>	17
Kuva 10.	<i>Valurunko valuasennossa (a) ja valurungon päätyvaluportti sekä ylijuoksu (b).</i>	20
Kuva 11.	<i>Kaksipesäisen muotin valut, joista ylijuoksut on irrotettu ja valukkeet (a) sekä ylijuoksu (b).</i>	21
Kuva 12.	<i>Rungon valuaihio, josta on poistettu valukkeet ja purseet.</i>	21
Kuva 13.	<i>Murtopintanäytteet (1) ja (2).</i>	23
Kuva 14.	<i>Kupla ja sen avautunut kuplakanava murtopintanäytteessä 1.</i>	24
Kuva 15.	<i>Haarautunut kuplakanava murtopinnoilla (a) ja (b).</i>	25
Kuva 16.	<i>Suurennos haarautuneesta kuplakanavasta.</i>	26
Kuva 17.	<i>Kuplakanava murtopinnoilla (a) ja (b).</i>	27
Kuva 18.	<i>Öljyn kostuttamaa aluetta vuodon aiheuttaneen kuplakanavan läheisyydessä.</i>	28
Kuva 19.	<i>Kuplakanava ja öljyn kostuttamaa rakennetta.</i>	29
Kuva 20.	<i>Poikkipintanäytteiden valu epoksiin.</i>	30
Kuva 21.	<i>Perusrakennetta ja huokosia kiillotetulla etsaamattomalla näytepinnalla.</i>	31
Kuva 22.	<i>Suurennos kuvassa 21 esiintyvistä huokosista.</i>	32
Kuva 23.	<i>Mahdollisen kuplakanavan seinämäpintaa.</i>	33
Kuva 24.	<i>Kiinni luhistuneita kuplakanavia.</i>	34
Kuva 25.	<i>Mikrorakennetta valutilaisen pinnan läheisyydessä.</i>	35
Kuva 26.	<i>Suurennos mikrorakenteesta valutilaisen pinnan läheisyydessä.</i>	36
Kuva 27.	<i>Kolme dendriittiä lähellä valupintaa.</i>	37
Kuva 28.	<i>Suurennos kuvan 27 keskimmäisestä dendriitistä.</i>	38
Kuva 29.	<i>Vuotoja rungon koneistetulla ja maalatulla päätypinnalla.</i>	39
Kuva 30.	<i>Paljain silmin havaittavia (a) ja ei havaittavia vuotokanavia (b).</i>	40

Kuva 31.	<i>Korjaus- ja kehitystoimenpidevaihtoehtojen kustannustehokkuusvertailu.</i>	41
Kuva 32.	<i>Valun suurimman massakeskittymän koko ja sijainti vanhassa (a) ja uudessa (b) geometriassa.</i>	47
Kuva 33.	<i>Valurungon paranneltu geometria sisäänvalupäädyssä (a) ja ylijuoksupäädyssä (b).</i>	48
Kuva 34.	<i>Koneistetun rungon sisäänvalu- (a) ja ylijuoksupääty (b).</i>	49
Kuva 35.	<i>Kokoonpannun ja maalatun ovensulkimen päädyt.</i>	49
Kuva 36.	<i>Rouhinta-avaruudessa puomin värähtelyn seurauksena syntyneitä uria.</i>	58
Kuva 37.	<i>Kaksoisoksidikalvo ja sen pintaan kasvaneita primaaripiikkeitä.</i>	60
Kuva 38.	<i>Kaksoiskalvo tai mikrohalkeama.</i>	61
Kuva 39.	<i>Primaaripiikkeitä jonomuodostelmassa.</i>	62
Kuva 40.	<i>Suuria primaaripiikkeitä.</i>	63
Kuva 41.	<i>Kaksi 50 µm pituista primaaripiikidettä.</i>	64
Kuva 42.	<i>Piidendriitti.</i>	65
Kuva 43.	<i>Selväraajainen muutos mikrorakenteessa.</i>	66

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Juoksevuus	Valuterminologiassa juoksevuudella tarkoitetaan etäisyyttä, johon tunnetussa lämpötilassa oleva metallisula ehtii virrata määrätynlaiseen testimuottiin valettaessa ennen sulan jähmettymistä.
Kaksoiskalvo	Kaksoisoksidikalvo. Alumiinisulan ja ilman rajapintaan syntyneen oksidikalvon sekoituessa sulaan, se taittuu kaksin kerroin itseään vasten. Oksidikalvojen välille ei muodostu juurikaan sidoksia, vaan niiden väli säilyy epäjatkuvuuskohtana materiaalissa.
Kuplakanava	Metallisulassa nouseva ilmakupla hapettaa metallia pinnallaan muodostaen oksidikalvoa. Oksidikalvo repeytyy jatkuvasti kuplan huipulla ja eheytyy uudelleen liukuessaan kuplan pintaa pitkin muodostaen oksidikalvoputken eli kuplakanavan.

1. JOHDANTO

Painevalettujen alumiiniseoskomponenttien käyttö on lisääntynyt merkittävästi 1900-luvun lopun jälkeen. Painevalukomponentit alkoivat yleistyä ensin autoteollisuudessa, jonka tarpeisiin alumiiniseosten korkea lujuus–tiheys-suhde ja hyvät korroosio-ominaisuudet sopivat erinomaisesti. Sittemmin ylieutektiset alumiini–piiseokset ovat kyenneet korvaamaan valuraudan monissa kulumisen kestoa vaativissa sovelluksissa.

Painevalu on valumenetelmä, jossa metallisula painetaan suurella nopeudella terässiiseen kestomuottiin. Painevalu on osoittanut tehokkuutensa muodoltaan monimutkaisten valukomponenttien sarjatuotantomenetelmänä. Painevalumenetelmä, kuten muutkin kestomuottimenetelmät, kykenee tuottamaan pinnanlaadultaan ja mittatarkkuudeltaan tasalaatuisia valuja. Kestomuottimenetelmien eduksi voidaan lukea lisäksi suuren jäähtymis- ja jähmettymisnopeuden tuottama hienojakoinen raerakenne, joka parantaa valukomponenttien mekaanisia ominaisuuksia. [1.]

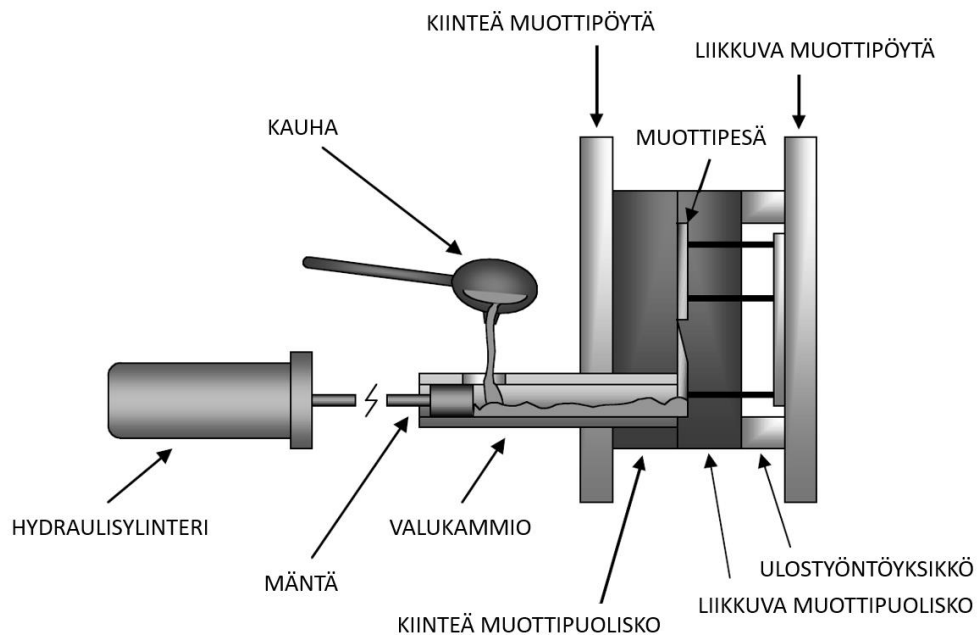
Kyky erottaa ainetilavuuksia tiiviisti toisistaan on useiden komponenttien toiminnan kannalta kriittinen ominaisuus. Toisin kuin esimerkiksi mekaanisia vaatimuksia, painetiiveysvaatimusta ei voida lähestyä ylimitoittamisen tai ylilaadun keinoin. Riittävän varmuuden ja siten siedettävän riskin saavuttaminen painetiiveyden tai vastaavan luonteisten ominaisuuksien osalta voikin olla monimutkaista. Usein valimo ja valun käyttäjä määrittelevät valukappaleen sisäisen rakenteen laatutason. Lisäksi voidaan määrittellä, miten laatutasoa ylläpidetään ja mitataan.

Painevalut sisältävät poikkeuksetta rakenteellisia virheitä, kuten sulkeumia ja huokoisuutta. Huokoisuuden syntymekanismia on tutkittu merkittävästi, mutta huokoisuustyyppien keskinäisvaikutuksesta ja osuudesta valukomponenttien painetiiveyteen ei olla yksimielisiä. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin alumiiniseospainevalukomponentin vuotomekanismeja murtopinta- ja metallografisen tarkastelun keinoin sekä vertailtiin kustannustehokkaita ratkaisuja laatukustannusten alentamiseksi. [2.]

2. ALUMIINISEOSTEN PAINEVALAMINEN

Painevalaminen on valumenetelmä, jossa metallisula työnnetään suurella nopeudella teräksiseen kestormuottiin. Painevalamiselle on ominaista muotin nopea täyttyminen ja valukappaleen jähmettyminen muotin sisälle puristettavan korkean paineen alaisena. Painevalumenetelmissä ei käytetä erillisiä syöttöjä, vaan täyttöjärjestelmä toimii myös syöttöjärjestelmänä. Painevalaminen on suurille tuotantomäärille soveltuva valmistusmenetelmä, jolla voidaan tuottaa nopeasti geometrialtaan monimutkaisia ja yksityiskohdaisia valukappaleita. Painevalukappaleet ovat mittatarkkoja ja tasalaatuisia, ja niillä on yleisesti hyvä pinnanlaatu ja mikrorakenne. [1.]

Valualumiiniseoksia ja muita kevytmetalliseoksia valetaan kylmäkammiomenetelmällä. Kylmäkammiomenetelmässä sula annostellaan kuumanapitounista valukammioon useimmiten kauhomalla. Valukammio on pääsääntöisesti vaakatasossa ja muotti avautuu vastaavasti vaakasuunnassa yhdeltä pystysuuntaiselta jakopinnalta. [1.]



Kuva 1. Kylmäkammiopainevalukoneen periaatekuva. [3]

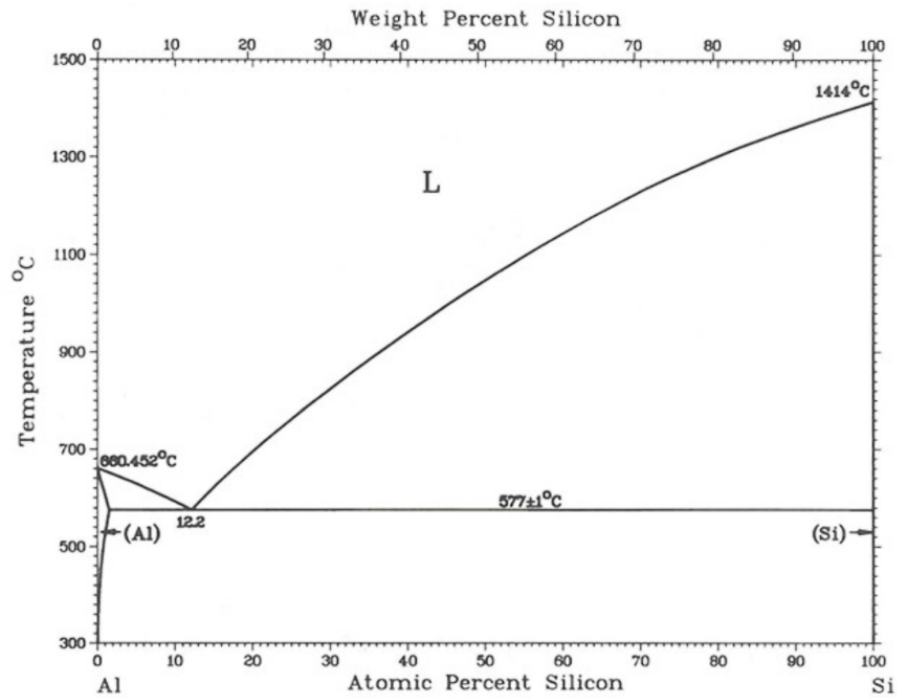
Kuvassa 1 on esitetty kylmäkammiopainevalukoneen toimintaperiaatetta erityisesti täyttöjärjestelmän osalta. Täyttöjärjestelmän muodostavat mäntää ohjaava hydraulijärjestelmä, mäntä varsineen, valukammio ja valukanavisto. Valukammion koko valitaan siten, että noin kolme neljäsosaa valukammion tilavuudesta riittää täyttämään valukanaviston ja muottipesät. Valukammio halutaan näin täydeksi muun muassa, jotta ilmaa kulkeutuisi vähemmän valukanavistoon ja muottipesiin. [1, 2.]

Kylmäkammiopainevalukoneen valujakso alkaa sulan annostelulla. Seuraava vaihe on koneen valuyksikön/täyttöjärjestelmän tuottama kolmivaiheinen valuisku. Valuiskun ensimmäisessä eli hitaassa vaiheessa mäntä työntää sulaa, kunnes sulan pinta saavuttaa ensimmäisen valuportin. Toisessa eli nopeassa vaiheessa mäntä kiihdytetään iskumaiseen liikkeeseen, jolloin muottipesä ylijouksuineen täyttyy nopeasti. Muotin täyttymistä seuraa välittömästi kolmas eli tiivistysvaihe, jossa paine kasvatetaan valittuun jälki- eli tiivistyspaineeseen. Tiivistyspainetta pidetään yllä, kunnes valu on jähmettynyt ja jäähtynyt riittävästi. Tämän jälkeen paine poistetaan ja liikkuva muottipöytä siirtyy taka-asentoon avaten muotin. [1.]

Valu irtoaa liikkuvasta muottipuoliskosta ulostyöntimien työntämänä. Muottiin ja mahdollisiin keernoihin ruiskutetaan irrotus- ja voiteluainetta ja ulostyöntimet vedetään taka-asentoon. Muotti jäähtyy veden haihtuessa irrotus- ja voiteluaineesta. Muotti suljetaan, kun se on kuiva ja sopivasti jäähtynyt. Liikkuvaa muottipöytää ohjataan hydraulisesti joko suoraan tai polvinivelistön välityksellä. Ohjausjärjestelmä estää valuiskun painetta avaamasta muottia. [1.]

Alumiiniseoksia voidaan valaa kaikilla tavallisilla valumenetelmillä ja ne ovat keskimäärin helppoja valaa. Suurin osa kaikista alumiiniseosvaluista valmistetaan kylmäkammiopainevalumenetelmällä [4]. Valualumiiniseoksille on tyypillistä suhteellisen matala sulamispiste ja hyvä juoksevuus. Kestomuottimenetelmillä hyvä lämmönjohtavuus mahdollistaa lämmön johtumisen muottiin nopeasti ja siten lyhyen jaksoajan. Alumiiniseosvaluilla on lisäksi hyvä valutilainen pinnanlaatu. [1, 4.]

Alumiinia seostetaan valettavuuden ja haluttujen ominaisuuksien parantamiseksi. Pii on tärkein painevalualumiiniseosten seosaine. Pii parantaa seoksen mekaanisia ominaisuuksia ja laskee tiheyttä, pituuden lämpölaajenemiskerrointa sekä alttiutta kuumahalkeilulle. Piin tärkein tehtävä seosaineena on kuitenkin alentaa seoksen sulamispistettä ja parantaa sulan juoksevutta. Painevalualumiiniseosten piipitoisuus on yleensä yli 7 %. Juoksevouden ja jäähtymisnopeuden osalta optimaalisena piipitoisuutena painevalumenetelmille voidaan pitää 8...12 painoprosentin pitoisuutta [4]. [4, 5.]



Kuva 2. Al-Si-faasidiagrammi. [6]

Alumiini-pii faasidiagrammista (kuva 2) voidaan nähdä eutektisen pitoisuuden olevan noin 12,2 atomiprosenttia eli noin 12,6 painoprosenttia piitä. Eutektisen lämpötilan voidaan nähdä olevan noin 577 °C. Seoksia, joiden piipitoisuus ylittää eutektisen pitoisuuden kutsutaan yliutektiseksi Al-Si-seokseksi. Juoksevuus ja mekaaniset ominaisuudet paranevat edelleen piipitoisuuden ollessa eutektista pitoisuutta suurempi. Pii parantaa kovuutensa vuoksi myös seoksen kulumisen kestoa erityisesti yliutektisilla seoksilla. Tällöin mikrorakenteessa esiintyy haaroittuneen levymäisen eutektisen piin lisäksi runsaasti kookkaampia primaaripiikiteitä. Primaaripiipartikkeleiden Vickers-kovuus on noin 10 GPa (1020 HV). [4.]

Tavallisia valualumiiniseosten seosaineita ovat piin lisäksi muun muassa kupari, magnesium, rauta, sinkki ja nikkeli. Kupari on piin jälkeen toiseksi yleisin valualumiiniseosten seosaine. Kupari tekee alumiiniseoksista karkenevia ja lisää siten niiden lujuutta, kovuutta ja lastuttavuutta. Kupariseostus heikentää kuitenkin alumiiniseosten korroosio-ominaisuuksia. Magnesium parantaa samoin seosten mekaanisia, mutta myös korroosio-ominaisuuksia. Rautaa seostetaan erityisesti painevalualumiiniseoksiin yleensä 0,7...1,3 painoprosenttia. Rautaseostus ehkäisee valun tarttumista teräksisen muotin pintaan ja vähentää raudan liukenemistä muottipinnasta sulaan. Rauta laskee lisäksi seosten kuumahalkeilualttiutta, mutta toisaalta heikentää materiaalin sitkeyttä. [4, 7.]

3. PAINETIIVEYTTÄ ALENTAVAT VIRHEET ALUMIINISEOSPAINIVALUISSA

Painetiiveydellä eli vuototiiveydellä tarkoitetaan kiinteätillaisen komponentin kykyä estää ympäristöä korkeammassa paineessa olevaa fluidia (kaasua tai nestettä) läpäisemästä itseään. Yleensä tämä tarkoittaa käytännössä, että komponentti on painetiivis, kun sen sisään suljettu fluidi ei kykene virtaamaan ulos komponentin läpi määrättyissä olosuhteissa. Komponentti vikaantuu painetiiveyden osalta fluidin läpäistessä sen ilman komponentin ulkoisesti havaittavaa muodonmuutosta. Makrotasolla tapahtuvaa komponentin rakenteellista pettämistä ei yleensä kutsuta heikoksi painetiiveydeksi.

Metalleja pidetään yleisesti tiiviinä ja rakenteellisesti homogeenisina materiaaleina. Jotkin metallimateriaalit ja valmistusmenetelmät omaavat kuitenkin alttiuden materiaalin eheyttä ja yhtenäisyyttä heikentävien virheiden muodostumiselle. Tällaisia virheryhmiä ovat esimerkiksi huokoisuus, sulkeumat ja jähmettymisestä tai lämpötilanmuutoksista johtuvien tilavuudenmuutosten aiheuttamat plastiset muodonmuutokset. Komponentissa esiintyvää läpivuodon mahdollistavaa virhettä tai virheryhmää kutsutaan vuotokanavaksi.

Huokoisuus on lähes kaikille valumenetelmille ominainen virhetyyppi. Huokoisuus on yleensä ei-toivottu ominaisuus sen heikentäessä valukappaleen mekaanisia ominaisuuksia ja painetiiveyttä. Huokoisuudella tarkoitetaan valukappaleen sisäisiä tai pintaan avautuvia aukkoja, onteloita tai muita materiaalissa esiintyviä epäjatkuvuuskohtia. Nämä epäjatkuvuuskohdat eli huokokset toimivat materiaalissa jännityskeskittyminä heikentäen erityisesti valukappaleen lujuutta ja väsymisen kestoa.

Huokokset ovat poikkeuksetta kaasun täyttämiä. Kaasun koostumus ja paine riippuvat huokosen syntymistavasta ja -olosuhteista. Huokoisuus voidaan jakaa syntyperusteisesti kaasuhuokoisuudeksi ja kutistumahuokoisuudeksi. Huokosten syntymistapa on usein pääteltävissä huokosten koon, muodon ja sijainnin perusteella. Huokoisuus voidaan jakaa myös huokosten koon perusteella makro- ja mikrohuokoisuudeksi. Makrohuokoisuudella tarkoitetaan huokoisuutta, jossa huokokset ovat kooltaan paljain silmin erotettavia ja mikrohuokoisuudella vastaavasti huokoisuutta, joka ei ole paljain silmin havaittavissa. [2.]

Huokoisuutta pidetään yleisesti pääasiallisena alumiiniseospainivalujen painetiiveyttä heikentävänä tekijänä. Huokoisuutta esiintyy alumiiniseospainivaluissa hyvin yleisesti ja monien valujen kohdalla huokoisuutta on haasteellista ehkäistä. Usein pyritäänkin lähinnä hallitsemaan huokoisuuden sijoittumista valukappaleessa, jotta sitä ei esiintyisi

alueilla, joilla se helpoiten aiheuttaa ongelmia. Valukappaleen ja valukanaviston geometrioiden sekä täyttöjärjestelmän suunnittelu ovat ensiarvoisen tärkeitä alumiiniseospainevalujen huokoisuuden välttämiseksi ja hallitsemiseksi. [2.]

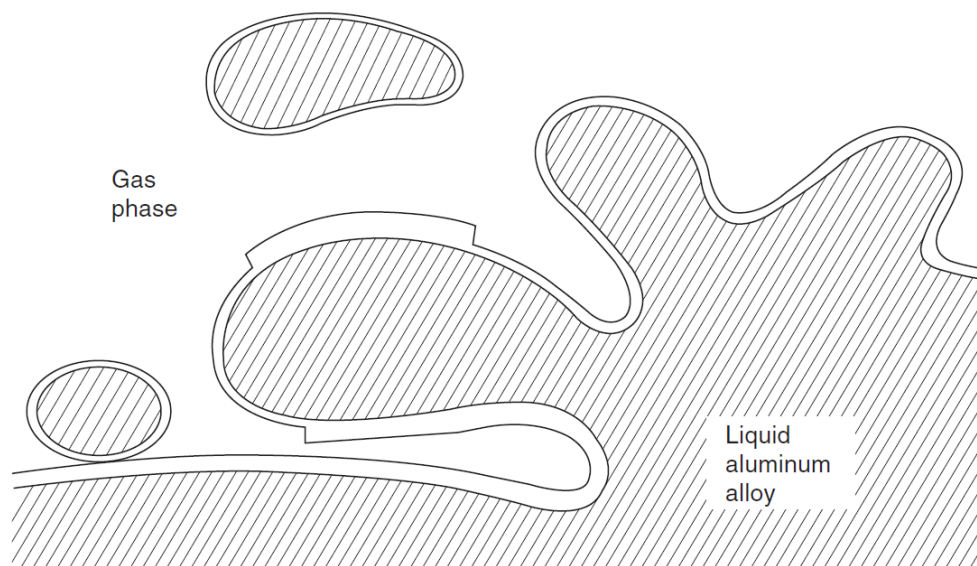
Valukappaleen painetiiveyden voi turmella huokoisuuden lisäksi valukappaleeseen muodostunut halkeama. Painevaluissa halkeamat muodostuvat yleensä jähmettymiskutistumisen aiheuttamien jännitysten vuoksi. Tällöin jännityksen keskittyminen valukappaleessa olevaan muodoltaan terävään virheeseen johtaa jännityksen laukeamiseen halkeamisen kautta. Halkeama voi toimia itsessään vuotokanavana tai yhtyä toiseen virheeseen mahdollistaen näin läpivuodon. [2.]

3.1 Oksidikalvojen ja kaasun sekoittuminen sulaan

Alumiini on luonteeltaan herkästi hapettuva metalli. Kiinteä alumiini reagoi hetkessä hapen kanssa muodostaen metallipintaansa suojaavan tiiviin ja kestäväen oksidikerroksen kaavan 1 mukaisesti.



Ilmiötä kutsutaan passivoitumiseksi. Alumiinin hapettuminen on yhä nopeampaa korotetussa lämpötilassa ja sulatilassa, jonka vuoksi sulapinnan voidaan sanoa muodostavan oksidikalvon aina kohdatessaan happea. Reaktio hapen kanssa alkaa välittömästi alumiinin altistuessa esimerkiksi ilmalle tai vesihöyrylle. [2, 4.]



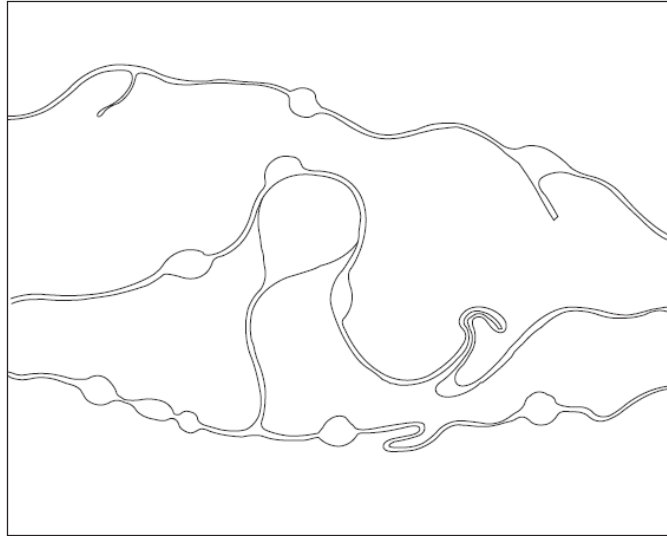
Kuva 3. Kaasukuplien ja kaksoisoksidikalvojen sekoittumiseen johtavaa sulan pinnan liikettä. [2]

Kuva 3 esittää sulan pinnalle muodostuneen oksidikalvon hajoamiseen ja sekoittumiseen johtavaa turbulenttista pinnan liikehdintää tai loiskumista. Kuva ilmentää myös, että oksidikalvon on taituttava kaksin kerroin itseään vasten voidakseen sekoittua su-

laan. Kyseisellä mekanismilla muodostuvien kaksoisoksidikalvojen, tai lyhyemmin kaksoiskalvojen, mukana sulaan sekoittuu kaasuja (ilmaa) ja mahdollisesti muita epäpuhtauksia. Koska oksidikalvo muodostuu sulan pintaan erittäin nopeasti, on todennäköistä, että kaikki sulaan sekoittuvat sulkeumat ovat oksidikalvon ympäröimiä. Oksidikalvo erottaa sulkeumat sulasta ja ehkäisee siten sulkeumien liukenemistä sulaan. Kaksoiskalvojen ulkopinnat ovat lähtökohtaisesti sulan kostuttamat, mutta sisäpinnat säilyvät kuivina. Sula ei pääse tunkeutumaan kalvojen väliin sisäpintojen hyvä kontaktin ja kaksoiskalvojen sisältämän kaasun vuoksi. [2.]

Alumiinivaluissa esiintyvät kaksoiskalvot ovat muodostuneet pääasiassa sulankäsittelyjen ja valuprosessin aikana, mutta myös romu ja sekundaariharkot sisältävät usein jo valmiiksi kaksoiskalvoja. Uusia kaksoiskalvoja syntyy erityisesti sularintamien kohdassa esimerkiksi sulaa kaadettaessa tai muotin täyttyessä. Tällöin sularintamien pintaan muodostuneet oksidikalvot muodostavat kaksoiskalvoja. Sulan virratessa muottipesään suuremmalla nopeudella kuin kaasu kykenee poistumaan, kaasun paine kasvaa vastustan muotin täyttymistä. Lämmön vaikutuksesta laajeneva kaasu voi hajottaa sulavirran useiksi suihkuiksi lisäten siten oksidikalvojen muodostumista ja kaasujen sekoittumista sulaan. Sulavirtaukset voivat lisäksi repiä laajoja kaksoiskalvoja ja edistää siten kaksoiskalvojen levittymistä sulaan. [2, 7.]

Kuva 4 pyrkii ilmentämään sulaan sekoittuneiden kaksoiskalvojen rakennetta. Kaksoiskalvojen sisään voi jäädä sulaan sekoittumisen yhteydessä ilmakuplia. Suhteellisen pienet ilmakuplat eivät pysty vapautumaan kaksoiskalvon sisältä riittämättömän nosteensa vuoksi. Suurempien, poikkimitaltaan millimetrin kokoluokkaa lähestyvien kuplien noste voi riittää oksidikalvon läpi murtautumiseen. Kuplien vapautumiseen vaikuttaa oleellisesti myös oksidikalvon paksuus. Vapautunut kupla pyrkii kohoamaan kohti sulan pintaa ja liikkuessaan hapettaa kohtaamaansa sulaa muodostaen oksidia. [2.]



Kuva 4. Kaksoisoksidikalvojen väliin sulkeutuneita mikrokuplia sekä nosteen vaikutuksesta kohoava makrokupla. [2]

Oksidikalvojen paksuuskasvuun vaikuttavat muun muassa hapen määrä, lämpötila ja aika. Sulaan sekoittuneiden kaksoiskalvojen kalvon paksuus vaihtelee yleensä noin 20 nanometristä muutamaan kymmeneen mikrometriin. Oksidikalvo voi saavuttaa 20 nanometrin paksuuden eli vain noin 10 molekyylin paksuuden noin kymmenessä millisekunnissa. Sulan pinnalle muodostuva oksidikalvo voi kasvaa ajan salliessa, esimerkiksi uunissa, hyvinkin paksuksi. Yli 100 μm paksuisten oksidikalvojen päätyminen valuihin on kuitenkin jokseenkin epätodennäköistä, sillä pintaan muodostuneet kalvot pyritään poistamaan, ja sulan annostelussa pyritään välttämään sulan ottamista aivan pinnasta. [2.]

Alumiinioksidi (Al_2O_3) on puhdasta alumiinia ja tavallisia alumiiniseoksia tiheämpää. Puhdasta alumiinioksidin tiheys on noin 4 g/cm^3 useimpien alumiinivaluseosten tiheyden ollessa noin $2,7 \text{ g/cm}^3$. Näin ollen alumiinioksidi uppoaa alumiinisulassa. Kaksoiskalvojen sisältämät epäpuhtaudet ja väliinsä sulkemat kaasut kuitenkin alentavat sulkeuman keskimääräistä tiheyttä. Sen lisäksi, että kaksoiskalvot kuljettavat sulaan ilmaa niiden väliin erkautuu ja diffundoituu sulaan liuenneita kaasuja, erityisesti vetyä. Riittävän määrän kaasua sisältävät kaksoiskalvot voivat käyttäytyä kuplan tavoin. Kaksoiskalvoja voidaan havaita koko matkalla sulan pinnalta altaan pohjaan saakka. [2.]

Sulan pintaan syntyvä alumiinioksidi on rakenteeltaan amorfista ja sen sulamispiste on noin $2050 \text{ }^\circ\text{C}$ [4]. Muodostunut alumiinioksidi ei sula tai liukene tavanomaisin sulankäsittelymenetelmin, vaan sulaan sekoittuneet kaksoiskalvot ovat pysyviä kiinteitä sulkeumia. Kaksoiskalvon kalvojen välille ei synny merkittävästi sidoksia osin, koska alumiiniseossulien lämpötila pysyy aina suhteellisen matalana, alle $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Sulassa esiintyvät virtaukset eivät yleensä kuitenkaan kykene avaamaan kaksoiskalvoja, vaan ne pysyvät taittuneina itseään vasten muun muassa pintavoimien ja kalvojen välisen kitkan seurauksena. Oksidikalvojen paksuuskasvun seurauksena hapen määrä kalvo-

jenvälisessä ilmatilassa vähenee. Tämä laskee kalvojen välistä painetta ja varmistaa edelleen, että kaksoiskalvot pysyvät kiinni toisiaan vasten. Sulan sisäiset virtaukset muovaavat kaksoiskalvoja aiheuttaen kaksoiskalvojen laskostumista ja edelleen kaksoiskalvojen rypistymistä keräsiiksi. Kaksoiskalvot voivat kuitenkin oieta, paisua ja avautua myöhemmin esimerkiksi kaasujen diffundoituessa ja erkautuessa kalvojen väliin tai sulan jäähtymis- ja jähmettymiskutistumisen aiheuttaman imun seurauksena. Kaksoiskalvot voivat avautua toisaalta myös halkeamisen seurauksena valun jähmettyessä tai sen jälkeen. Jähmettymisen, jäähtymisen tai kuormituksen aiheuttamat voimat keskittyvät helposti kaksoiskalvojen reunoihin ja voivat johtaa halkeaman muodostumiseen tai materiaalin murtumiseen. [2.]

Kaksoiskalvot ovat jo itsessään omantyyppisiä huokosia ja edistävät edelleen esimerkiksi imuhuokosten eli kutistumahuokosten kehittymistä. Toisaalta kaksoiskalvot ovat myös ohuita ja suhteellisen laajoja epäjatkuvuuskohtia, jotka heikentävät valukappaleen sitkeyttä ja lujuutta. [2.]

3.2 Kaasuhuokoisuus

Kaasuhuokoisuudella tarkoitetaan valuissa esiintyviä kaasun täyttämiä sisäisiä epäjatkuvuuskohtia, jotka syntyvät kaasujen sekoittuessa sulaan tai liuenneiden kaasujen erkautuessa sulan jäähtymisen seurauksena. Kaasuhuokoisuuden lähteitä voivat olla valumenetelmästä ja -olosuhteista riippuen sulaan sekoittuva ilma, muotista ja keernoista haihtuva vesi, palokaasut sekä sulaan liennut atomaarinen vety. Ilmaa voi sekoittua sulaan sulankäsittelyn ja sulan kaatamisen seurauksena sekä valujärjestelmän ja erityisesti muotin täytyessä. Muotin ja keernojen pinnoilta voi haihtua vettä sulan sekaan, mikäli irrotus- ja voiteluaine ei ole ehtinyt täysin kuivua ennen valuiskua. Irrotus- ja voiteluaineen komponentit voivat myös palaa muodostaen palokaasuja. [2.]

Kaasuhuokokset voivat olla olosuhteista ja syntymekanismistaan riippuen mikro- tai makrokokoluokkaa ja ovat usein muodoltaan yksinkertaisia, jopa pallomaisia. Kaasuhuokoisuutta voi esiintyä valun eri alueilla huokosten syntymekanismista ja koosta riippuen. Huokoisuus voi sijoittua tasaisesti koko valukappaleen tilavuudelle tai keskittyä jollekin, yleensä suuren ainevahvuuden alueelle. Valupinnan läheisyyteen keskittyvä pintahuokoisuus on useimmiten seurausta irrotus- tai voiteluaineesta haihtuneesta vedestä tai syntyneistä palokaasuista. Vaihtelua kaasuhuokoisuuden sijainnissa voi olla jopa valuerän peräkkäisten valujen välillä. Huokoisuuden esiintymistä on yhä vaikeampaa arvioida, mikäli valu on muodoltaan monimutkainen. Erityisesti mikrokokoluokan kaasuhuokoisuuden sijoittuminen valukappaleessa voi näyttäytyä hyvin sattumanvaraisena. [2.]

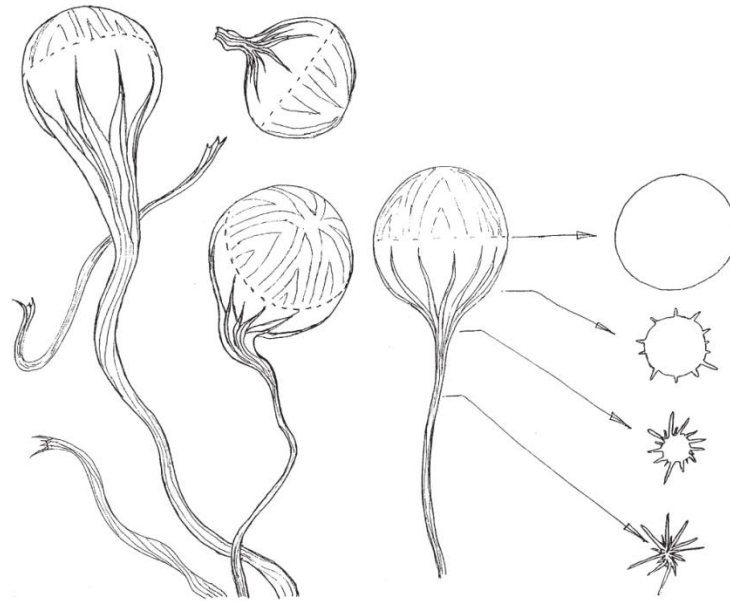
3.2.1 Kuplavrheet

Kaasukuplia voi syntyä sulaan valusyklin aikana pääasiassa kahdella tavalla: turbulenttisen sulan virtauksen aiheuttaman sekoittumisen seurauksena ja keernoilta tai muotista haihtumalla tai palotuotteina syntyvien kaasujen seurauksena. Epäonnistunut täyttöjärjestelmän suunnittelu voi johtaa muotin turbulenttiseen täyttymiseen, jossa jakautuneet ja uudelleen kohtaavat sulavirtaukset sulkevat kaasukuplia sisäänsä.

Ilmaa sekoittuu sulaan pääasiassa valuiskun aikana muun muassa valukammion liian pienen täyttöasteen, liian nopean tai hitaan männän liikkeen sekä monimutkaisen kanaviston ja muotin aiheuttamien turbulenttisen virtausten vuoksi. Sulaan sekoittunut ilma voi aiheuttaa paitsi kuplahuokosia myös kuplien liikkuaessaan synnyttämiä oksidikanavia, kuplakanavia (engl. bubble trail). Kuplakanavat syntyvät, kun hapetta sisältävä kaasukupla liikkuu herkästi hapettuvassa metallisulassa. Kuplan liikesuunnassa kuplan eteen eli yleensä kuplan yläpinnalle muodostuu metallin oksidia, joka repeää ja eheytyy jatkuvasti kuplan kohotessa. Syntyvä oksidikalvoputki liukuu kuplan taakse ja luhistuu sulassa vallitsevan paineen vuoksi muodostaen kaksoiskalvoa muistuttavan virheen. Kuplakanavat voivat ylittää kuplan syntymissijainnista valun pintaan ollen jopa joitain senttimetrejä pitkiä. [2.]

Kuplien etenemistä vaikeuttavat jähmettynyt materiaali ja sulkeumat, kuten kaksoiskalvot. Halkaisijaltaan keskimäärin viittä millimetriä pienemmät kuplat eivät kykene läpäisemään oksidikalvoja riittämättömän nosteensa vuoksi. Erityisesti pienet sulaan sekoittuneet kuplat jäävät usein pysyviksi virheiksi valuun. Suurten kuplien noste voi olla riittävä kohotukseen jopa osittain jähmettyneellä alueella. Kuplakanavat muodostavat omanlaisensa virherakenteen valuun. [2.]

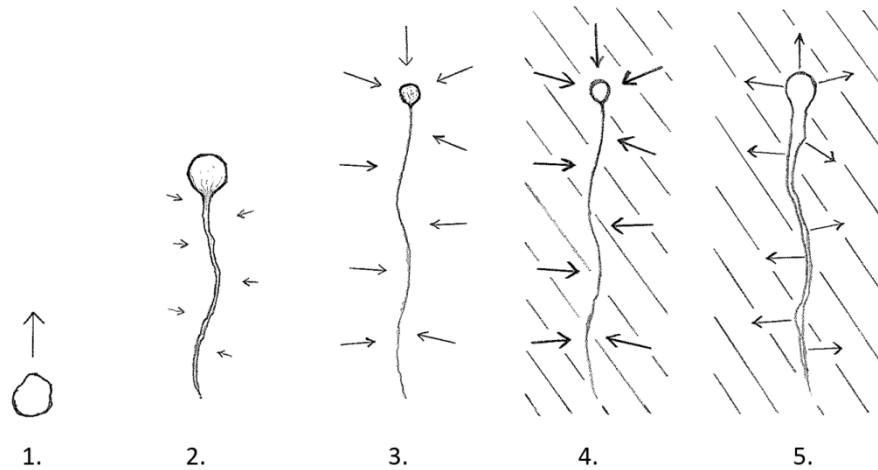
Ilman happipitoisuus riittää helposti hapettamaan kymmenien senttimetrien pituisia kuplakanavia, jos muodostuvan oksidikalvon paksuudeksi oletetaan 20 nanometriä. On myös osoitettu, että hapen loputtua ilmakuplasta typpi alkaa muodostaa oksidikalvon kaltaista alumiininitridikalvoa [8]. Hapen määrä ei siten ole rajoittava tekijä kuplakanavan pituuden osalta. Kuplakanavat voivatkin ylittää valun alapinnalta yläpinnalle asti. Usein kuplalla ei kuitenkaan ole aikaa nousta joitain senttimetrejä pidempiä matkoja. Muotin täytyessä syntyvät sulavirtaukset voivat lisäksi pilkkoa kuplakanavia osiin ja kuljettaa näitä erilleen. [2.]



Kuva 5. Periaatekuva kuplakanavan muodostumisesta ja luhistumisesta. [2]

Kuva 5 esittää oksidikalvon muodostumista kuplan ympärille ja kuplakanavan luhistumisen vaiheita. Kuplan noustessa kuplakanava luhistuu sulan hydrostaattinen paineen seurauksena. Luhistuneen kuplakanavan poikkileikkaus on muodoltaan tähden kaltainen. Kuplakanava ei yleensä sulkeudu täysin, vaan sen keskilinja pysyy auki oksidikalvon jäykkyyden vuoksi. Kuplakanavan syntymekanismin vuoksi toisiaan vasten luhistuvat kuplakanavan seinämät eivät tartu tai kiinnity toisiinsa.

Kuplakanava aiheuttaa helposti läpivuodon, mikäli se yhdistää valukomponentin kaksi pintaa (sisä- ja ulkopinnan). Yleensä kuplakanavat eivät avaudu valutilaiseen pintaan, vaan vuotokanava syntyy, kun kuplakanava koneistetaan esiin valukappaleen vastakkaisilta pinnoilta.



Kuva 6. Kuplakanavan kehittymisen vaiheet painevalussa.

Kuva 6 selventää kuplakanavan muodostumisen vaiheita painevaluprosessin näkökulmasta. Kuvan ensimmäisessä vaiheessa sulaan on sekoittunut kaasukupla, joka alkaa kohota muotin täytyttyä nosteen vaikutuksesta. Kuplan kohotessa muodostuva kuplakanava luhistuu sulan hydrostaattisen paineen vuoksi. Kolmannessa vaiheessa kupla ja kuplakanava kokoonpuristuvat tiivistyspaineen aikaansaamana murto-osaan aiemmasta tilavuudestaan. Valu jähmettyy tiivistyspaineen alaisena. Viidennessä vaiheessa tiivistyspaine poistuu ja muotti avataan. Kaasukuplan paine on edelleen lähes tiivistyspaineen suuruinen, ja kupla laajenee ja täyttää uudelleen osan kuplakanavasta. Ympäröivä metalli myötää, koska ei ole jäähtynyt riittävästi eikä siten saavuttanut riittävää lujuutta kyetäkseen vastustamaan kuplan sisäisen paineen ajamaa muodonmuutosta.

Valuissa esiintyvät kuplakanavat ovat usein luhistuneita ja kiinni sulkeutuneita. Täysin avautuneita kuplakanavia on kuitenkin löydetty ainakin alumiini- ja sinkkiseospainevaluista [9]. Painevaluprosessissa esiintyvät suuret sulansyöttönopeudet mahdollistavat ilman ja muiden kaasujen sekoittumisen sulaan merkittävässä määrin. Tiivistysvaiheessa tiivistyspaine puristaa sulaan sekoittuneita kaasukuplia kasaan. Ideaalikaasun tilavuus on kääntäen verrannollinen sen paineeseen. Näin ollen ideaalikaasukuplan paineen kasvaessa yhdestä baarista 300 baariin sen tilavuus laskee vastaavasti kolmassadasosaan alkuperäisestä. Pallon muotoisen kuplan halkaisija putoaisi vain noin 15 prosenttiin alkuperäisestä. Koska ideaalikaasun kokoonpuristuminen on hyvä approksimaatio ilman kokoonpuristumisesta, voi ilmakuplien ajatella kokevan tiivistysvaiheessa samankaltaisen tilavuudenmuutoksen. Sula ei puristu merkittävästi kasaan tiivistyspaineen vaikutuksesta, vaan tiivistyspaineen tarkoitus onkin taata muotin täydellinen täyttyminen ja kaasukuplien tilavuuden minimoituminen. Ulkoisen paineen pudotessa tiivistyspaineen poistuessa ja muotin avautuessa kaasuhuokosen paine pyrkii laajentamaan huokosta ja kohonneen kuplan muodostamaa kuplakanavaa valumateriaalia vastaan. Kaasuhuukonen voi laajentua ja avata kuplakanavansa, jos valu ei ole täysin jähmettynyt tai myötölujuus ei ole kasvanut riittävälle tasolle. Tilanne on mahdollinen, sillä valimot pyrkivät minimoimaan valusyklin keston taloudellisista syistä. Kuplakanavia on vaikea havaita

tavanomaisin laadunvalvontamenetelmin. Avoimien kuplakanavien esiintymistä ehkäisee tehokkaasti, jos valun annetaan jäähtyä riittävästi ennen muotin avaamista. [2.]

Keernoilta haihtuva vesi ja palotuotteina syntyvät kaasut muodostavat tehokkaasti sulaa hapettavia kuplia. Tällaiset kuplat voivat muodostaa oksidikalvoltaan paksumpia kuplakanavia kuin ilmakuplat. Oksidikalvon suurempi paksuus ja siten suurempi jäykkyys voivat ehkäistä kuplakanavaa luhistumasta täysin, eikä kanavan siten tarvitse laajentua toimiakseen vuotokanavana. Kaava 2 esittää, kuinka alumiinioksidia muodostuu vesihöyryn ja sularintaman jähmettyneellä rajapinnalla. [2.]



Läpivuodot esiintyvät usein valun alueilla, joilla on kulkenut kuplia ja esiintyy siten kuplakanavia. Kuplakanavat ovat painetiiveyden kannalta muihin huokoisuustyyppisiin nähden ongelmallisempia, sillä ne ovat muodoltaan pitkiä ja suorina nosteen ajaman syntymekanisminsa vuoksi.

3.2.2 Kaasuhuokokset

Huokosten ydintyminen kiinteille esimerkiksi sulkeumien pinnoille on sitä suotuisampaa, mitä suurempi on sulan ja sulkeuman välinen kostutuskulma. Toisaalta kyse on ennemminkin siitä, kuinka hyvä kontakti, ja millainen adheesio sulan atomien ja kiinteän sulkeuman atomien välillä on. [2.]

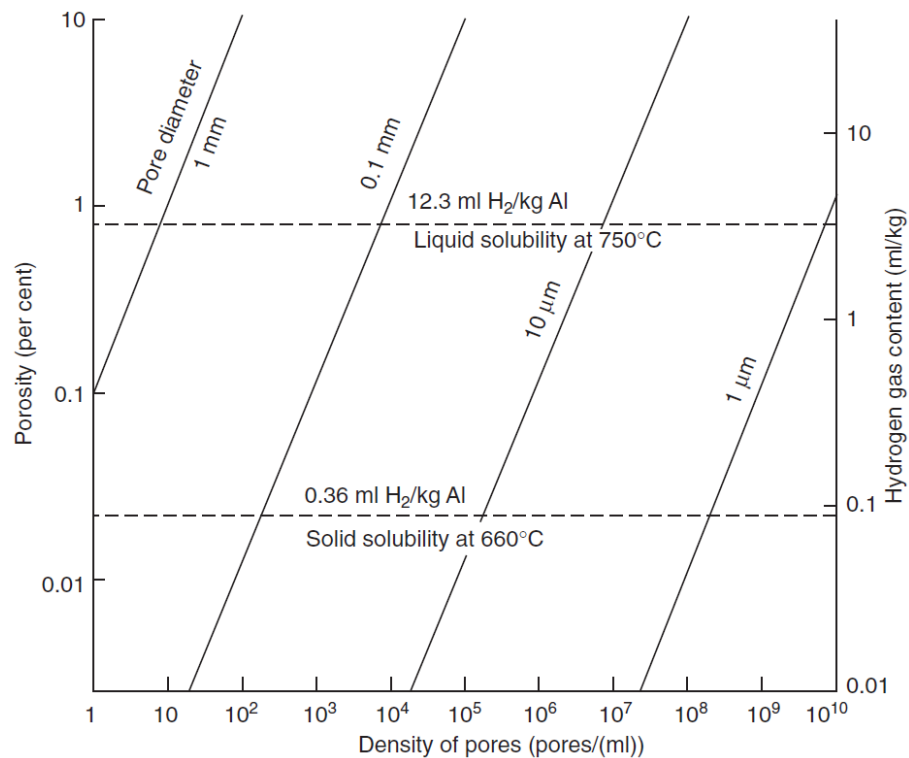
Dendriitin haarojen välissä kasvava huokonen kasvaa muodoltaan dendriitin haaroja mukailevaksi riippumatta siitä kasvaako huokonen kaasun diffundoitumisen vai hydrostaattisen venymän ansiosta. Huokonen kasvaa dendriitin haaroja vasten kunnes dendriitti pysäyttää kasvun. Niinpä dendriitin haaroja mukaileva muoto ei osoita kutistumisen ohjanneen huokosen kasvua vaan ainoastaan, että huokonen on kasvanut dendriittien muodostumisen jälkeen. Vastaavasti pyöreät tai muodoltaan paksut huokokset ovat syntyneet suhteellisen aikaisessa vaiheessa. Toki on yleistä, että kaasut erkautuvat kaasuhuokosiksi ennen kutistumisen aiheuttamien kutistumahuokosten muodostumista. Tästä johtuen sekä muodoltaan pyöreät että asymmetriset huokokset voivat molemmat olla kaasuhuokosia, jotka poikkeavat muodoltaan ainoastaan ydintymisen suotuisuuden saneleman verrattain aikaisen tai myöhäisen syntymisensä osalta. Erot kaasun tai kutistumahuokosten muodossa johtuvat ainoastaan huokosten kasvun ajoittumisesta suhteessa dendriittien kasvuun. [2.]

Jähmettymisajan kasvaessa kaksoiskalvojen avautuminen edistyy kaasuhuokosten kasvaessa kohti pallomaista tai lieriömäistä muotoa. Huokosen kasvaessa edelleen se voi avata oksidikalvon täysin kasvaen siitä ulos. Kaksoiskalvojen avautuminen kasvattaa virheiden kokoa heikentäen valun mekaanisia ominaisuuksia ja painetiiveyttä. [2.]

3.2.3 Vetyhuokoisuus

Jäähtymisen ja erityisesti seoksen jähmettymisen seurauksena kaasujen liukoisuus seokseen laskee. Tällöin kaasua erkautuu kupliksi, jotka kasvavat diffuusion ajamina. Kuplien kasvua rajoittaa erityisesti valun jäähtymisnopeus. Jäähtyminen laskee diffuusionopeutta ja luo rajat sille, kuinka kauan huokosiksi muodostuvat kuplat ehtivät kasvaa. Alumiinivalujen tapauksessa sulaan voi liueta ja siten sulasta voi erkaantua merkittävä määrä ainoastaan vetykaasua. [7, 10.]

Liuennut vety esiintyy sulassa atomimuodossa. Sulan jäähtyminen laskee vedyn liukoisuutta ja vety ydintyy kaasumuotoisena (H_2) viimeistään sulan jähmettymisen seurauksena. Syntyneet vetykaasukuplat kasvavat diffuusion avulla Ostwaldin kypsyisperiaatteen mukaisesti pintaenergiansa minimoimiseksi [10].



Kuva 7. Alumiinisulaan liunneen vedyn synnyttämän huokoisuuden tilavuusprosentti huokosten määrän ja koon suhteen. [2]

Kuva 7 ilmentää sulaan liunneen vedyn, valun huokoisuusosuuden ja huokosten koon välistä suhdetta. Katkoviivat ilmoittavat teoreettisen maksimin vedyn liukoisuudelle sulassa alumiinissa. 660 °C lämpötilaa voidaan pitää tavallisena sulan lämpötilana valutapahtuman aikana ja 750 °C lämpötilaa ylärajana, jota korkeammalle useimpien alumiiniseosten lämpötilan ei ole suotavaa nousta.

Vetyhuokoisuus esiintyy valuissa yleensä kauttaaltaan tasaisesti. Erkautumisen seurauksena muodostuvat kaasuhuokokset sijoittuvat kaasun diffuusion määrittelemälle etäisyydelle toisistaan. Huokosia pitää erillään myös jähmettyneet rakenteet (dendriitit ja ra-

keet) ja sulkeumat. Tästä johtuen vetyhuokoisuus itsessään heikentää harvoin valukappaleen tiiveyttä. Läpivuoto pelkästään toisiinsa yhteydessä olevien erkautuneiden kaasuhuokosten muodostaman kanavan kautta vaatisi erittäin korkean, yli 20 % osuuden huokosia tilavuudesta. [2.]

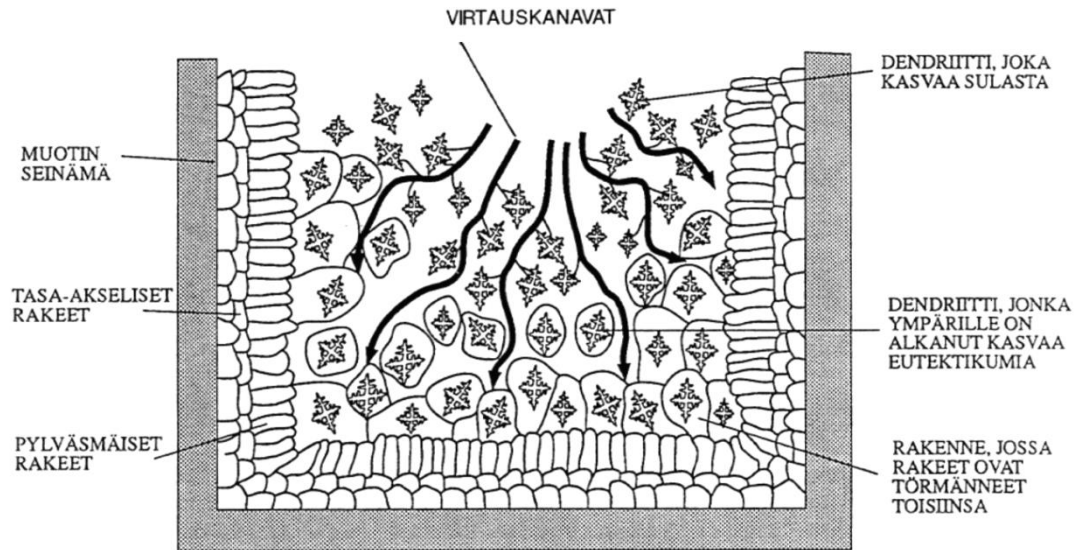
Painevalumenetelmälle ominainen valun nopea jähmettyminen ja jäähtyminen jättävät vetykaasun diffuusiolle muita valumenetelmiä lyhyemmän aikaikkunan. Näin ollen vetyhuokoisuus jakautuu tasaisemmin ja vetyhuokokset ovat kooltaan pienempiä kuin muissa valumenetelmissä. [2, 11.]

Kaksoiskalvot ja muut sulkeumat avustavat huokosten syntymistä. Sulkeumien ja kiinteiden partikkelien pinta tarjoaa ydintymiskohtia, joissa kasvavien kuplien on helpompi voittaa pintajännitys ja saavuttaa kriittinen säde. Kuplien ydintyminen sulaan on vaikeampaa, koska sulan paine ja pintajännitys vastustavat kuplien muodostumista. Kaasujen erkautuminen kaksoiskalvon väliin on erityisen helppoa, sillä kalvot ovat irti toisistaan ja kalvoja erottaa aina ohut kaasukerros. Kaksoiskalvon onkin ainoastaan avauduttava sulassa vallitsevaa painetta vastaan kaasujen erkautuessa sen väliin. [2.]

3.3 Kutistumahuokoisuus

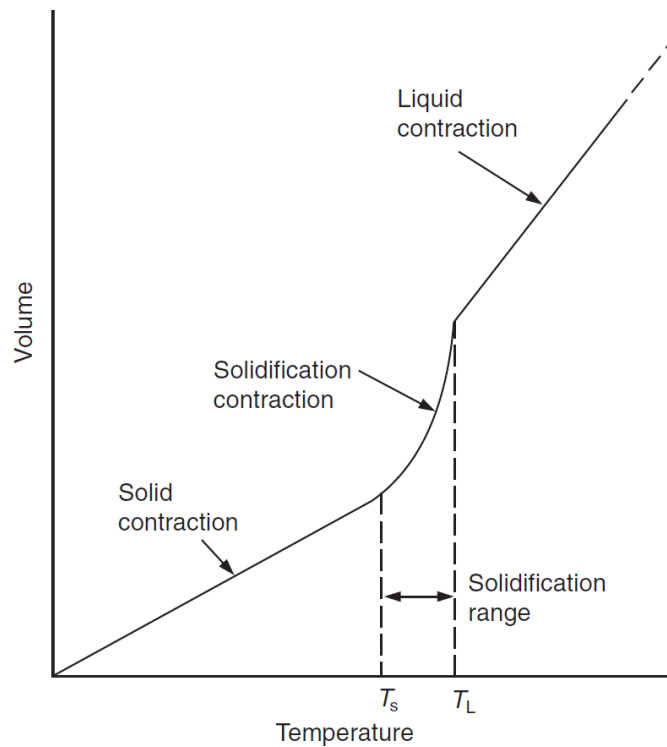
Kutistumisen ajamana syntyvät virheet ovat kooltaan ja muodoltaan vaihtelevia ja voidaan jakaa pintavirheisiin, kuten laajat pintakutistuman aiheuttamat virheet, pintaan aukeaviin virheisiin, kuten materiaalin sisäänpäin kasvavat kutistumaputket ja sisäisiin virheisiin, kuten kutistumahuokokset. Keskimäärin kaasuhuokosia suurempikokoiset ja muodoltaan monimuotoisemmat imuhuokokset eli kutistumahuokokset syntyvät seoksen jähmettymiskutistumisen vuoksi. Kutistumahuokoisuutta syntyy, kun tilavuuden muutosta korvaavaa sulaa ei pääse virtaamaan jähmettymisrintamalle. Valun geometria määrittää vahvasti kutistumahuokoisuuden sijoittumista valussa. Kutistumahuokoisuudelle alttiita ovat erityisesti suuren ainevahvuuden alueet ja alueet, joille kutistumaa korvaava materiaalivirta pääsee katkeamaan viereisen alueen aikaisemman jähmettymisen vuoksi. [2.]

Painevaluprosessin kolmas eli tiivistysvaihe ehkäisee tehokkaasti suurten kutistumavirheiden muodostumista. Valun jähmettyessä tiivistyspaine kuitenkin heikkenee paikallisesti alueilla, jotka jäävät muotin ja jähmettyneiden alueiden saartamiksi. Paine laskee näillä alueilla seoksen tilavuuden laskiessa jäähtymisen ja jähmettymisen seurauksena. Paineen lasku välittyy huokosten rajapintoihin laajentaen huokosia jähmettyvien rakenteiden rajoille. Kutistumahuokoisuus keskittyy painealuissa usein suurimman ainevahvuuden alueille tai alueille, jotka jähmettyvät viimeiseksi. Valun hitaampaan jäähtymiseen johtava muotin riittämätön jäähtytys voi kuitenkin johtaa kutistumahuokoisuuden esiintymiseen tavallista laajemmalla alueella. [2.]



Kuva 8. Periaatekuva alieutektisen Al–Si-seoksen jähmettymisestä kestopuotissa. [12]

Kuva 8 esittää alieutektisen (alle 12 paino-% piitä) valualumiiniseoksen jähmettymistä ja korvaussyöttöjen toimintaa. Ylieutektisen seoksen jähmettyminen poikkeaa alieutektisestä, koska eutektisestä sulasta jähmettymisenseurauksena erkautuva pii rajoittaa dendriittien kasvua ja estää siten sekä pylväsmäisten kolumnaaridendriittien että kappaleen keskelle muodostuvien dendriittien syntymisen. Erityisesti levymäiset piikiteet aiheuttavat myös raekoon hienontumista valun laajuisesti. Piikiteiden muoto määräytyy pitkälti jäähtymisnopeuden mukaan. Erityisesti suurilla jäähtymisnopeuksilla pii voi muodostaa dendriitti- tai suppilomaisia rakenteita. Seoksen piipitoisuus ja osin sen määrittämä mikrorakenne vaikuttavat osaltaan kutistumahuokosten kokoon ja muotoon. [2, 13.]



Kuva 9. Metallin kutistumisen kolme vaihetta. [2]

Kuva 9 esittää kutistumisen kolme vaihetta, jotka valusykliissä tapahtuvat seuraavassa järjestyksessä: sulan jäähtymisestä johtuva kutistuminen, jähmettymisestä aiheutuva kutistuminen, kiinteän metallin jäähtymisestä johtuva kutistuminen (lämpölaajeneminen). Näistä ainoastaan jähmettymisestä – metalliatomien järjestymisestä kiteiseen olomuotoon – aiheutuva kutistuminen on epälineaarista, pääosin, koska rakeiden kasvu hidastuu niiden kasvettua kiinni toisiinsa ja muuhun kiinteään aineeseen. Rakeiden kasvua hidastaa myös muun muassa sulan syöttövirtausten kapeneminen ja heikkeneminen.

Kutistuminen ei itsessään kykene luomaan sulansisäistä epäjatkuvuuskohtaa, koska metallisulat kestävät hajoamatta erittäin suuria, jopa 1...10 GPa suuruisia, negatiivisia paineita eli sulassa vallitsevia vetojännitystiloja [2]. Kutistumahuokosten syntyminen täysin kaasuttomassa sulassa onkin erittäin epätodennäköistä ja kutistumahuokoisuus on siten aina kytköksissä kaasuhuokoisuuteen tai muuhun huokosten ydintymisen mahdollistavaan sisäiseen virhetyyppiin. Esimerkki tällaisesta virheestä on kaksoiskalvo. Aiemmin esitellyn kaksoiskalvon muodostumis- ja sekoittumismekanismien vuoksi kaksoiskalvon välissä on lähes aina ilmaa tai muita kaasuja. Tämä mahdollistaa kaksoiskalvon avautumisen ja edelleen kutistumahuokosen kasvun. Kutistumisen aiheuttamasta paineenalenumasta seuraavat materiaalivirrat ja muodonmuutokset siis ainoastaan ohjaavat huokosten kasvunopeutta ja muotoa. Kutistumahuokosten muoto jäljentyykin pääasiassa rakeiden tai dendriittien rajoista, joskin kasvua ja muodon jäljentymistä hankaloittaa hapen läsnäolon seurauksena syntyvä ja huokosen ulkopintaa jäykistävä oksidikerros.

Huokosten muotoon ja kokoon vaikuttaa myös valuseoksen koostumus. Alieutektisten Al–Si-seosten jähmettyminen alkaa muottipinnalta ja jatkuu dendriittisen α -alumiinin jähmettyessä. Alieutektiset seokset tarjoavatkin mahdollisuuden dendriittien välejä muodoltaan mukaileville kutistumahuukosille. Ylieutektisen seoksen valuissa kutistumahuukokset muodostuvat eutektiseen mikrorakenteeseen sillä eutektinen reaktio estää α -alumiinidendriittien muodostumisen lähes kokonaan. Myös seoksen jähmettymisvälin eli puuroalueen laajuus vaikuttaa merkittävästi muodostuvaan huokoisuuteen. Suuren jähmettymisvälin omaaville seoksille on ominaista kutistumahuokoisuuden hajoaminen laajemmalle alueelle valun keskilinjasta, kun se esimerkiksi eutektisilla alumiini–piiseoksilla keskittyy vahvasti suuren ainevahvuuden alueille. [2.]

Seoksen todellinen koostumus ja mikrorakenne voivat poiketa tavoitetilasta. Merkittävät erot koostumuksessa tai esimerkiksi suuri osuus kiinteitä sulkeumia voivat ohjata huokoisuuden muodostumista tai muuttaa lämmön johtumista valussa. Kutistumahuokoisuuden sijoittuminen ja huokosten muoto määräytyvätkin monien tekijöiden yhteisvaikutuksesta, joka tekee sen hallitsemisesta haastavaa. [2.]

3.4 Huokoisuuden ehkäiseminen ja hallitseminen

Painevalumenetelmän osalta huokoisuuden muodostumista pyritään ehkäisemään valun geometrian ja koko valujärjestelmän oikeanlaisella suunnittelulla. Usein suunnitteluprosessia ohjaa aluksi kokemusperäinen päätöksenteko, mutta ohjelmistotyökalujen jatkuvasti kehittyessä niitä hyödynnetään yhä aikaisemmissa suunnitteluvaiheissa. Virtaus-, täyttymis- ja jähmettymisanalyysiohjelmistot yhdessä valujärjestelmän suunnitteluohjelmien kanssa ovat nopeuttaneet suunnitteluprosessia. Valujärjestelmän simulointi on merkittävä apu myös huokoisuuden ehkäisemisessä ja hallinnassa. [14.]

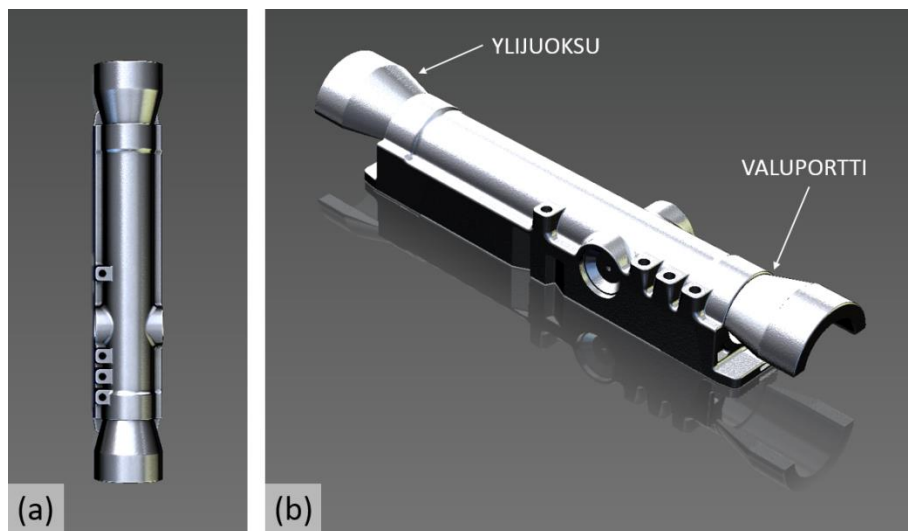
Laadukkaan raaka-aineen merkitys on selvä, mikäli valulta vaaditaan homogeenisia mekaanisia ominaisuuksia ja tiiveyttä. Huolellinen sulatus ja sulankäsittely sekä sulan puhdistustoimenpiteet säilyttävät sulan laadukkaana itse valuprosessia varten. Valuprosessin osalta erityisesti annostelun, täyttöjärjestelmän, valuportin ja kaasunpoistojen onnistunut suunnittelu on ensiarvoisen tärkeää. Valuparametrit, kuten valukammion täyttöaste ja männän nopeudet valuiskun eri vaiheissa vaikuttavat suoraan siihen, kuinka paljon ilmaa muottiin kulkeutuu sulan mukana, ja kuinka paljon kuplia sulaan syntyy. Tähän vaikuttavat lisäksi valukanaviston ja valukappaleen geometria, joka määrää pitkälti sulavirtausten nopeudet, suunnat ja luonteen. Sopiva geometria mahdollistaa muottipesän täyttymisen tasaisesti ja oikeassa järjestyksessä, jolloin ei toivotut turbulenssiset virtaukset ja kaasun sekoittuminen sulaan minimoituvat. [2.]

Valuportin ja muun muotin kulumisen muuttaa sulan virtausta. Erityisesti ylieutektiset alumiini–piiseokset kuluttavat valukanavistoa ja valuporttia. Tämä johtuu pääasiassa sulassa olevista kiinteistä primaariipiipartikkeleista ja niiden ja sulan aiheuttamasta eroosiokorroosiosta. Epätasainen valuportin kulumisen heikentää sulasuihkun ja virta-

uksen laminaarisuutta eli lisää turbulenssia ja voi aiheuttaa sulasuihkun hajoamisen pisarasuihkuksi, jolloin sulaan sekoittuu huomattavasti suurempi määrä muotin sisältämää ilmaa. Valuportin tasainen kuluminen ei yleensä aiheuta sulasuihkun hajoamista, mutta haittaa silti sulavirtauksen suuntausta ja siten muotin oikeanlaista täyttymistä. Alumiiniseossulat sisältävät poikkeuksetta jonkin verran kiinteitä sulkeumia ja valuportin kulumista onkin syytä seurata säännöllisesti etenkin ylieutektisia seoksia valettaessa. [2.]

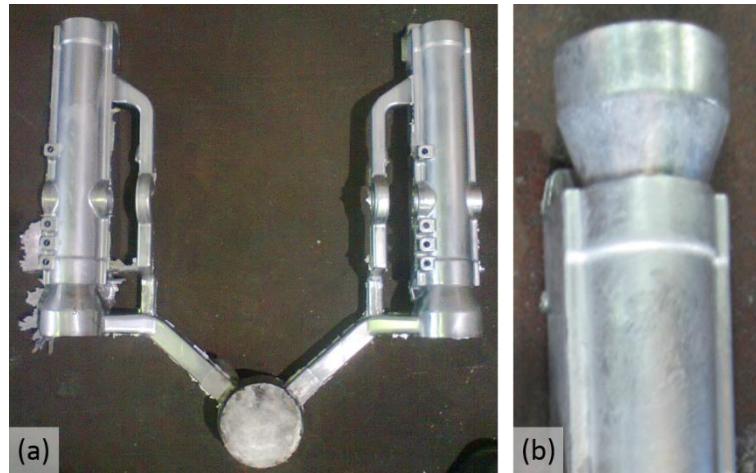
4. NÄYTEKAPPALEIDEN MURTOPINTA- JA METALLOGRAFINEN TARKASTELU

Opinnäytetyön tavoitteena oli tunnistaa ovensuljinrunkojen vuotomekanismi ja vuotojen juurisyy. Vuotomekanismin selvittämiseksi vuotavista ovensuljinrungoista valmistettiin murtopintanäytteitä murtopintatarkastelua varten ja hienäytteitä metallografista tarkastelua varten. Murtopintanäytteet kuvattiin valuasennossa. Hienäytteet leikattiin ja kuvattiin pääasiassa valuasentoon nähden vaakasuunnassa olevalla leikkaustasolla. Tällöin sulassa nousseiden kuplien reittien poikkileikkaukset osuvat tarkastelutasolle.



Kuva 10. Valurunko valuasennossa (a) ja valurungon päätyvaluportti sekä ylijooksu (b).

Valurungon valuasento sekä ylijooksun ja päätyvaluportin paikat on esitetty kuvassa 10. Valurunko valetaan pystyasennossa siten, että liikkuva muottipuolisko sijoittuisi kuvassa 10 (a) rungon taakse ja kiinteä muottipuolisko vastaavasti rungon etupuolelle. Valuportti on sijoitettu rungon alapäätypinnalle keernan ympärille ja ylijooksu vastaavasti rungon yläpäätypinnalle toisen keernan ympärille. Nämä päätypinnoilta alkavat keernat yltyvät pituussuunnassa aina rungon keskelle asti antaen rungolle putkimaisen perusmuodon. Rungon geometriaa monimutkaistavat rungon sivuilta alkavat helmat, jotka muodostavat rungon pohjapinnan sekä yhteensä viidestä suunnasta työntyvien keernojen ja keernatapinien tuottamat muodot.



Kuva 11. Kaksipesäisen muotin valut, joista ylijuksut on irrotettu ja valukkeet (a) sekä ylijuksu (b).

Kuvassa 11 on esitelty kaksipesäisen muotin valut valukkeineen, jotka ilmentävät hyvin valujärjestelmän muotoa. Kuvan 11 (a) valuista on leikattu ylijuksut, joiden muoto voidaan nähdä kuvassa 11 (b). Muotin molempiin muottipesiin on lisätty sivusyöttö erityisesti huokoisuuden vähentämiseksi. Kuvassa vasemmalla voidaan nähdä lisäksi muottipesästä levinneitä jakopintapurseita.



Kuva 12. Rungon valuaihio, josta on poistettu valukkeet ja purseet.

Kuvassa 12 on koneistamaton ovensulkimen valurunko, josta valukkeet on leikattu ja purseet poistettu rummuttamalla. Kuvassa rungon viereen asetettu senttimetriivain ilmentää rungon mittasuhteita.

4.1 Valurungon materiaali

Valurunko valetaan kylmäkammiopainevalumenetelmällä AlSi14Cu4-seoksesta. Kyseinen seos ei ole standardiseos, mutta sitä käytetään jokseenkin yleisesti muun muassa autoteollisuuden komponenteissa. Seosta käytetään erityisesti komponenteissa, joilta vaaditaan hyvän valettavuuden ja koneistettavuuden lisäksi vähintään kohtuullista kulumisen kestoa.

Ovensuljinrungon osalta materiaalinvalintaperusteita ovat muun muassa kulumisen kesto, alhainen tiheys, koneistettavuus, lujuus ja korroosion kesto. Materiaalilta vaaditaan hyvää koneistettavuutta, jotta se soveltuisi massatuotantoon, ja jotta rungon lieriöpintaan voidaan tuottaa koneistamalla riittävä pinnanlaatu. Alumiiniseosten alhainen tiheys helpottaa ovensulkimen asentamista ja keskimäärin hyvät korroosio-ominaisuudet mahdollistavat sulkimen pitkäaikaisen toiminnan vaihtelevissa olosuhteissa. Ovensulkimen sisällä liikkuvat teräsmännät aiheuttavat rungon lieriöpinnan merkittävää abrasiiivista kulumista ovensulkimelta vaadittavan korkean toimintasyklimäärän vuoksi. Rungon sisäisten paineenvaihteluiden ja suuren jousivoiman vuoksi materiaalilta vaaditaan kulumisen keston lisäksi riittävä lujuutta.

Taulukko 1. Käytetyn seoksen kemiallinen koostumus.

	Si	Cu	Fe	Zn	Mg	Mn	Ni	Sn	Pb	Ti	Cr	P
min. (paino-%)	13,5	4,0										
maks. (paino-%)	15,5	5,0	1,3	1,1	0,5	0,5	0,5	0,3	0,1	0,1	0,05	0,015

Käytettävän AlSi14Cu4-seoksen kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 1. Ylieutektinen piiseostus parantaa entisestään muun muassa sulan juoksevuutta ja primaaristen piikiteiden suuremman määrän vuoksi valujen kulumisen kestoa. Materiaali on hyvä kompromissi valettavuuden, korroosion ja kulumisen keston sekä mekaanisten ominaisuuksien osalta.

Ylieutektisen piiseostuksen vuoksi AlSi14Cu4-seoksen jähmettymisväli on arviolta 575...605 °C. Kapean jähmettymisvälin Al–Si-seokset muodostavat kestopuottivalumenetelmiä käytettäessä tiiviin mikrorakenteen valun pintaan huokoisuuden keskittyessä suuren ainevahvuuden alueelle. Ylieutektinen seostus kasvattaa jähmettymisväliä ja lisää siten pinnan läheisyyteen yltävien virheiden riskiä. Kestomuottivalukappaleet ovat kuitenkin yleensä valutilaisina painetiiviitä ja useimmiten vailla pintaan avautuvaa huokoisuutta. Koneistus voi kuitenkin avata painetiiveyttä heikentäviä sisäisiä virheitä, kuten oksidikalvosulkeumia, kuplakanavia ja kaasuhuokoisuutta kappaleiden pintaan. [2.]

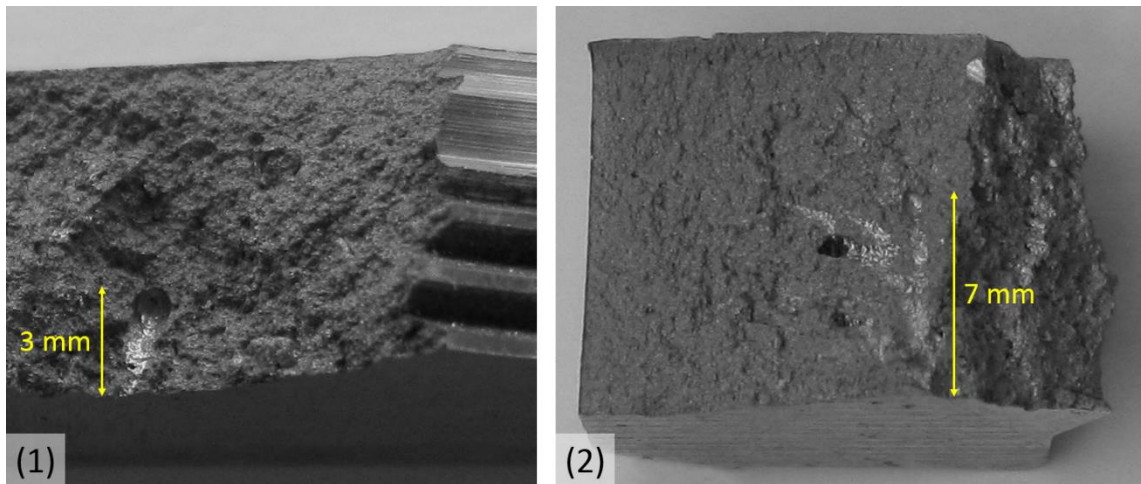
4.2 Murtopintatarkastelu

Murtopintatarkastelun tavoitteena oli löytää ja tunnistaa vuotoa aiheuttaneita valurunkojen virheitä eli vuotokanavia. Tämä oli tarkoitus saavuttaa sahaamalla vuotaneiden ovensuljinrunkojen vuotoalueilta näytepaloja, murtamalla niitä auki ja tarkastelemalla vuotoalueen murtopintoja optisella stereomikroskoopilla. Lähtöoletuksena oli, että ainakin osa virheistä toimisi murrettaessa murtuman ydintymiskohtina ja murtuma etenisi vuotokanavaa pitkin. Tämä mahdollistaisi vuotokanavien osumisen murtopinnalle ja siten vuotokanavien ja -mekanismien tarkastelun.

Huokosten lisäksi murtopinnalta voisi olla tunnistettavissa mikrorakenteellisia virheitä, kuten oksidikalvoja. Ohuet, nopeasti muodostuneet oksidikalvot olisivat tunnistettavissa rypistyneestä tai laskostuneesta pinnastaan. Paksut ja jäykät pitkään muodostuneet oksidikalvot olisivat tunnistettavissa rosoisesta pinnastaan. [2.]

4.2.1 Näytteiden valmistus

Tarkastelua varten valituista rungoista sahattiin ylijouksupäätyypinnalta 5...10 mm paksuja viipaleita valuasentoon nähden vaakasuoraan. Näyteviipaleet asetettiin yksi kerrallaan ruuvipenkkiin siten, että todettu vuotokanava jäi juuri ruuvipenkin leukojen yläpuolelle. Paksuimpia näyteviipaleita heikennettiin sahaamalla lovia vuotokanavan läheisyyteen. Näyteviipaleet murrettiin auki viipaleen yläosaan iskemällä. Vuotokanavan kohdalta murtuneet tai muuten murtopinnaltaan mielenkiintoiset näytteet valittiin stereomikroskooppitarkastelua varten.

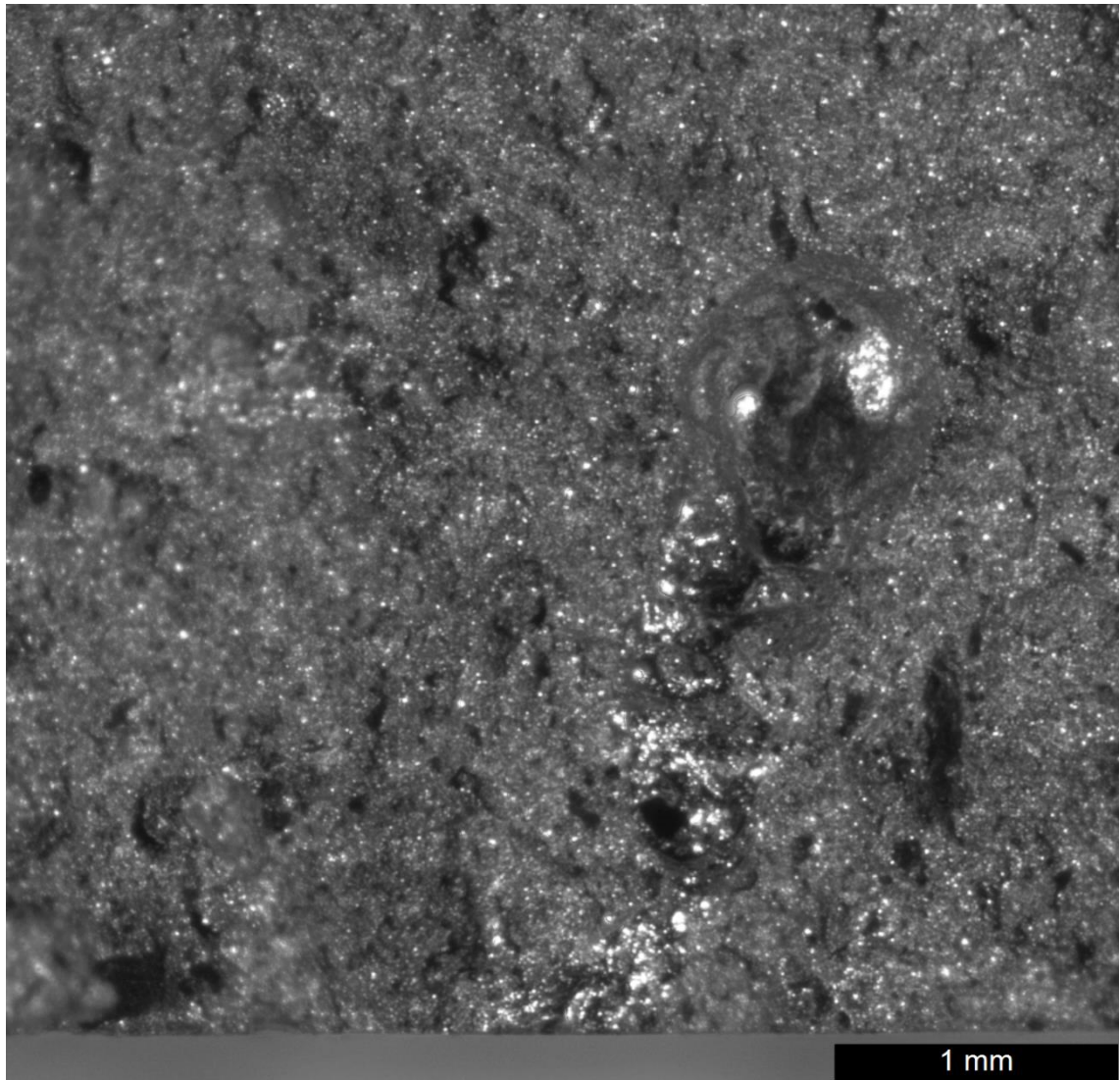


Kuva 13. Murtopintanäytteet (1) ja (2).

Kuvassa 13 voidaan nähdä murtopintanäytteistä 1 ja 2 löytyneet virheet. Kuvat on otettu siten, että murtopinnat ovat valuasentoon nähden pystysuunnassa. Virheissä voidaan nähdä pitkänomainen kanavamainen huokonen, jonka yläpäässä on pyöreä laajenema. Virheiden voidaan tulkita olevan kuplakanavia.

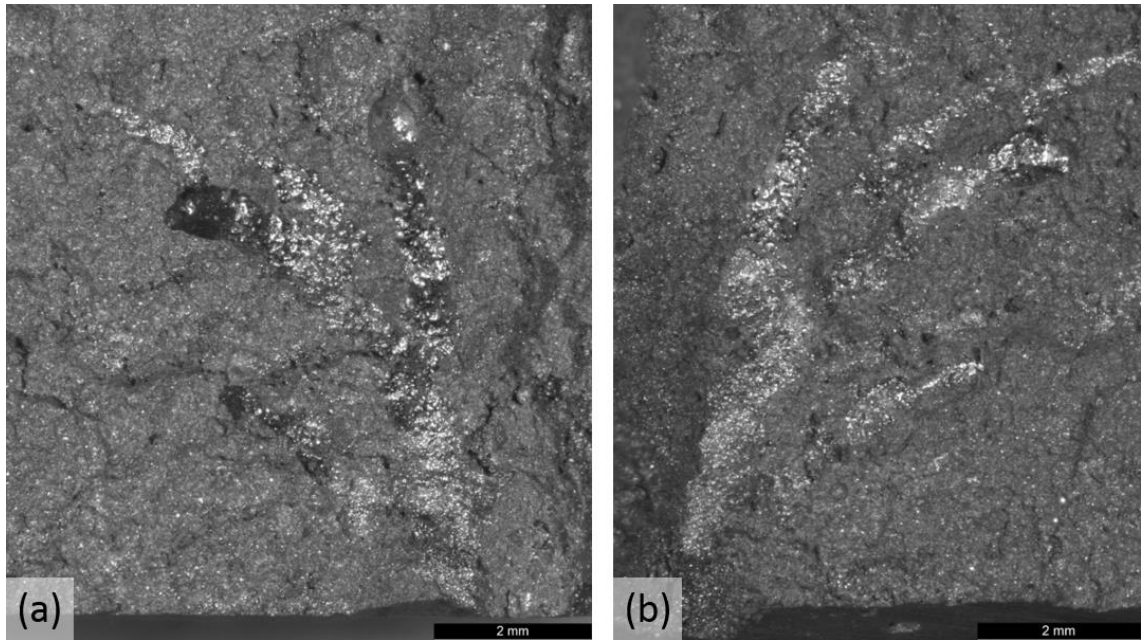
4.2.2 Stereomikroskooppitarkastelu

Kuvat otettiin monitarkennusmenetelmää (multifocus-toimintoa) hyödyntäen. Menetelmä perustuu usean eri tarkennusetäisyydeltä otetun kuvan yhdistämiseen ohjelmiston avulla yhdeksi suuren syvyysterävyyden kuvaksi.



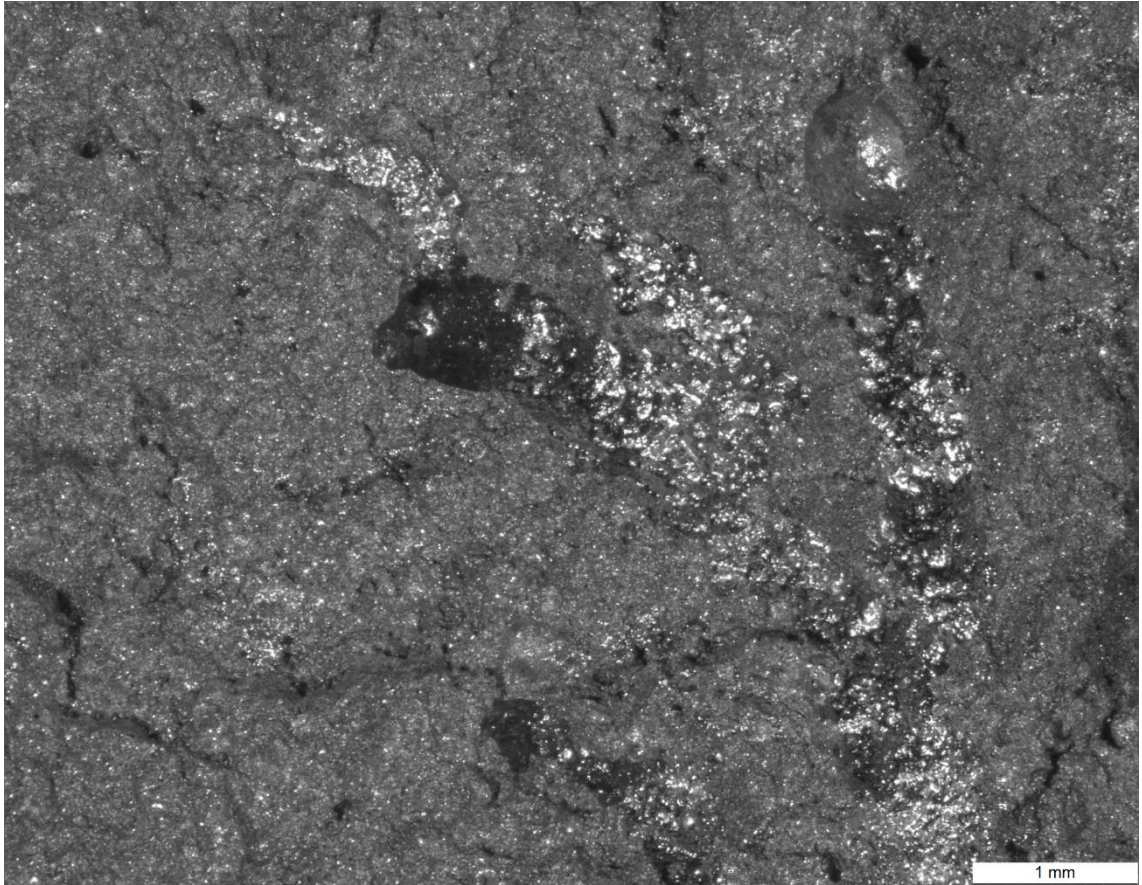
Kuva 14. Kupla ja sen avautunut kuplakanava murtopintänäytteessä 1.

Kuva 14 on suurennos murtopintänäytteen 1 kuplakanavasta (kuva 13). Kuva on otettu valuasennossa. Kuplan huipun ja koneistetun ylijuoksupäätyypinnan välinen etäisyys on noin 5 mm. Kuplakanavan sisäpinta on kiiltävä ja suhteellisen sileä, joka viittaa oksidikalvon nopeaan muodostumiseen ja lyhyeen kasvu-aikaan. Tummat alueet keskellä kanavaa ja kuplan yläpinnalla voivat olla kuplakanavan haaroja tai kuplakanavasta edenneitä kutistumahuokosia.



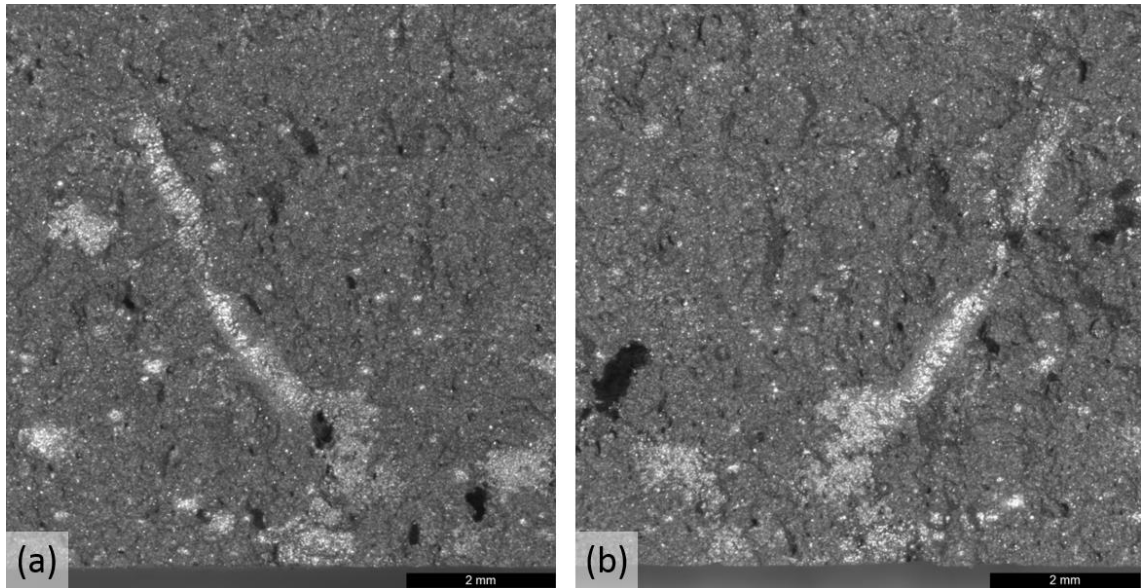
Kuva 15. Haarautunut kuplakanava murtopinnoilla (a) ja (b).

Kuvassa 15 on murtopinnan vastinpuoliskot murtopintanäytteestä 2. Murtopinnalla voidaan nähdä haarautunut kuplakanava ja kaksi kuplahuokosta. Sulassa noussut kupla on voinut jakautua esimerkiksi kohdatessaan jähmettynyttä materiaalia tai sulkeumia. Murtopinnoilla voidaan nähdä myös pienempiä epäjatkuvuuskohtia, jotka voivat olla esimerkiksi kaasu- tai kutistumahuokosia. Kuvat on otettu valuasennossa ja kuplahuokokset ovat noin yhden senttimetrin syvyydessä valun koneistetusta yläpäätyypinnasta.



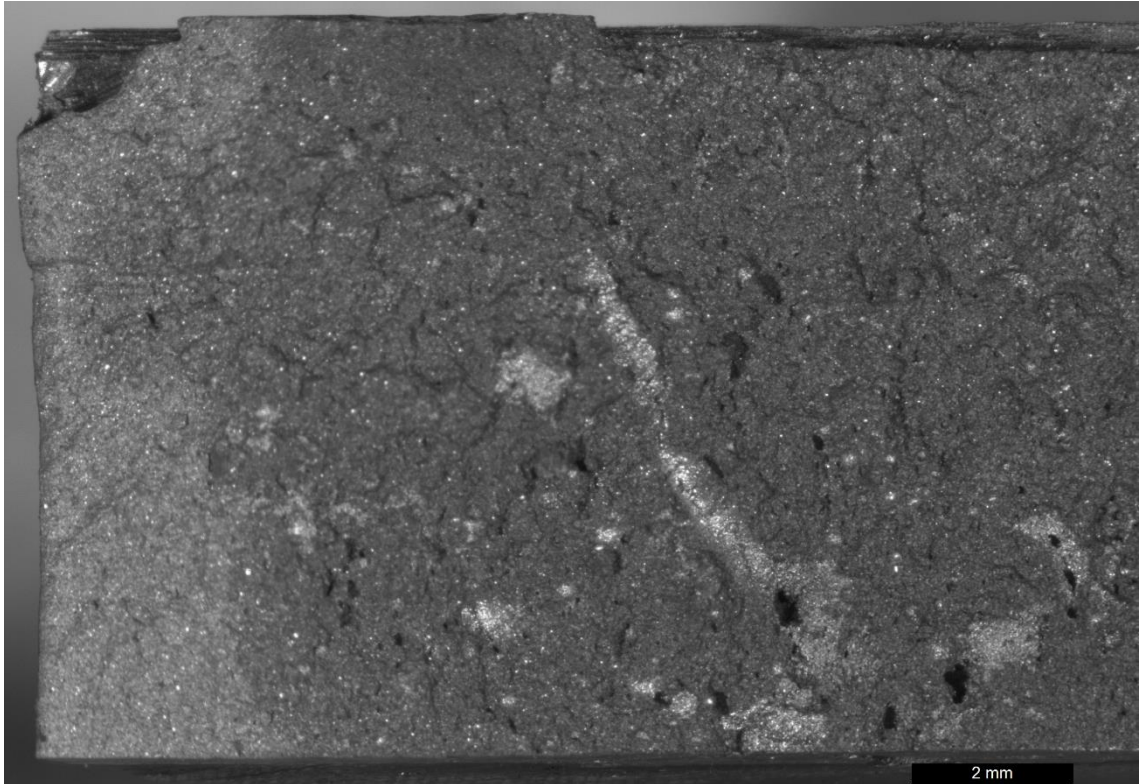
Kuva 16. *Suurennos haarautuneesta kuplakanavasta.*

Kuva 16 on suurennos kuvan 15 (a) alueelta murtopintänäytteestä 2. Kuvassa vasemman puoleisen kuplan huipulta lähtee pienempi kanava, joka sekin vaikuttaa kuplakanavalta, mutta voi olla syntynyt myös jähmettymiskutistuman seurauksena. Kuplakanavat ovat pinnaltaan sileitä ja peilaavia. Vasemman puoleinen kuplahuokonen näkyy tummana syvyytensä ja muotonsa vuoksi. Kuva on otettu valuasennossa, jolloin kuplat ovat nousseet jähmettyvässä valussa ylöspäin. Nousevien kuplien vaakasuuntaista kulkua voivat aiheuttaa muun muassa virtaukset, jähmettyneet rakenteet ja kiinteät sulkeumat [2].



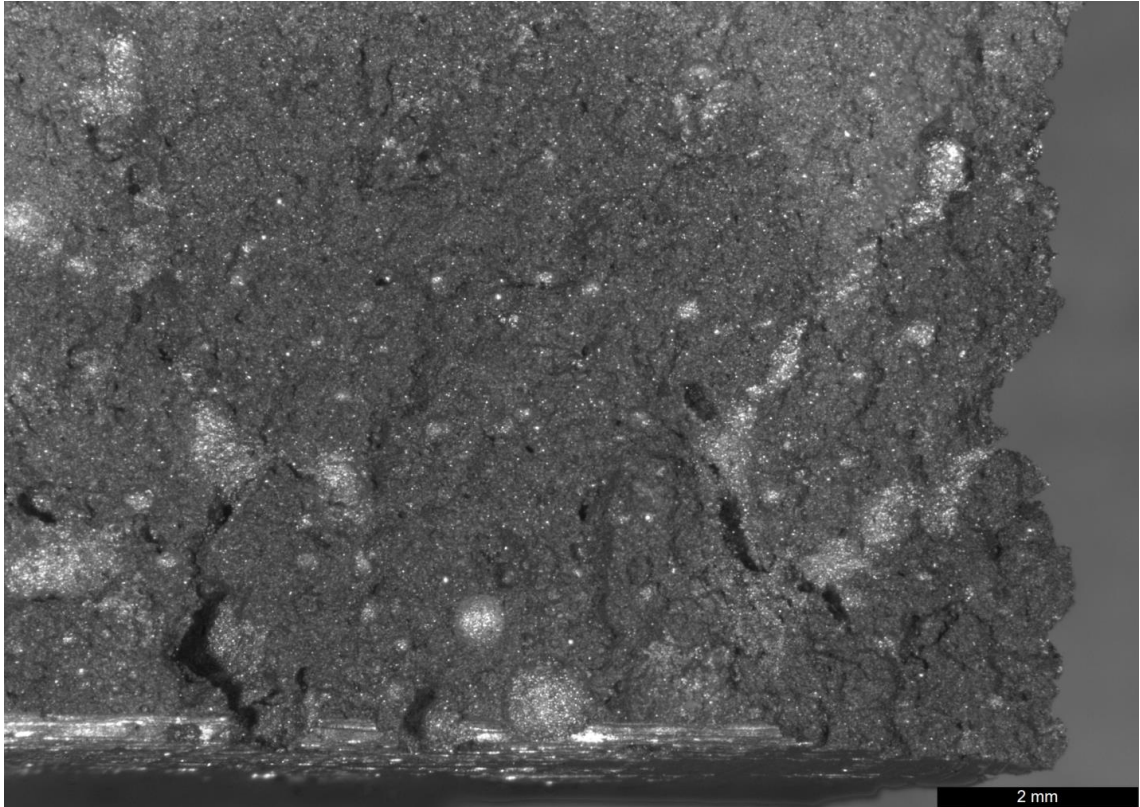
Kuva 17. Kuplakanava murtopinnoilla (a) ja (b).

Kuvassa 17 on murtopinnan vastinpuoliskot murtopintänäytteestä 3. Murtopinta kulkee suurin piirtein kuplakanavan keskilinjaa pitkin. Kuplakanavan voitiin tunnistaa aiheuttaneen läpivuodon kyseisessä ovensulkimessa. Kuvassa voidaan nähdä lisäksi suuria pinnaltaan epätasaisia huokosia sekä kiiltäväpintaisia alueita, jotka voivat olla kaksoiskalvojen sisäpintaa tai kuplahuokosia.



Kuva 18. Öljyn kostuttamaa aluetta vuodon aiheuttaneen kuplakanavan läheisyydessä.

Kuvassa 18 näkyvä yläpinta on valurungon koneistettu yläpäätypinta. Öljy on kostuttanut materiaalia laajalti kuplakanavan ympäriltä. Kuplakanavan ympärille muodostunut huokoinen ja öljyn kostuttama vyöhyke jatkuu koneistetulle ylijouksupäätypinnalle saakka. Vyöhykkeellä voidaan nähdä runsaasti kanavistomaista huokoisuutta, joka voi olla kuplakanavasta tai kaasuhuokosista haarautunutta kutistumahuokoisuutta. Öljyn kostuttama alue oli havaittavissa murtopintanäytteistä heti murtamisen jälkeen. Öljy on siis voinut kostuttaa alueen joko kappaleen ollessa vielä ehjä tai murtumisen yhteydessä.



Kuva 19. Kuplakanava ja öljyn kostuttamaa rakennetta.

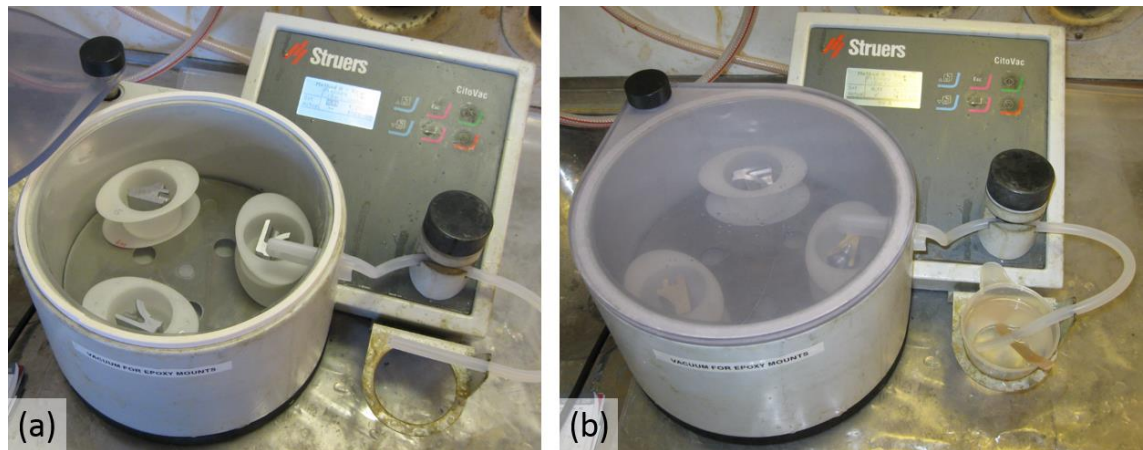
Kuvassa 19 voidaan nähdä kaas- ja kutistumahuokoisuutta öljyn kostuttamalla alueella. Kuvassa oikealla voidaan nähdä joitain millimetrejä pitkä kuplakanava, jonka huippu on noin 3 mm etäisyydellä koneistetusta ylijuoksupäätyypinnasta. Kuvassa alhaalla voidaan nähdä muodoltaan pyöreitä suuria kaasuhoikosia.

4.3 Metallografinen poikkipintatarkastelu

Poikkipintatarkastelun tavoitteena oli selvittää vuotokanavien poikkileikkausten muotoa, vuotokanavien rakennetta ja näytteen muuta mikrorakennetta. Tarkastelussa pyrittiin tunnistamaan myös mahdollisia sisäisiä virheitä, kuten huokosia, oksidisulkeumia ja muista kiinteätilaisista virheitä. Näytteet valittiin ja leikattiin siten, että poikkipinta kattaisi mahdollisimman laajan alueen näytepaleen sisäpinnalta ulkopinnalle saakka.

4.3.1 Näytteiden valmistus

Näytepalat sahattiin kahdesta ovensuljinrungosta (A ja B), joiden ulkopinnalla oli havaittu öljyn läpivuotoa. Rungosta A sahattiin kaksi näytettä: ylijuoksupäätyypinnan oikea ja vasen puoli. Rungosta B sahattiin näytteeksi ylijuoksupäätyypinnan oikea puoli. Sahaukset suoritettiin Struers Discutom 10 -laikkaleikkurilla.



Kuva 20. Poikkipintänäytteiden valu epoksiin.

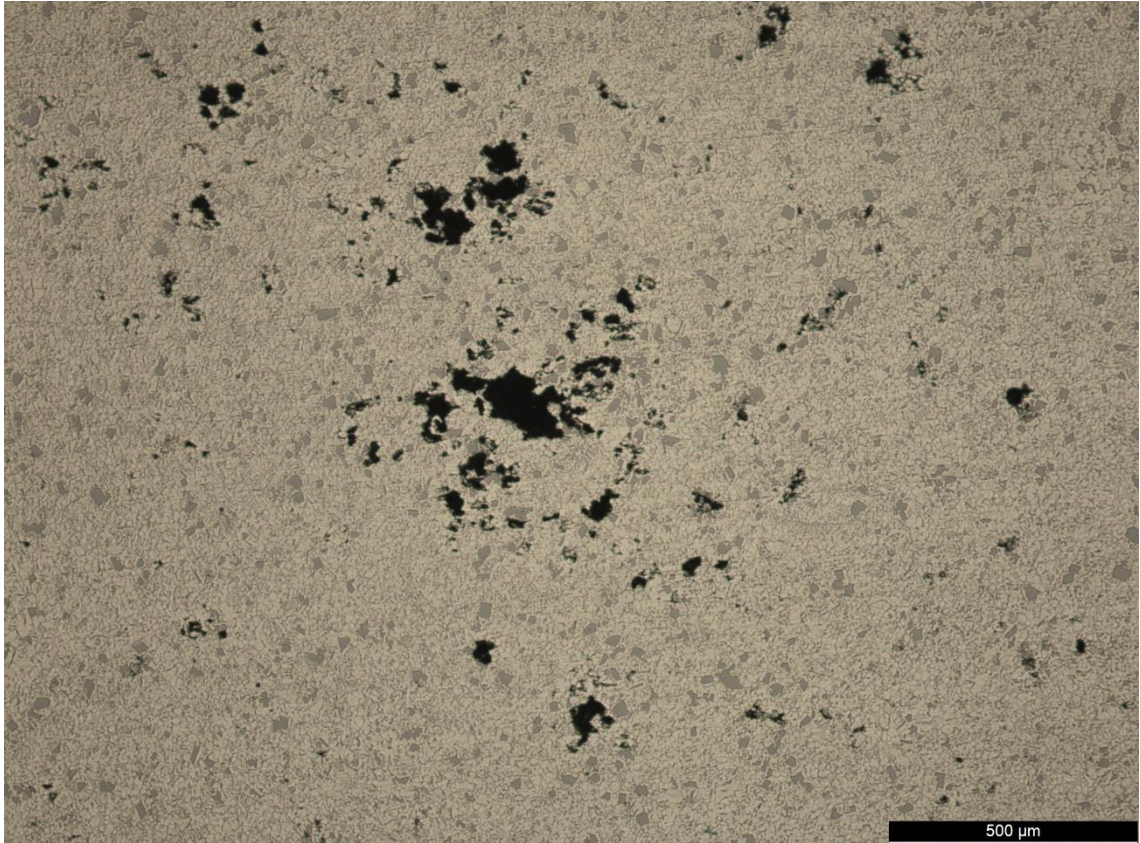
Sahatut näytepalat valettiin epoksiin Struers CitoVac -tyhjövalulaitteella kuvan 20 osoittamalla menetelmällä. Näytteet hiottiin Struers LaboPol -hionta- ja kiillotuslaitteilla. Hionnassa käytettiin hiomapaperikiekkoja P-karkeusluokituksiltaan järjestyksessä karkeimmasta hienoimpaan 240, 320, 600, 800, 1200, 2500 ja 4000. Näytteet kiillotettiin 3 μm ja 1 μm timanttisuspensioilla sekä 0,05 μm kolloidisella piisuspensioilla käyttäen lisäksi voiteluainetta tarpeen vaatiessa.

Näytteiden ensimmäisen tarkastelun ja kuvauksen jälkeen näytepintoja syövytettiin Kellerin reagenssilla 10 sekunnin ajan. Näytteet huuhdottiin vedellä ja etanolilla sekä kuivattiin ennen seuraavaa tarkastelua ja kuvausta.

4.3.2 Tarkastelu optisella mikroskoopilla

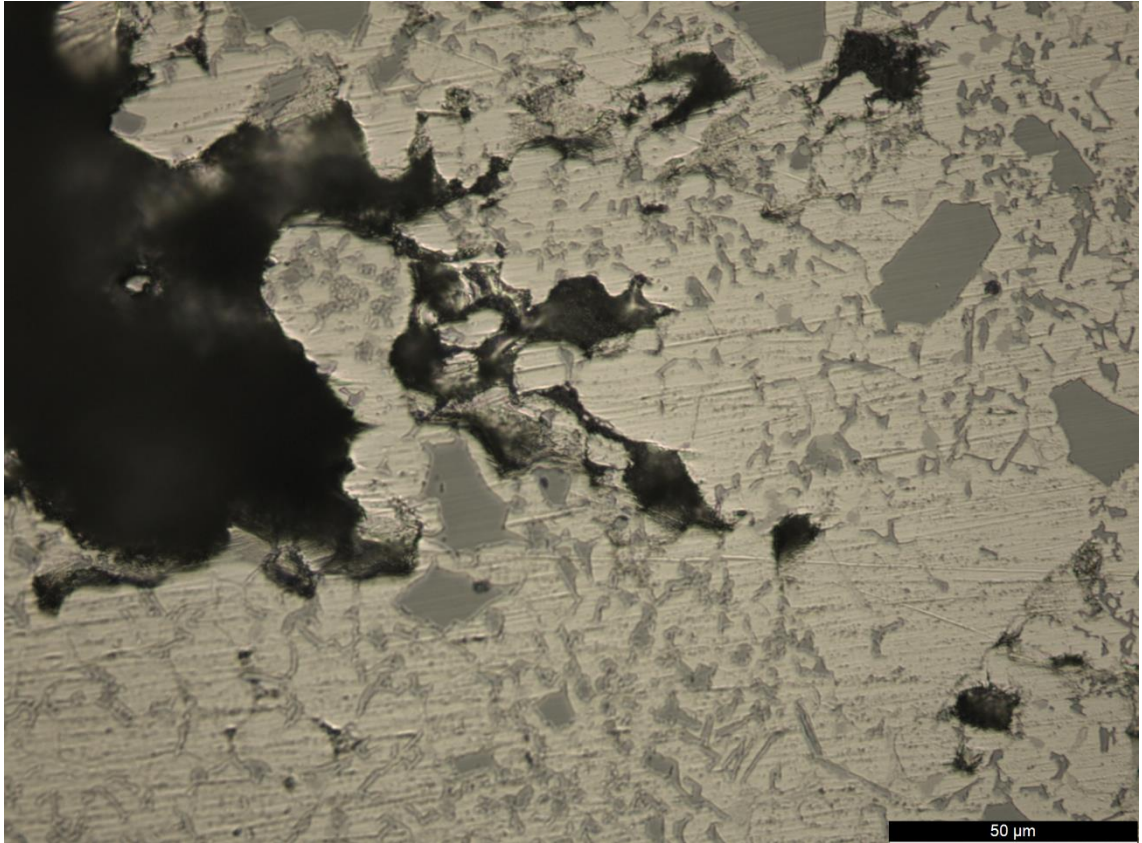
Näytteet valmistettiin siten, että tarkastelupinnat ovat valuasentoon nähden vaakasuuntaisia ja noin kahden millimetrin etäisyydellä ylijouksupäätyypinnasta. Näin ollen tarkasteluun on valuasentoon nähden ylhäältä päin. Näytteitä tarkasteltiin ja kuvattiin usealla suurennuksella optisella mikroskoopilla.

Tarkastelun tavoitteena oli vertailla näytteiden mikrorakennetta vuotoalueen läheisyydessä ja muualla. Tavoitteena oli myös tunnistaa näytteissä esiintyviä virheitä, kuten oksidisulkeumia ja huokosia, erityisesti mahdollisten vuotokanavien poikkileikkauksia.



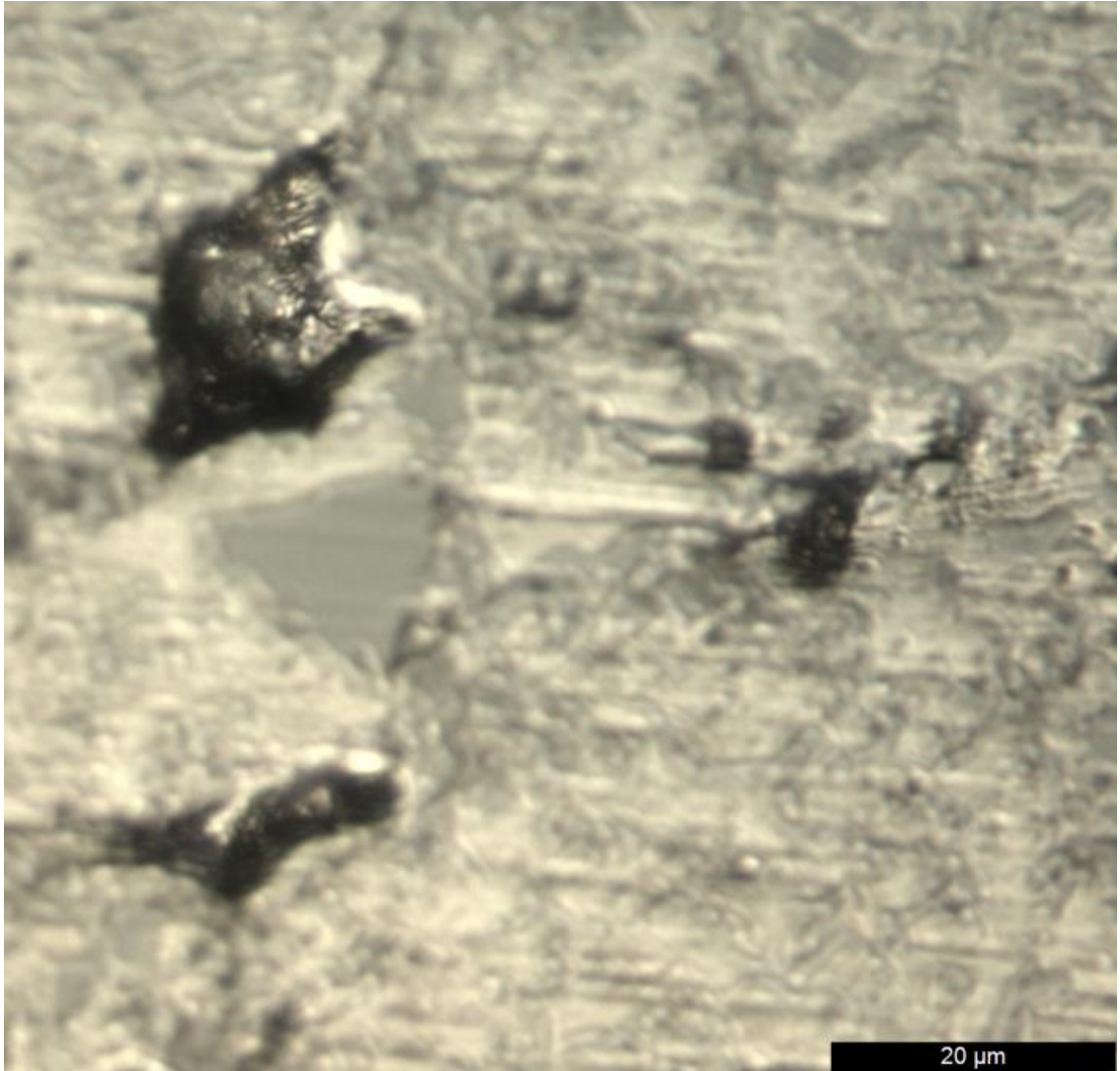
Kuva 21. Perusrakennetta ja huokosia kiillotetulla etsaamattomalla näytepinnalla.

Kuva 21 ilmentää hienäytteissä esiintyvää keskimääräistä mikrorakennetta sekä näytteessä paikoittain esiintyviä huokoisuusmuodostelmia. Näytepinta on noin kahden millimetrin syvyydessä valutilaisesta ylijuoksupäätypinnasta. Kuva on otettu ennen etsausta ja siinä voidaan nähdä jokseenkin tasaisesti jakautuneita harmaana erottuvia primaari-
piikiteitä.



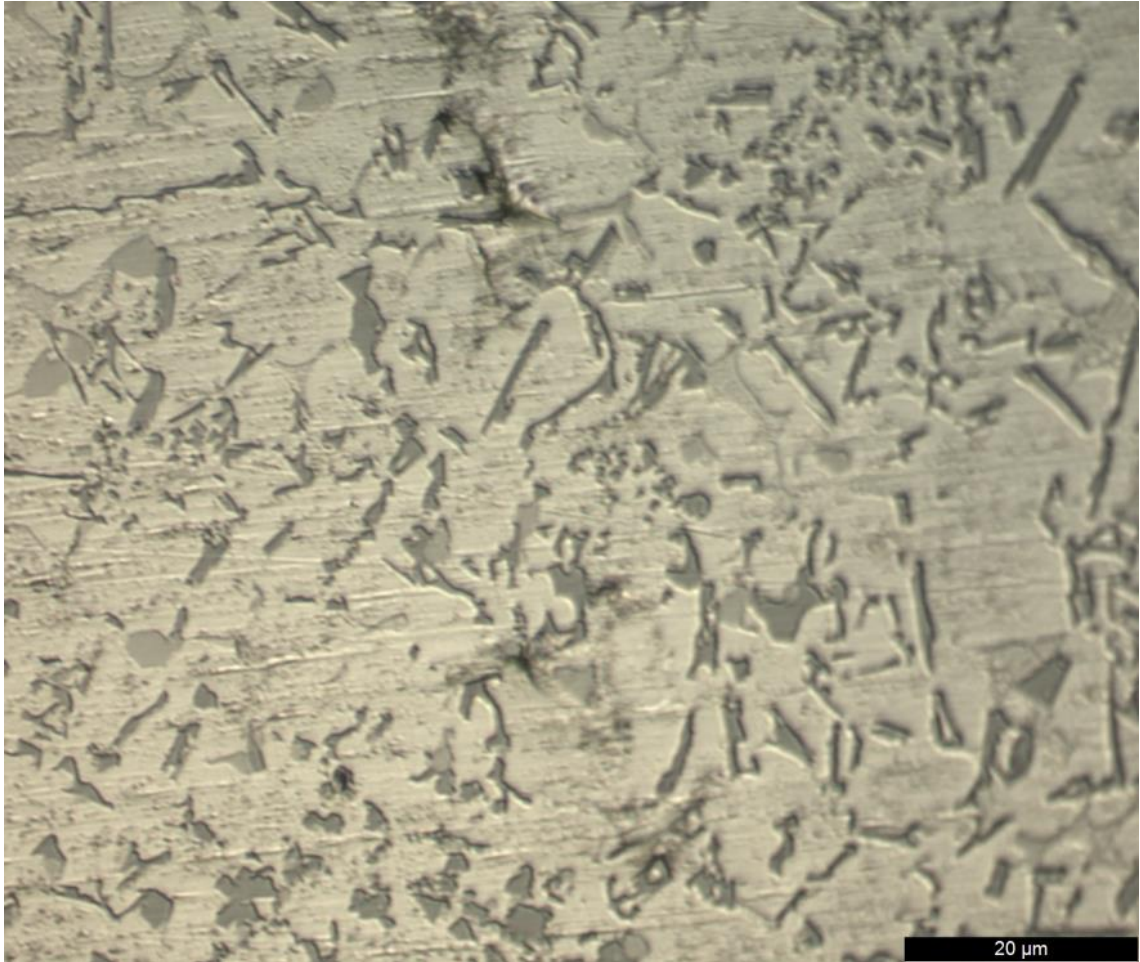
Kuva 22. *Suurennos kuvassa 21 esiintyvistä huokosista.*

Kuva 22 on suurennos kuvan 21 keskialueelta. Kuvassa näkyvä huokosmuodostelma on voinut syntyä kutistumahuokoisuuden edetessä mahdollisesta kuplakanavasta tai muusta kaasuhuokosesta. Kuvan keskialueen matalan huokosmuodostelman pohja on kiiltävä ja muodoltaan monimutkainen. Joidenkin kuvassa esiintyvien huokosten reunoista jatkuu säteittäissuuntaisia halkeamia, jotka voivat olla syntyneet oksidikalvon laskostuessa huokosen menettäessä tilavuuttaan paineen vaikutuksesta. Kuvassa voidaan nähdä myös primaarihiikiteitä ja eutektista mikrorakennetta.



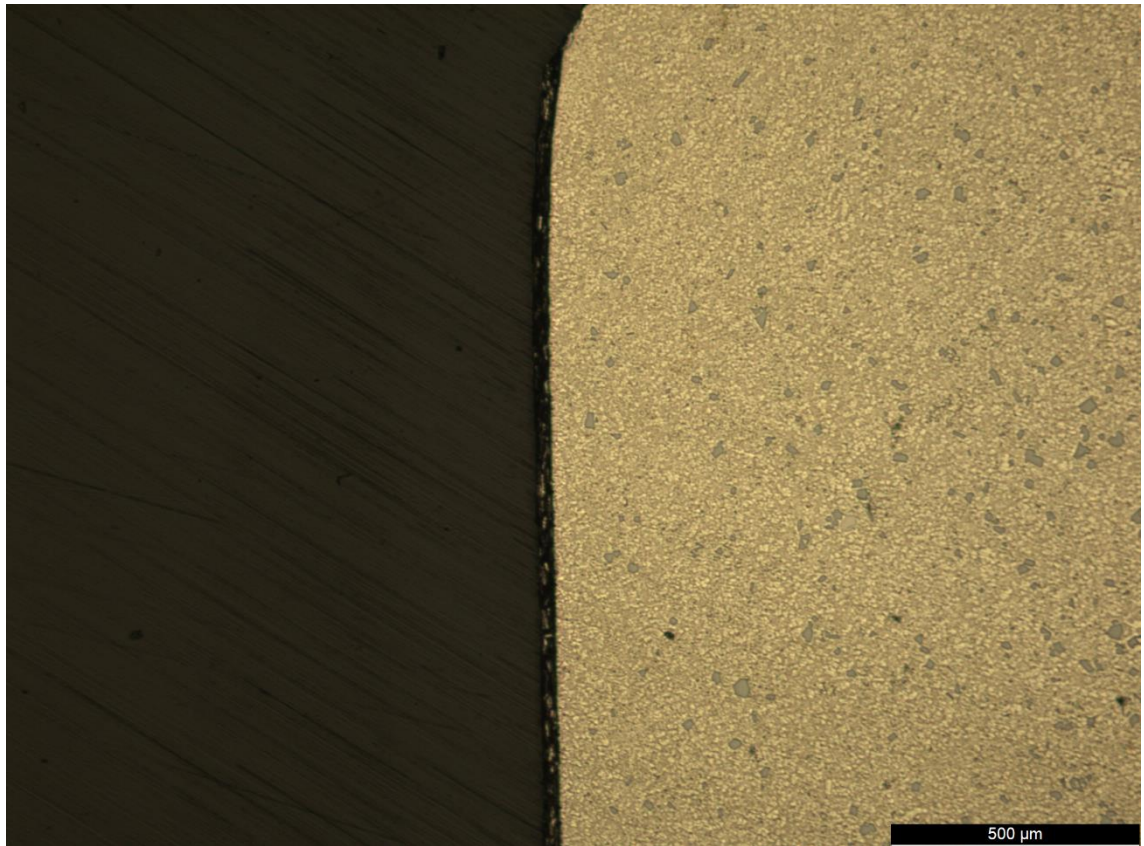
Kuva 23. Mahdollisen kuplakanavan seinämäpintaa.

Kuvassa 23 on huokonen, jonka pinta on kiiltävä ja uurteinen syvyysuunnassa. Uurteisuus viittaa kaasuhoikosen pintaan muodostuneen oksidikalvon laskostumiseen huokosen poikkileikkauksen luhistuessa kasaan. Huokonen voi olla osittain luhistunut kuplakanava. Kuvataso on noin 2 mm etäisyydellä valutilaisesta ylijuoksupäätypinnasta.



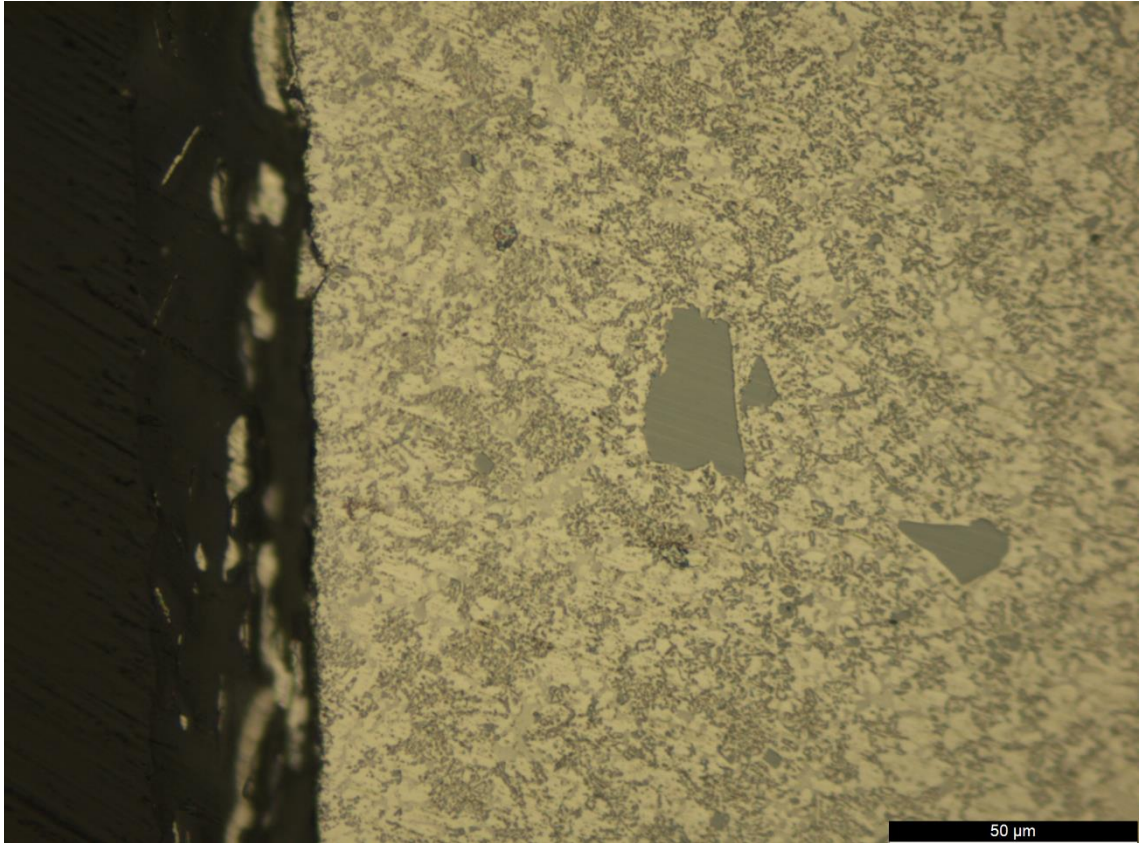
Kuva 24. Kiinni luhistuneita kuplakanavia.

Kuvassa 24 voidaan nähdä kaksi allekkain olevaa halkeamamaista virhettä noin 50 μm etäisyydellä toisistaan. Virheet ovat muodoltaan haaroittuneita. Virheet voisivat olla kiinniluhistuneita kuplakanavia tai kaksoiskalvoja. Kuvassa esiintyvä mikrorakenne on pääosin Al–Si-eutektikumia. Kuvasta voidaan myös erottaa väriltään piitä vaaleampia faaseja, jotka voivat olla kuparirikkaita yhdisteitä.



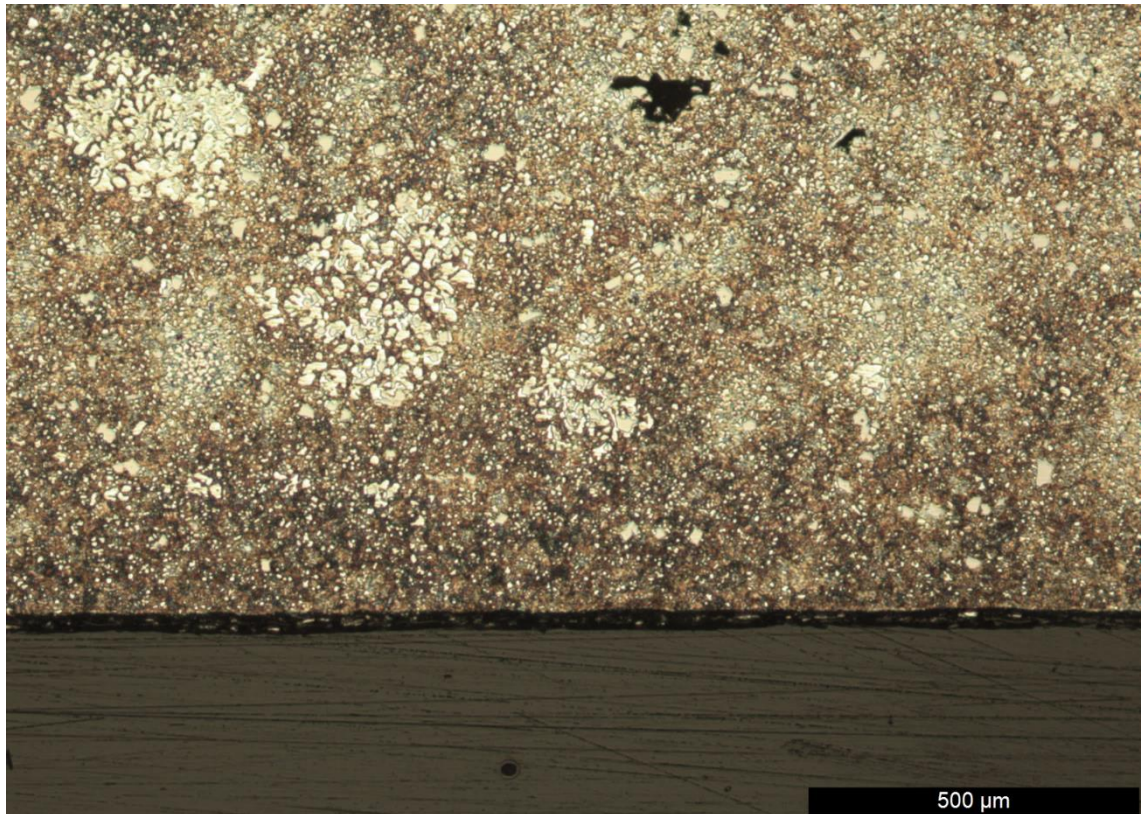
Kuva 25. Mikrorakennetta valutilaisen pinnan läheisyydessä.

Kuvassa 25 näkyy valurungon valutilaista pintaa ja mikrorakennetta yli yhden millimetrin syvyyteen saakka. Primaaripiikiteiden voidaan nähdä jakautuneen tasaisesti myös valupinnan lähellä ja olevan keskenään hyvin samankokoisia. Mikrorakenne ei näytä kehittyvän suuresti valutilaisesta pinnasta valun sisäänpäin edettäessä.



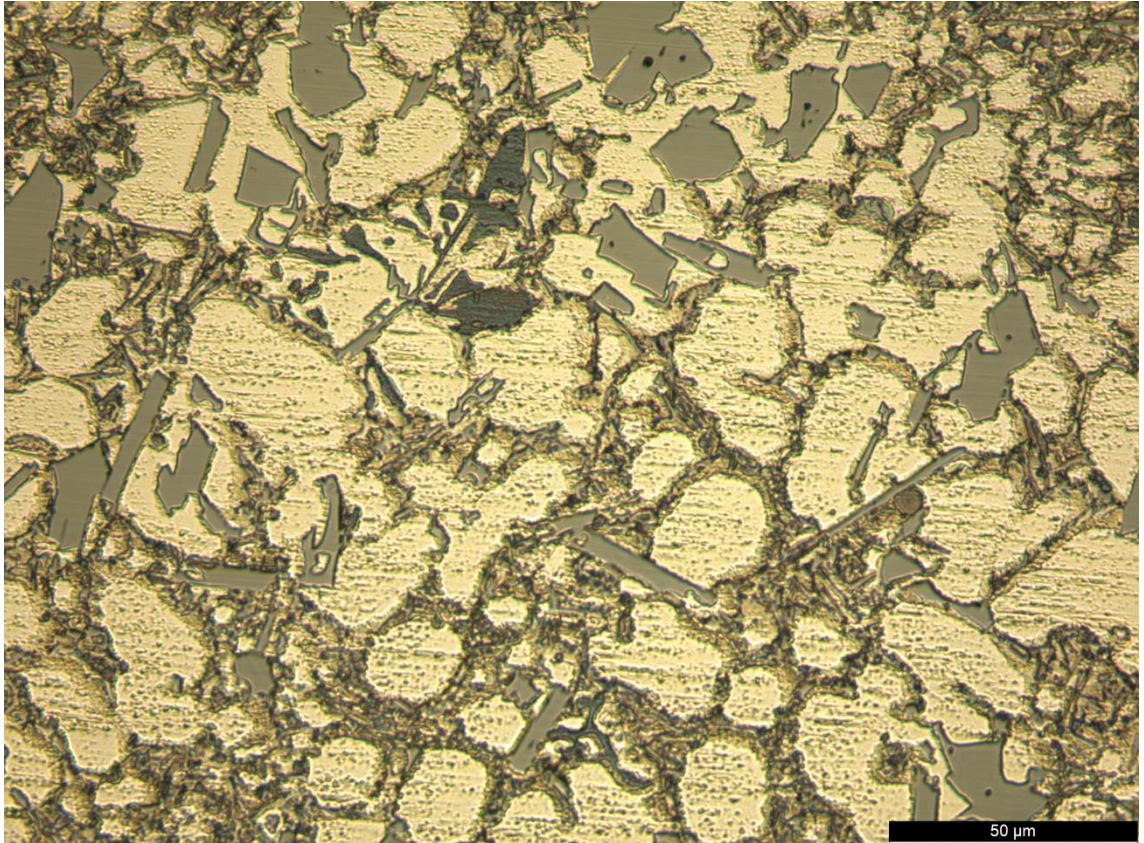
Kuva 26. *Suurennos mikrorakenteesta valutilaisen pinnan läheisyydessä.*

Kuva 26 on suurennos kuvan 25 alueelta. Kuva ilmentää valurungon mikrorakennetta lähellä muottipintaa. Eutektinen rakenne on muodostunut hyvin hienojakoiseksi nopean jähmettymisen seurauksena. Eutektisen piin voidaan nähdä esiintyvän monimutkaisina hienojakoisina muodostelmina. Kuten ylieutektisilla Al–Si-seoksilla yleensäkin, primaarihiukkeiden voidaan todeta kuvan perusteella muodostuneen ennen rakenteen jähmettymistä. Painevaluprosessille ominainen nopea jäähtyminen ja jähmettyminen eivät tarjoa riittävästi aikaa suurten primaarihiukkeiden kasvulle.



Kuva 27. Kolme dendriittiä lähellä valupintaa.

Näytepinnoilla esiintyi joitain yksittäisiä primaarialumiinidendriittejä. Kuvassa 27 voidaan nähdä kolme vaaleana erottuvaa dendriittiä. Dendriitit ovat muodoltaan monimutkaisempia kuin tavanomaiset alieutektisten seosten dendriitit. Dendriittien lisäksi kuvasta voidaan erottaa etsauksen ansiosta toisistaan poikkeavia mikrorakenteellisia alueita. Kuva on otettu etsatulta näytepinnalta läheltä valutilaista ulkopintaa.



Kuva 28. Suurennos kuvan 27 keskimmäisestä dendriitistä.

Kuva 28 on suurennos kuvan 27 alueelta ja ilmentää primaari- eli α -alumiinidendriitin rakennetta. Dendriitin sisällä voidaan nähdä tummaa, vihertävää yhdistettä, joka voi olla rautapitoista yhdistettä. Materiaali on syöpynyt etsauksessa eri tavoin perusaineessa, kuin dendriittivarsien ja rakeiden rajoilla.

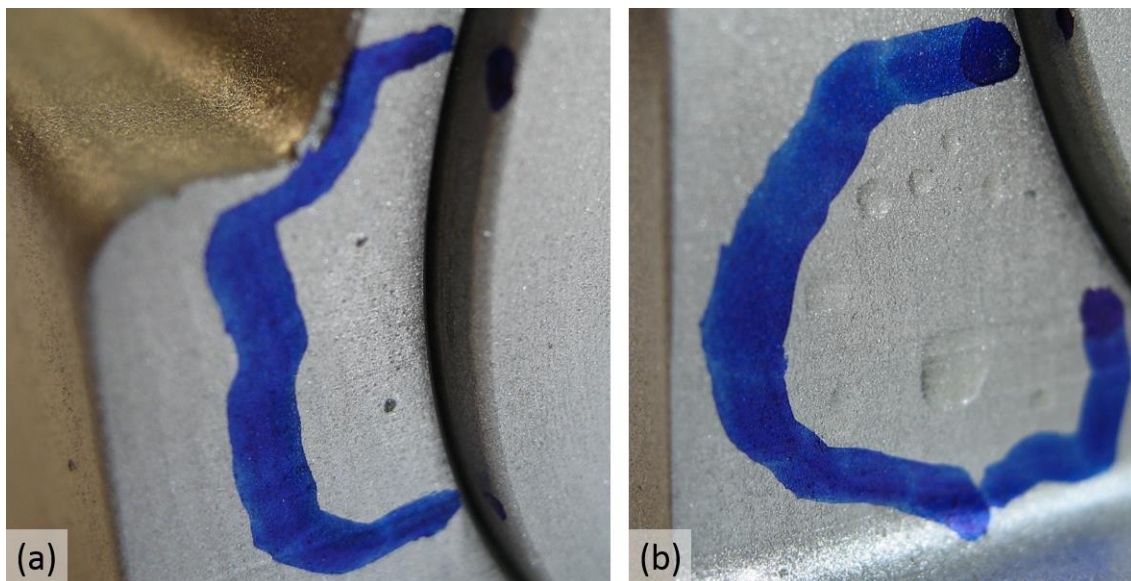
5. VALURUNGON PAINETIIVEYDEN PARANTAMINEN

Tämän työn keskeisimpänä tarkoituksena oli erään ovensuljinmallin rungon painetiiveyden parantaminen. Kokoonpantu ovensuljin sisältää suljetun sylinterimäisen tilan, joka täytetään öljyllä. Rungon heikko painetiiveys muodostuu ongelmaksi, kun öljy pääsee vuotamaan rungon läpi. Koska öljy on ovensulkimien toiminnallinen komponentti, vähäinenkin öljyvuoto vaikuttaa ovensulkimen toimintaan haitallisesti. Myös esteettisistä syistä on tärkeää, että runko sulkee öljyn tiiviisti. Öljyvuotoja on löydetty etenkin runkojen koneistetuilta päätypinnoilta, mutta toisinaan myös koneistamattomilta ulkopinnan alueilta. Öljyvuotojen esiintyminen on ollut ajoittaista ja merkittävää.



Kuva 29. Vuotoja rungon koneistetulla ja maalatulla päätypinnalla.

Vuotokanavat paljastuvat pääasiassa vasta ovensulkimien kokoonpanon ja maalauksen jälkeen. Tämän voidaan olettaa johtuvan ovensulkimen lämpötilan kohoamisesta maalauksen aikana. Öljy ja jäännösilma pyrkivät laajenemaan lämpötilan noustessa ovensulkimen sisällä. Koska ovensulkimen lämpölaajeneminen ei kykene kompensoimaan öljyn tilavuudenmuutosta, paine sulkimen sisällä kasvaa. Öljyn paineen kasvu saa sen puristumaan ulos ensin vuotokanavia pitkin ja lopuksi maalipinnan läpi. Kuva 29 osoittaa, kuinka öljyvuodot ilmenevät valmiissa ovensulkimessa. Kuvassa voidaan nähdä useita öljyvuotoja ovensulkimen ylijuoksun puoleisella päätypinnalla.



Kuva 30. Paljain silmin havaittavia (a) ja ei havaittavia vuotokanavia (b).

Vuotokanavien päät voivat olla silminnähtäviä, mutta ovat toisinaan vaikeasti havaittavia. Kuvassa 30 (a) voidaan nähdä kaksi selkeästi erottuvaa vuotokanavaa, joista öljyä on valunut ovensulkimien ulkopinnalle. Kuvassa 30 (b) on puolestaan useita vaikeasti erotettavia vuotokanavia ja niistä läpivuotaneita öljypisaroita. Vuotokanavat on ympäröity sinisellä tussilla.

Koneistettujen runkojen painetiiveydessä on todettu epäsäännöllistä vaihtelua, joka on johtanut laatu- ja kustannusten kasvuun. Sisäiset laatu- ja kustannukset ovat kasvaneet muun muassa lisääntyneen hukkan ja arvoa tuottamattoman työn vuoksi. Myös ulkoiset laatu- ja kustannukset ovat kasvaneet mm. lisääntyneiden reklamaatioiden vuoksi. Painetiiveyden vaihteluille ei ole pystytty löytämään syytä muun muassa monimutkaisten, valmistuksen eri vaiheisiin liittyvien muuttujien vuoksi. Mahdolliset painetiiveyden vaikuttavat tekijät voidaan jakaa raaka-ainetoimittajan, valutoimittajan ja ovensulkimien tuotantoprosessia koskeviin tekijöihin. Painetiiveysohjelman juurisyyt on voitu rajata ovensuljinrunгон sisäiseen rakenteeseen ja siten raaka-aineeseen, sulankäsittelyprosessiin tai valuprosessiin. Raaka-aineen osalta sen ominaisuudet, kuten poikkeava kemiallinen koostumus sekä erityisesti tavallista suurempi oksidi- ja muiden sulkeumien määrä voivat heikentää valujen painetiiveyttä. Sulankäsittelyn osalta muun muassa jatkuva romun käyttö ja epäonnistunut sulankäsittely voivat johtaa samoin oksidi- ja muiden sulkeumien lisääntymiseen, koostumuksen muuttumiseen ja sulaan liuenneiden kaasujen, kuten vedyn korkeampiin pitoisuuksiin. Itse painevaluprosessiin liittyy varsinaisten prosessiparametrien lisäksi muuttujia, kuten sulansiirtovälineiden käsittelyt, valukammion täytöaste, valujärjestelmän kuluminen ja korrosio sekä muotin lämpötila.

Suurin osa öljyn läpivuodoista esiintyy ovensuljinrunгон koneistetuilla ulkopinnoilla. Koneistus avaa pintaan valun sisäisiä virheitä, jotka mahdollistavat öljyn virtaamisen runгон sisältä ulos. Vuotanut öljy kostuttaa runгон ulkopintaa ja voi valua vuodon jat-

kuessa ovea tai oven karmia pitkin lattialle. Esteettisen haitan lisäksi oviympäristöön tai maahan levinnyt öljy voi aiheuttaa turvallisuusriskin esimerkiksi liukastumisen kautta. Pienikin öljytilavuuden muutos heikentää ovensulkimen toiminnallisia ominaisuuksia, kuten oven sulkeutumisenopeuden hallintaa. Ilmamäärän kasvaessa ovensulkimen sisällä oven sulkeutumisenopeus kasvaa ja voi aiheuttaa vaaratilanteita.

Useiden ovensuljinten visuaalinen tarkastus osoitti, että rungon ylijoukuspäätypinnalta on löydettävissä huomattavasti useammin silmännähtäviä aukikoneistettuja huokosia (epäjatkuvuuskohtia) kuin rungon valuporttipäätypinnalta. Valuporttipäätypintavuotoja löytyi useiden satojen ovensuljinten tarkastuksessa vain yksittäisiä. Tämä on ymmärrettävää, koska sulaan sekoittuneet kaasukuplat nousevat muotin täytyttyä ylöspäin kohti ylijoukuspäätypintaa. Tämä toisaalta myös tukee väitettä kuplakanavien aiheuttamista vuodoista, koska suurin osa vuodoista on juuri näiden ylijoukuspäätypinnalla havaittavien virheiden aikaansaamia. Virheet voivatkin olla siis kuplakanavia.



Kuva 31. Korjaus- ja kehitystoimenpidevaihtoehtojen kustannustehokkuusvertailu.

Kuvassa 31 esitellään potentiaalisia keinoja vuoto-ongelmien ratkaisemiseksi ja hallittavuuden kehittämiseksi. Keinot on jaettu neljän selkeän kokonaisuuden alle, jotka ovat asetettu yksinkertaistaen kustannustehokkuusjärjestykseen. Kustannustehokkaimmaksi kokonaisuudeksi on oletettu rungon geometria, sillä siihen tehtävät muutokset voidaan toteuttaa pienin kustannuksin uuden muotin myötä, kun vanha muotti on käytetty loppuun. Kaikki muottimuutokset eivät myöskään vaadi koko muotin uusimista, vaan voivat olla toteutettavissa vanhaan muottiin esimerkiksi vaihtamalla osia muotista tai poistamalla materiaalia muotista. Rungon geometrian osalta tarkistuksen kohteiksi valittiin seinämäpaksuussuunnittelu, koneistustarpeen ja työvarojen minimointi sekä ovensulkimen päätykannen o-renkaan siirtäminen kierteiden etupuolelle.

Toiseksi kustannustehokkaimmaksi kokonaisuudeksi on oletettu valuprosessin kehittäminen, jonka osalta keinoja ovat ainakin täyttöjärjestelmän kehittäminen, tiivistysvaiheen paineen ja keston tarkistaminen ja muotin lämpötilanhallinnan kehittäminen. Valuprosessin kehittäminen tapahtuisi yhteistyössä valimon kanssa ja vaatisi huomattavan määrän aikaa tutkimiseen, testaamiseen ja implementoimiseen. Ratkaisujen löytämisestä ei kuitenkaan olisi varmuutta ja ratkaisut voisivat vaatia investointeja.

Jälkikäsitteilyt eivät korjaa ongelman juurisyytä, mutta voivat vähentää siitä aiheutuvia taloudellisia haittoja. Jälkikäsitteilyistä erityisesti tiivistäminen on toimivaksi osoitettu menetelmä painetiiveyden parantamiseksi. Tiivistäminen perustuu vuotokanavien ja pintaan avautuvan huokoisuuden täyttämiseen tiivistysaineella. Toinen potentiaalinen jälkikäsitteilymenetelmä olisi vuotokanavien sulkeminen mekaanisesti muokkaamalla. Erityisesti kitkamuokkauskäsittely (engl. friction stir processing) voisi olla toimiva ja tuotantoon integroitava menetelmä, joka mahdollistaisi käsitellyiltä pinnoiltaan painetiiveysmielessä virheettömien ovensuljinrunkojen valmistamisen.

Laadunvalvonnan kehittäminen voisi pitkällä aikavälillä pienentää laatukustannuksia. Jonkin uuden laadunvalvontamenetelmän onnistunut käyttöönotto voisi poistaa hukkatyön, joka syntyy vuotavien valurunkojen jalostamisesta jopa valmiiksi tuotteeksi asti. Toimiva tuotantoon integroitu laadunvalvontamenetelmä vähentäisi tehokkaasti myös ulkoisia laatukustannuksia, pääasiassa reklamaatiokustannuksia. Uusi laadunvalvontamenetelmä vaatisi kuitenkin investoinnin sekä merkittävästi resursointia muun muassa tutkimukseen, käyttöönottoon ja toimintaan. Laadunvalvontaa voisi kehittää myös nykyisten tuotantovaiheiden puitteissa. Jos esimerkiksi vuotavat ovensulkimet paljastuisivat kokoonpanon jälkeisen pesun jälkeen, viallisia ovensulkimia ei lähetettäisi maalataviksi. Tämä voisi olla toteutettavissa yksinkertaisesti nostamalla pesuveden lämpötilaa, jolloin lämpötilan kasvattama paine parantaisi vuotojen näkyvyyttä. Pestyt ovensulkimet tarkastettaisiin lämpötilan tasaannuttua visuaalisesti. Toimiessaan muutos voisi vähentää myös ulkoisia laatukustannuksia.

5.1 Läpivuotojen syyt ja vuotomekanismit

Valukappaleen heikko vuototiiveys voi olla seurausta kaasu- tai kutistumahuokoisuudesta. Kutistumahuokoisuus voi aiheuttaa läpivuotoja erityisesti suuren jähmettymisvälin seoksilla, joilla kutistumahuokoisuus voi esiintyä tasomaisina tai verkostomaisina huokosina. Tällaiset kutistumahuokokset voivat ulottua laajalle ja muodostaa vuotokanavia. [2.]

Sulan jäähtyminen puuroalueelle johtaa aineen osittaiseen jähmettymiseen. Jähmettymät voivat padota valunsisäisiä mikrosyöttöjä, jolloin korvaussulan virtaus estyy. Epätasainen jähmettyminen mahdollistaa huokoisuuden esiintymisen laajalti ja lähellä valupintoja. Kutistumahuokoisuus aiheuttaa vuotoja pääasiassa, kun koneistus leikkaa huokosen auki kahdelta pinnalta ja huokonen muodostaa avoimen väylän pintojen välille. Läpivuotoja voi esiintyä myös valutilaisilla pinnoilla, mikäli alueen jäähtytys on ollut riittämätöntä ja kutistumahuokonen on päässyt kasvamaan pintaan avautuvaksi virheeksi. [2.]

Kaasuhuokoisuus ei pääsääntöisesti kykene muodostamaan vuotokanavaa joitakin erityistyyppjeään, kuten kaksoiskalvoja ja kuplakanavia lukuun ottamatta. Kaasuhuokokset, jotka ovat muodostuneet joko kaasun sekoituttua sulaan pieninä kuplina tai vedyn liuet-

tua sulaan ja tiivistettyä kupliksi, ovat yleensä muodoltaan yksinkertaisia ja jakautuneet jokseenkin tasaisin välimatkoin. Näin ollen huokoisuuden osuus valukappaleen tilavuudesta tulisi olla todella korkea, jotta huokosten olisi todennäköistä muodostaa vuoto-kanavia. Kaasuhuokokset voivat kuitenkin kehittyä kutistumahuokosiksi ja riittävän suuret kuplat kykenevät kohoamaan sulassa muodostaen kuplakanavia. [2.]

John Campbellin mukaan suurin osa alumiiniseosvalujen läpivuodoista johtuu oksidisulkeumista. Osa oksidisulkeumista on peräisin sulankäsittelyvaiheista, joissa oksidikalvolla on ollut aikaa kasvaa paksuutta. Paksun oksidikalvon sekoittuessa sulaan, se kääriytyy usein ohueen ympäröivään oksidikalvoon. Tällaisten oksidikalvojen väliin jää usein kaasukanavia paksun oksidikalvon jäykkyyden vuoksi. Suurin osa läpivuodon aiheuttavista oksidisulkeumista on muodostunut ilman sekoittuessa sulaan valukanaviston ja muottipesien täytyessä. Pyörteiset virtaukset saavat ohuet oksidikalvot rypistymään itseään vasten, jolloin niiden väliin jää ilmaa. Tällaisia kaksoiskalvoja esiintyy pääasiassa valun alueilla, joiden täytyminen on ollut turbulenttista. Läpivuoto voi tapahtua koneistuksen seurauksena sisältään kuivan kaksoiskalvon läpi. [2.]

Kuplakanavat osoittautuivat vuotojen pääasialliseksi syyksi tarkasteluun valituissa ovensulkimissa. Näytteissä paksun seinämän alueella esiintyvä huokoinen rakenne on voinut syntyä kuplakanavien ja kanavista edenneen kutistumahuokoisuuden seurauksena. Edellä mainittujen virheiden yhteisvaikutuksena rungon yläpään (ylijuoksupään) paksun seinämän alueille syntyy verkostomainen huokonen, jonka öljy pyrkii kostuttamaan kauttaaltaan muun muassa paineen vaihtelun ja adheesion vaikutuksesta. Ilmiöllä voi olla vaikutusta myös öljyn puhtauteen, joka on ovensulkimen toiminnan kannalta olennaista.

Valimo on todennut muotin valuporttien kuluvan jonkin verran odotettua nopeammin ja uskoo tämän olevan yksi pääsyistä sekä vuoto- että koneistusongelmien esiintymiselle. Valimo on todennut lisäksi, että kuluminen on nopeampaa nimenomaan yliutektisilla seoksilla. Valuporttien tavallista nopeampi kuluminen onkin todennäköisesti seurausta yliutektisessä sulassa esiintyvien primaaripiikiteiden aiheuttamasta eroosiosta. Valuportin epätasainen kuluminen aikaansaa sulavirtauksen tai -suihkun suunnan muutoksia ja muotin pyörteisemmän täyttymisen. Tämä voi johtaa kaksoiskalvojen ja kuplakanavien lisääntyneeseen muodostumiseen ja siten sekä vuoto- että koneistusongelmien mas- saesiintymiin. Valuportin kuluminen on yleensä seurausta sekä eroosiosta että korroosiosta. Sula alumiini pyrkii liuottamaan rautaa muotin pinnalta. Liukeneminen voi olla merkittävää erityisesti, jos raudan pitoisuus seoksessa on pieni. [2, 4.]

Valun mekaanisten ominaisuuksien, kuten vuototiiveydenkin, tiedetään pohjautuvan valun rakenteeseen. Ehjä ja homogeeninen mikrorakenne tuottaa ominaisuuksiltaan laadukkaan valun. Sisäiset virheet, kuten kaksoiskalvot ja kuplakanavat heikentävät tehokkaasti valun lujuutta ja tiiveyttä. Valun jähmettymisnopeus vaikuttaa paitsi mikroraken-

teen ominaisuuksiin, kuten raekokoon (tai dendriittivarsien etäisyyteen) myös erinäisten virheiden kehittymiseen, kuten kaksoiskalvojen avautumiseen ja laajenemiseen. [2.]

5.2 Vuoto-ongelman ajoittaisuus

Vuotojen esiintyminen oli ajoittaista ja epäsäännöllistä. Vaihtelua voitiin havaita sekä valuerien kesken että niiden sisällä. Pahimmillaan jopa yli 30 prosenttia valuerän oven-suljinrungoista oli vuotavia. Valurunkojen vuoto-ongelman ajoittaisuuteen on useita mahdollisia juurisyitä, joista ei voitu tunnistaa tai päätellä pääsyitä vuodoille. Vaikka murtopintatarkastelu osoitti osan läpivuodoista johtuvan kuplakanavista, myös kaksoiskalvot voivat aiheuttaa läpivuotoja. Näin ollen ongelman esiintymisen ajoittaisuuteen vaikuttavia syitä on mielekästä tarkastella vuotomekanismeittain.

5.2.1 Kuplakanavien esiintyminen

Kuplakanavien määrän vaihteluun voivat vaikuttaa prosessiparametrien lisäksi muun muassa voiteluaineiden ja muiden mahdollisesti kaasuuntuvien aineiden määrät valujärjestelmässä. Männän ja muotin voiteluaineen määrän vaihtelut samoin kuin muotin halkeamiin jääneet voitelunestejäämät voivat lisätä sulaan sekoittuvan vesihöyryn ja palokaasujen määriä. Ilman ja vesihöyryn lisäksi myös palokaasut kykenevät usein hapettamaan sulaa ja siten muodostamaan kuplakanavia. [2.]

Sulan annosmäärän ja siten valukammion täyttöasteen vaihtelu vaikuttaa muottiin työn-tyvän ja siten myös sulaan sekoittuvan ilman määrään. Samoin muutokset männän nopeuksissa valuis- kunnan ensimmäisessä ja toisessa vaiheessa voivat aiheuttaa sula-aallon rikkoutumista ja siten ilman sekoittumista sulaan. Sulasuihkun suuntausta voi heikentää muun muassa valuportin kuluminen. Erityisesti portin epätasainen kuluminen voi johtaa sulasuihkun särky- miseen pisarasuihkukuksi. Virheellinen sulasuuhkun suuntaus ja muotin turbulenti täytyminen kasvattavat sulaan sekoittuneen kaasun määrää. [2.]

Kolmannen eli tiivistysvaiheen paine taas vaikuttaa suoraan sulaan sekoittuneen kaasun paineeseen ja siten esimerkiksi kuplakanavien kasvuun ja avautumiseen. Tähän vaikuttaa lisäksi tiivistysvaiheen kesto. Mikäli valu ei ole jäähtynyt riittävästi ja saavuttanut siten riittävää lujuutta ennen muotin avaamista, materiaali voi myötää valunsisäisen kaasun paineen vaikutuksesta. Näin valimoiden motivaatio sykliajan lyhentämiseen voikin johtaa sulkeutuneiden kuplakanavien avautumiseen. [2.]

Myös vaihtelut lämpötiloissa voivat vaikuttaa kuplakanavien esiintymiseen. Sulan valulämpötilan vaihtelu ja vaihtelut muotin lämmitysöljyn sekä jäähdytysneste- en lämpötilassa ja virtaamassa vaikuttavat valun lämpötilaan. Tämä voi tarkoittaa vaihtelua muun muassa valun jäähtymis- ja jähmettymisnopeudessa sekä myötölujuuden vaihtelua tiivistyspaineen poistuessa. Muutokset voivat johtaa esimerkiksi tavallista pidempien ja oksidikalvoltaan paksumpien kuplakanavien muodostumiseen. [2.]

5.2.2 Kaksoiskalvojen esiintyminen

Kaksoiskalvojen esiintymiseen vaikuttavat osin samat tekijät kuin kuplakanavien esiintymiseen. Lisääntynyt kaasun sekoittuminen sulaan ja siten vuorovaikutus hapen kanssa kasvattaa myös kaksoiskalvojen määrää. Muutokset valun lämpötilassa vuorostaan vaikuttavat kaksoiskalvojen avautumiseen ja täyttymiseen kaasulla. [2.]

Esiintymiseen vaikuttavat merkittävästi myös raaka-aineen laatuun ja sulankäsittelyyn liittyvät tekijät. Oksidikalvoja ja -sulkeumia voi olla huonolaatuisissa sekundaariharjoissa merkittäviä määriä. Sama pätee romuun, kuten aiemman valuerän valukkeisiin. Oksidisulkeumat ovat pysyviä virheitä, jotka eivät hajoa valimon tavanomaisissa sulankäsittelyprosesseissa. Romun osuutta tulisikin joissain tapauksissa rajoittaa, jotta valulta voitaisiin odottaa johdonmukaisia ominaisuuksia. Myös sulan liian korkea lämpötila, liian pitkä sulanapitoaika ja jäähtyneiden uunien käyttö voivat lisätä kaksoiskalvojen ja muiden oksidisulkeumien määrää sulassa. Jäähtynyt uuni voi sitoa merkittäviä määriä kosteutta, joka vapautuu sulaan, mikäli uunia ei ole lämmitetty riittävästi ennen käyttöä. [2.]

Kaksoiskalvojen määrää kasvattavat myös useat eri sulankäsittelyt. Kaikki sulan kaataminen, sekoittaminen ja loiskuminen muodostavat lisää alumiinioksidikalvoa, joka usein sekoittuu kaksoiskalvoina sulaan. Esimerkiksi kaasuhuuhtelussa, jonka tarkoituksena on nostaa oksidikalvoja pintaan tai poistaa vetyä sulasta, sulaa sekoitetaan ja siihen puhalletaan typpeä tai argonia pieninä kuplina. Kuplien koko tulisi olla mahdollisimman pieni sulan pinnan liikkeen minimoimiseksi. Oikein suoritettu kaasuhuuhtelu vähentää oksidikalvojen määrää sulassa, mutta väärin tehtynä se voi myös kasvattaa kaksoiskalvojen määrää. Kaasuhuuhtelun on osoitettu parantavan painevalujen vuototiiveyttä. [2.]

Lisääntyneet sulan kaatamiset tai kasvaneet kaatokorkeudet lisäävät kaksoiskalvojen määrää. Mikäli sulan annostelu tapahtuu kauhomalla, kauhan pintaan voi tarttua oksidikalvoa, joka kulkeutuu valuun. Riski on erityisen suuri, jos kauhan pinta on vaurioitunut tai kauhan voitelu ei ole riittävä. [2.]

5.3 Valurungon geometrian parantaminen ja koneistuksen kehittäminen

Vuototiiveysongelma on kasvattanut kohdeyrityksen lisäksi merkittävästi myös valutoimittajan laatukustannuksia. Näin ollen myös valimolla oli motiivi ongelman ratkaisemiseen. Valurungon toiminnalliset piirteet ja ongelma-alueet tunnistettiin ja geometriaa tarkasteltiin uudelleen yhteistyössä valimon kanssa. Geometrian parantamisen lähtökohtana oli, ettei toiminnallisia piirteitä muuteta. Tavoitteiksi muodostui koneistustarpeen vähentäminen ja seinämäpaksuuksien pienentäminen rungon kriittisillä alueilla.

Ovensulkimen runkoa ja konstruktiota olisi voitu kehittää myös siirtämällä päätykannen o-renkaan paikkaa. Päätykannet sulkevat ovensuljinrunгон sen molemmista päistä. Päätykannet kiinnitetään runkoon kierrelitoksella. Liitoksen tekee tiiviiksi päätykannen laippapinnan ja kierteen väliin asennettava o-rengas. Koska tiivistävä o-rengas sijaitsee lähellä rungon lieriöpinnan suuta, vuotokanavien ei tarvitse olla erityisen pitkiä yltääkseen kiertämään tiivistepinnan rungon sisältä koneistetulle päätypinnalle. Mikäli päätykannen ja rungon konstruktiota muutettaisiin siten, että o-rengas sijoittuisi kierteseen nähden rungon sisäpuolelle, vuotokanavan tulisi olla kierteen pituuden verran pidempi kiertääkseen tiivistepinnan. Koska vuotokanavien tulisi olla merkittävästi pidempiä, vuotojen voi tällöin olettaa esiintyvän harvemmin. O-rengasta ei päätetty siirtää, sillä se olisi vaatinut useita muutoksia ovensulkimen konstruktiin.

Rungon geometriaan tehtiin muutoksia vuotojen vähentämiseksi. Geometriamuutokset voitiin toteuttaa uudella luistilla ilman merkittäviä muottiin tehtäviä muutoksia. Muutoksen toteuttaminen tulikin huomattavasti muotin uusimista edullisemmaksi. Uudessa geometriassa kriittisen alueen ainevahvuus, koneistettava pinta-ala ja koneistussyvyys olivat aiempaa pienemmät.

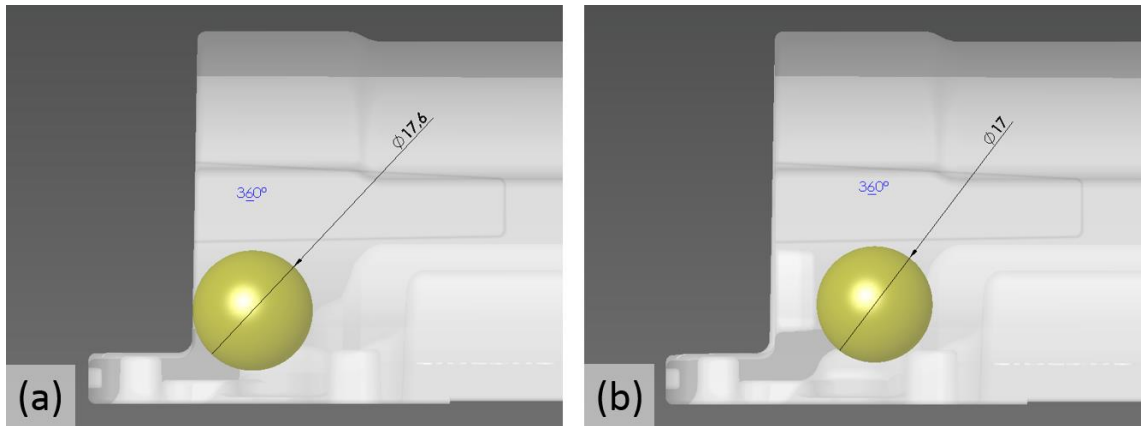
Pystyluistit tuottavat runkoon suurten keernapintojen lisäksi osan keernoja ympäröivistä päätypinnoista. Rungon päätypinta on päästetty eli hellitetty sekä luistin tuottaman pinnan että kiinteän muottipuoliskon tuottaman pinnan osalta. Luistin tuottaman pinnan osalta hellitys on tarpeeton, sillä siinä ei ole vastapäätöjä. Koska rungon päätypinnat plaanataan valuasentoon nähden vaakasuuntaisiksi, tämä yhden asteen hellityskulma kasvattaa koneistussyvyyttä päätypinnan toisella laidalla. Koneistussyvyuden kasvaminen puolestaan lisää huokosiin osumisen ja siten vuotokanavan avaamisen riskiä.

Luistipinnat muutettiin hellityksettömiksi ja pintoja laajennettiin kattamaan suurempi osa rungon päätypinnoista. Tällöin hellitetyt muotin tuottamat pinnat jäivät reunustamaan rungon päätypintoja ja suuremman koneistussyvyuden alue pieneni. Näin seinämien kriittinen keskialue jäi luistipinnan ja siten pienen työvaran alueelle. Vaikutusta tehostettiin vähentämällä plaanausten työvaraa kauttaaltaan.

Päätypintojen välittömään läheisyyteen sijoittuu rungon kookkaimmat massakeskittymät ja suurin seinämäpaksuus. Massakeskittymät jäähtyvät valuissa hitaimmin, mikäli alueelle ei sovelleta erityistä paikallista jäähtytystä. Hidas jäähtyminen ja jähmettyminen antavat kaasukuplille aikaa kohota ja kaasuhuokosille aikaa kehittyä. Tämän lisäksi tilavuuden muutosta korvaava sulan syöttö voi katketa korkeasta tiivistysvaiheen paineesta huolimatta, jos yhä jähmettyvä massakeskittymä jää jähmettyneen aineen ympäröimäksi, ja erityisesti, jos massakeskittymä sijaitsee kaukana sisäänvaluporteista.

Massakeskittymää keksittiin siirtää lisäämällä luistipinnalle rungon sisään työntyvät ulkonemat. Nämä ulkonemat tuottaisivat valutilaisiksi jäävät upotukset rungon pääty-

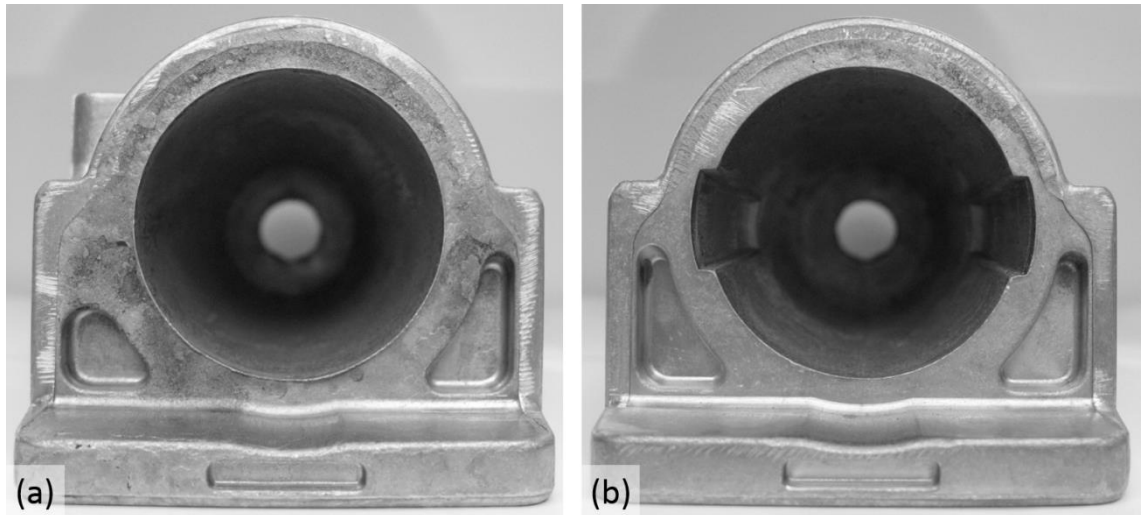
pinnoille. Upotukset vähentäisivät koneistettavaa pinta-alaa ja huokoisuusvirheiden osumisen riskiä koneistettavalle pinta-alalle.



Kuva 32. Valun suurimman massakeskittymän koko ja sijainti vanhassa (a) ja uudessa (b) geometriassa.

Kuva 32 esittää valurungon ylijuoksupäädyn suurimman massakeskittymän siirtymistä ja pienenemistä geometriamuutosten seurauksena Heuvers'in pallo -menetelmää soveltaen. Suurin massakeskittymän sisälle mahtuva pallo on geometriamuutosten myötä siirtynyt upotuksen syvyyden verran kauemmaksi ylijuoksupäätyypinnasta ja sen halkaisija on pienentynyt noin 17,6 millimetristä noin 17,0 millimetriin.

Upotuksista haluttiin niin laajat ja syvät, että ne vähentäisivät kauttaaltaan kriittisen alueen ainevahvuutta. Upotuksista ei kuitenkaan haluttu kuutta millimetriä syvempiä, etteivät vastaavat luistinmuodot lämpenisi liikaa. Luistinmuotojen lämpeneminen voisi heikentää huokoisuutta loitontavaa vaikutusta ja upotusten pohjien ja luistin pinnan välillä saattaisi esiintyä takertumista.

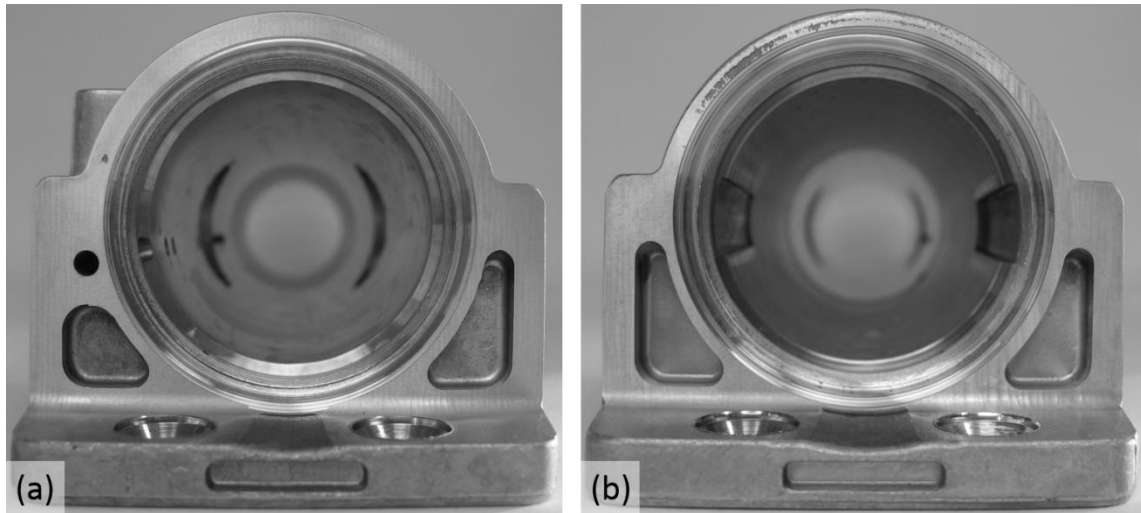


Kuva 33. Valurungon paranneltu geometria sisäänvalupäädyssä (a) ja ylijuoksupäädyssä (b).

Kuva 33 ilmentää valurungon päätypintoihin suunniteltuja upotuksia ja luistipinnan geometriaa ja laajuutta. Kuvassa voidaan nähdä lisäksi sisäänvaluportin ja päätyylijuoksun murtopinnat.

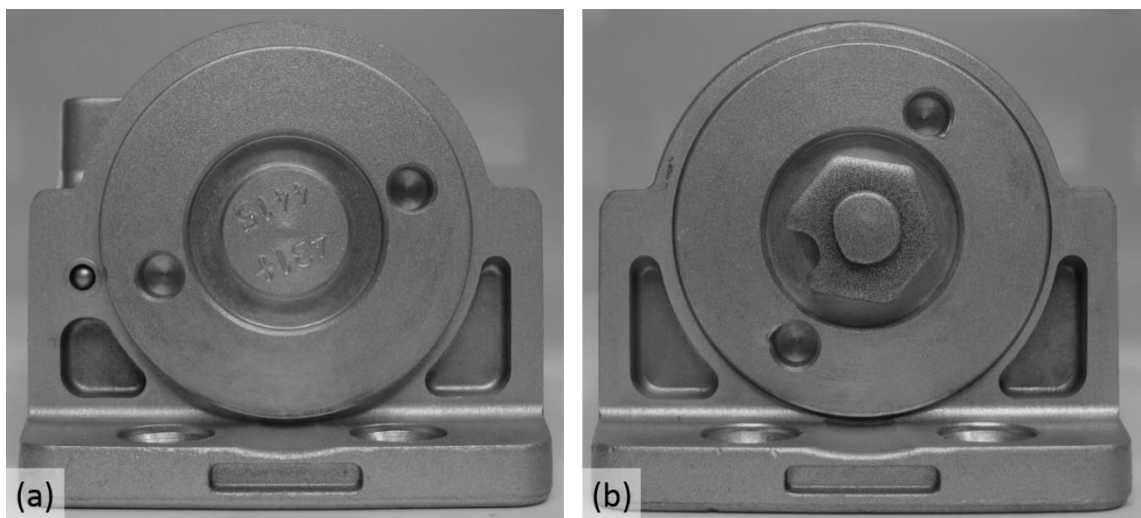
Vanhassa geometriassa päätypinnat olivat kauttaaltaan yhden asteen päästökulmalla. Koneistussyvyys oli ennen muutoksia päätypinnoilla suurimmillaan paikoin yli 1,2 mm. Muokatussa geometriassa luistin synnyttämä pinta ei ole päästölinen ja luistipintaa on kasvatettu merkittävästi kuvan 33 osoittamalla tavalla.

Valurungon koneistusta pyrittiin kehittämään siten, että koneistettu pinta-ala ja työvarat minimoituisivat. Tätä varten tilattiin uudet koneistustyökalut. Muokattu geometria ja tarkastettu koneistusprosessi mahdollistavat työvarojen laskemisen. Suunnitelluksi työvaraksi tuli uusilla plaanaustyökaluilla 0,2 mm sekä sisäänvalu- että ylijuoksupäätypinnoilla.



Kuva 34. Koneistetun rungon sisäänvalu- (a) ja ylijuoksupääty (b).

Kuvasta 34 voidaan nähdä, että päätyvaluportin ja ylijuoksun murtopintaa on jäänyt koneistumatta työvaran minimoinnin seurauksena. Tällä ei kuitenkaan katsottu olevan merkitystä kyseisen tuotteen osalta. Päätypintojen plaanaus ei paljastanut 20 koneistetussa koe-erän valurungossa lainkaan huokoisuutta tai mahdollisia vuotokanavan päitä.



Kuva 35. Kokoonpannun ja maalatun ovensulkimen päädyt.

Koe-erän 20 koneistetusta rungosta 16 kokoonpantiin ja maalattiin. Maalatun ovensulkimen päädyt on esitetty kuvassa 35. Kokoonpanon jälkeinen pesu ja maalaus eivät aiheuttaneet vuotoja yhdessäkään koe-erän ovensulkimessa. Maalattujen ovensuljinten painetiiveyttä testattiin edelleen lämmittämällä sulkimia uunissa 50 celsiusasteen lämpötilassa kahden tunnin ajan. Ovensulkimissa ei esiintynyt öljyn läpivuotoja uunituksesta aiheutuneesta paineen kasvusta huolimatta.

5.4 Valimon tuotantoprosessi

Valimon prosesseista pyrittiin tunnistamaan vuototiiveyden kannalta kriittisiä vaiheita ja tekijöitä. Olennaisia vaiheita pyrittiin selvittämään riittävän yksityiskohtaisesti. Joillekin toimenpiteille ja toimintamalleille etsittiin vaihtoehtoja vertailun vuoksi. Yhteistyö ei johtanut tämän työn puitteissa valimon tuotantoprosessin kehittämiseen.

Laadukas sula on aina tärkeä lähtökohta valun onnistumiselle. Toimiva täyttöjärjestelmä yhdistettynä virheettömään sulaan tuottaa rakenteeltaan eheitä ja vuototiiviitä valukappaleita [2]. Valimo käyttää runkojen raaka-aineena sekundaariharkkoja ja aiemmista valueristä jäänyttä romua. Romun osuutta raaka-aineesta ei ole rajoitettu, mutta se muodostaa keskimäärin puolet raaka-aineesta. Sulatuslämpötila on noin 715 ja valulämpötila 680 ± 15 celsiusastetta. Sulanapitouunissa olevan sulan määrää valvotaan pinnankorkeutta seuraamalla. Pinnankorkeuksille on asetettu kolme raja-arvoa, joiden avulla uunien täyttöä priorisoidaan.

Sellaisten uunien käyttöä tulisi välttää, joissa lämmöntuotto suuntautuu pienelle alalle sulan pintaa. Sulan tasainen lämpeneminen ehkäisee metallien välisten yhdisteiden muodostumista. Lisäksi tulisi välttää jäähtyneen uunin käyttöä ennen uunin riittävää esilämmitystä. Uunin jäähtyessä sen vuorausten kosteus lisääntyy. Vuoraukseen sitoutunut vesi siirtyy jäähtynyttä uunia käytettäessä sulaan muodostaen alumiinioksidia ja kasvattaen sulan vetypitoisuutta. [2.]

Sulalle suoritetaan sulanapitouunissa kaasuhuuhtelu typpikaasua käyttäen. Kaasuhuuhtelun kesto on $4 \pm 0,5$ minuuttia. Kaasuhuuhtelun on tarkoitus poistaa sulaan liuennutta vetyä ja sulaan sekoittuneita oksidikalvoja. Kaasuhuuhtelu tulisi toteuttaa siten, että N_2 -kuplien koko olisi minimaalinen, jotta oksidien nouseminen pintaan tehostuisi. Prosessin tulisi aiheuttaa minimaalisesti sulan virtauksia, jotta pohjaan vajonneet oksidikalvot eivät sekoittuisi uudestaan sulaan. Prosessin tulisi aiheuttaa myös minimaalisesti sulan sekoittumista ja pinnan turbulenssia, jotta pinnassa ei pääsisi muodostumaan uutta oksidikalvoa ja pintaan nousseet oksidikalvot eivät sekoittuisi sulaan. Myös sulan suodattaminen voi olla oikein tehtynä toimiva menetelmä oksidisulkeumien vähentämiseksi. Suodatus tulisi ajoittaa mahdollisimman lähelle itse valusykliä. [4, 15.]

Kaasuhuuhtelun yhteydessä sulaan lisätään kuparia ja fosforia sisältävää esiseosta, kuten Cu-10P, primaaripiikiteiden lukumäärän kasvattamiseksi. Fosfori reagoi alumiinin kanssa muodostaen alumiinifosfidia, AlP. Alumiinifosfidi toimii kiteytymisytimenä piikiteille. Erityisesti AlP₃-muoto edistää primaaripiikiteiden ydintymistä kasvattaen kiteiden määrää ja hienontaen siten niiden kokoa. Fosforikäsittely voi laskea primaari-piipartikkelien kokoa jopa kertaluokan verran käsittelemättömään sulaan nähden [16]. Menetelmää käytetään erityisesti ylieutektisille valualumiiniseoksille. Käsittelyn jälkeisen seisotusajan on oltava ainakin viisi minuuttia, mutta useiden tuntien sulanapitoaika voi johtaa vaikutuksen heikkenemiseen. [4.]

Valimo annostelee sulan kauhomalla painevalukoneelle. Valukammio tulee mitoittaa ja täyttää siten, että valukammion täyttöaste on ainakin kolme neljäsosaa sen tilavuudesta. Tällöin valukanavistoon ja muottiin kulkeutuvan ilman määrä pysyy siedettävänä. Annostelussa, kuten kaikissa muissakin sulankaatovaiheissa, tulisi lisäksi välttää sulan ylimääräistä liikehdintää. Sulan kaataminen tulisi suorittaa aina mahdollisimman matalalta ja toteuttaa siten, että minimaalinen osa sulaa joutuisi kosketuksiin ilman kanssa, ja että kaatamisesta seuraisi minimaalisesti turbulenssia ja sulan sekoittumista. [2.]

Täyttöjärjestelmä tulisi suunnitella siten, että muotin täytyessä syntyisi minimaalisesti turbulenttisia virtauksia. Muottipesän täytyminen tulisi suunnitella sellaiseksi, ettei merkittäviä sularintamien törmäyksiä tapahtuisi valun koneistettavien tai muuten kriittisten pintojen läheisyydessä. [2.]

Valimo käyttää valurunkojen valamiseen pääasiassa samaa 900 tonnin kiinnipitovoiman kylmäkammiopainevalukonetta, mutta myös neljää muuta konetta tarpeensa mukaan. Koneet ovat keskenään erilaisia pääasiassa kiinnipitovoimaltaan, mutta myös muiltakin ominaisuuksiltaan. Tasalaatuisten valujen valmistaminen usealla eri koneella on itsessään haastavaa. Sopivat prosessiparametrit on yleensä etsittävä konekohtaisesti. Valimo käyttää koneesta riippuen 220...380 baarin tiivistyspainetta. Yleisimmin käytettyjen koneiden tiivistyspaine on 260 ± 20 baaria. Valusyklin kesto on valurunkomallista riippuen 60...90 sekuntia.

Valimo ei käytä valuprosessissa tyhjöjärjestelmää eikä jäähdytettyä kaasunpoistojärjestelmää (eng. chill vent). Tyhjöpainevalussa valujärjestelmään imetään tyhjö, jolloin ilman sekoittuminen sulaan ja oksidin muodostuminen vähenevät hyvin merkittävästi. Siten myös kaasun- ja kutistumahuokoisuus vähenevät merkittävästi. Tyhjövalumenetelmän etuna onkin selvästi parempi painetiiveys. Laitteiston hankintamenon lisäksi tyhjömenetelmä kasvattaa usein kunnossapitokustannuksia. [2.]

Jäähdytetyn kaasunpoistojärjestelmän käyttö tehostaa ilman poistumista muotista. Järjestelmä vähentää siten valujärjestelmässä olevan ilman aiheuttamaa, valujärjestelmän täyttymistä vastustavaa painetta. Tällöin sulasuihku pysyy ehyempänä, sulaan sekoittuu vähemmän ilmaa ja muotti täytyy oikein. Samat edut saavutettaisiin myös tyhjövalumenetelmällä ja jäähdytettyä kaasunpoistoa käytetään myös yhdessä tyhjömenetelmän kanssa.

Muotin jäähdytys on toteutettu kiertovesimenetelmällä. Veden lämpötila ja virtaama pyritään pitämään valituissa raja-arvoissa. Muotin jäähdytysveden lämpötila saattaa kuitenkin muuttua esimerkiksi tehdashallin sisälämpötilan muuttuessa. Muutokset veden lämpötilassa ja virtaamassa aiheuttavat vaihtelua muotin lämpötilassa.

Suuri jähmettymisnopeus ja jähmettymisen jälkeinen jäähtymisnopeus tuottavat hyvän mikrorakenteen ja vähentävät valun sisäisten virheiden kehittymistä. Tiivistysvaiheen kesto sekä muotin jäähdytys erityisesti kriittisillä alueilla tulisivat olla riittävät, jotta

materiaali saavuttaisi tiivistysvaiheen aikana lähes lopullisen lujuutensa. Lujuuden tulisi kasvaa tasolle, jolla huokosten paineistunut kaasu ei kykene avaamaan kuplakanavia tai laajentamaan huokosia tiivistyspaineen poistuessa. Tiivistyspaineen kasvattaminen voi johtaa purseiden lisääntymiseen sekä kuplien korkeampaan paineeseen ja siten potenti- aaliin avata kuplakanavat uudelleen. Niinpä muotin jäähtytyksen lisäksi tulisikin hu- olehtia riittävästä tiivistysvaiheen kestosta. [2.]

Valun jäähtyttyä valukkeet leikataan kyseistä valurunkomallia varten suunnitellulla ja valmistetulla leikkaintyökalulla. Valurungoille tehdään jälkikäsitteilynä purseiden poisto rummuttamalla tai kuulapuhaltamalla ennen runkojen koneistamista. Valurunkoja ei lämpökäsitellä.

5.5 Korjaavia jälkikäsitteilymenetelmiä

Valuille voidaan tehdä vuototiiveyttä parantavia jälkikäsitteilyjä sekä ennen mahdollisia työstövaiheita että niiden jälkeen. Ehkä parhaiten tunnettu korjaava jälkikäsitteilymenetelmä on tiivistäminen (eng. impregnation), jossa valun pintaan aukeavat ontelot pyri- tään täyttämään polymerisoimalla onteloihin turpoavaa materiaalia. Jotkin uudemmat menetelmät pyrkivät sulkemaan valun pintaan avautuvia virheitä mekaanisesti muo- vaamalla. Tällainen menetelmä on esimerkiksi kitkamuokkauskauskäsitely, jossa kriittiset pinnat käsitellään koneistusvaiheiden jälkeen tai niiden sijasta ilman varsinaista leik- kaavaa työstöä.

Korjaavia jälkikäsitteilymenetelmiä voidaan pitää Lean-ajattelutavan vastaisena ylipro- sessorointina, sillä ne pyrkivät ensisijaisesti hoitamaan aiempien valmistusvaiheiden aihe- uttamia ongelmia. Vaadittu laatu tulos tulisi sen sijaan saavuttaa tunnistamalla juurisyyt ja kehittämällä niihin perustuva ratkaisu, joka poistaa ylimääräiset jälkikäsitteilykustan- nukset.

5.5.1 Tiivistäminen

Tiivistäminen on menetelmä, jossa valut asetetaan kammioon, johon imetään tyhjä. Va- lut lasketaan kammiossa tiivistysnesteeseen, jolloin neste täyttää valujen pintaan avau- tuvat huokokset ja muut epäjatkuvuuskohdat. Ylimääräinen tiivistysneste poistetaan ja tiivistysaine polymerisoidaan korotetussa lämpötilassa. Tiivistysaineena käytetään po- lymerisoituessaan turpoavaa materiaalia, kuten metakrylaattia. Tiivistysaine sulkee siten tiiviisti jopa kaikki valussa esiintyvät pintaan aukeavat virheet. On olemassa myös tii- vistysaineita, jotka eivät vaadi laitteistoa, vaan toimivat yksinkertaisesti kastamalla va- lut aineeseen ja seisottamalla niitä määrätty aika.

Tiivistäminen voidaan suorittaa ennen mahdollisia työstöprosesseja. Usein tiivistäminen on kuitenkin vaikuttavinta lopulliseen muotoonsa työstetyille kappaleelle, sillä työstö- vaiheet voivat avata uusia potentiaalisia vuotokanavia koneistuspinnoille. Jos valun

vuototiiveyden kannalta kriittiset pinnat on tunnistettu, voidaan nämä pinnat koneistaa ennen tiivistämistä ja muita työstövaiheita. Näin voidaan joissain tapauksissa säästää esimerkiksi kuljetuskustannuksissa. Kohdeyritys on käyttänyt alihankintatiivistämistä joidenkin ovensuljinmallien valutilaisille rungoille vakioitoimenpiteenä.

5.5.2 Vuotokanavien mekaaninen sulkeminen

Valun pintaan avautuvia virheitä ja potentiaalisia vuotokanavia voidaan sulkea myös valun pintaa muokkaamalla. Tämä voi tapahtua iskemällä, mutta yleisemmin kitkaan perustuvilla menetelmillä, jotka siirtävät tai kierrättävät pintamateriaalia. Yksi tällainen menetelmä on kitkamuokkauksittely (eng. friction stir process). Menetelmässä valun pintaa työstetään lastuamattomalla työkalulla. Valun pinta myötää ja ainetta siirtyy katkaisten ja täyttäen mahdolliset vuotokanavat.

Tunnistetut vuotokanavat voidaan sulkea myös lyömällä. Vuotaminen ei kuitenkaan välttämättä ole tapahtunut kaikkien potentiaalisten vuotokanavien kautta. Vuotokanavia voi paljastua lisää esimerkiksi painenvaihtelun seurauksena. Vuotokanavien sulkeminen lyömällä ei anna varmuutta siitä, että kaikki potentiaaliset vuotokanavat ovat kiinni, eikä menetelmä muun muassa tästä syystä ole kovin kiinnostava.

6. VALURUNGON LAADUNVALVONTA

Runko on ovensulkimen tärkein komponentti. Rungolta vaaditaan tiiveyden lisäksi mitatarkkuutta, lujuutta sekä kulumisen ja korroosion kestoja. Valurungon laatua valvotaan useiden valmistusvaiheiden yhteydessä. Valurungon valmistusvaiheet ovat karkeasti itse valuprosessi, valukkeiden ja purseiden poisto sekä koneistus. Seuraavat ovensulkimen valmistusvaiheet ovat järjestyksessä kokoonpano, öljyntäyttö, pesu, maalaus ja pakkaus. Vaikka valurungon laadunvalvonnan tarve on selviö, laadunvalvonnan toteuttaminen tehokkaasti on haastavaa. Haasteita aiheuttavat erityisesti ongelmien ajoittaisuus ja ainetta rikkomattomien menetelmien sovittaminen osaksi tuotantoprosessia.

Valurunkojen toimittaja pyrkii täyttämään ASTM E505 -standardin vakavuusasteen 1 vaatimukset valujen huokoisuudelle. Tarkastus suoritetaan röntgentarkastuksena tietokonekerroskuvausmenetelmää hyödyntäen. Menetelmällä voidaan havaita tarkasti huokoisuusmäärä, huokosten koko ja sijoittuminen valussa. Menetelmä ei kuitenkaan anna suoraa vastausta valurungon vuototiiveydestä saati valuerän laadusta kokonaisuutena. Muita valimon säännöllisesti tekemiä tarkastuksia ovat raaka-aineen kemiallinen analyysi ja valujen visuaalinen tarkastus.

Vastaanotetuille valurungoille tehdään kohdeyrityksessä silmämääräinen tarkastus pinnanlaadun toteutukseksi ja muotovirheiden, kuten purseiden löytämiseksi [17]. Ennen kunkin kuormalavan hyväksymistä koneistukseen, lavalta otetaan kaksi valurunkoa, jotka merkitään ja koneistetaan. Koneistuksen jälkeen valurungoille tehdään uusi visuaalinen tarkastus. Lisäksi rungot tulkataan ja mitataan. Mikäli tarkastusvaiheissa ei ilmene ongelmia, kyseinen kuormalava merkitään hyväksytyksi ja rungot voidaan koneistaa. Tarkastajan tulee ilmoittaa kaikesta poikkeavasta esimiehelleen. Seuraava varsinainen laadunvalvonnallinen toimenpide on kokoonpantujen, öljyllä täytettyjen ja pestyjen ovensuljinten tarkastaminen vuotojen varalta. [18.]

6.1 Painetiiveyden laadunvalvonta

Valukomponenttien painetiiveyttä voidaan testata useilla menetelmillä. Monet menetelmät ovat kuitenkin sopimattomia suuren tuotantomäärän komponenteille. Osaksi tästä johtuen on harvinaista, että jotain komponenttia testataan sataprosenttisesti. Heikko painetiiveys ei välttämättä esiinny tasaisena osuutena valukomponenteista, vaan ongelmat voivat olla ajoittaisia ja vaikeasti havaittavia.

Kohdeyrityksessä on kokeiltu valurunkojen punnitsemista valutilaisina ennen koneistusta. Punnitseminen on vuototiiveyden laadunvalvontamenetelmänä kyseenalainen, koska

tiivyeysongelmia ei tuota niinkään huokoisuuden määrä, vaan sen muoto ja sijoittuminen. Lisäksi huokoisuusmäärästä johtuvat erot valurunkojen massoissa häviävät herkästi massan normaaliin vaihteluun.

Koneistetun valurungon tiiveyden toteamiseksi on kohdeyrityksessä kokeiltu muun muassa silmämääräisiä tarkastuksia, kokoonpantujen ja öljyllä täytettyjen ovensuljinten uunittamista sekä ovensulkimen sisäisen paineen nostamista mekaanisesti vuotojen näkyvyyden parantamiseksi. On olennaista, että testaaminen suoritetaan koneistetulla valurungolla, sillä koneistus voi avata vuotokanavia valutilaisena tiiviiseen runkoon.

Laadunvalvonta painottuu painetiiveyden osalta pestyn ja maalatun ovensulkimen tarkastuksiin. Pesu suoritetaan pesukoneella 43 °C lämpötilassa. Ovensulkimen lämpötila nousee pesun seurauksena noin 40 °C lämpötilaan, joka nostaa vastaavasti öljyn ja jään-
nösilman painetta rungon sisällä. Paineen nousun seurauksena valurungon läpi tai tiivisyypinnoilta tihkuva öljy on havaittavissa silmämääräisellä tarkastelulla. Kaikki vuotavat rungot todetaan huonoiksi ja romutetaan. Pesun jälkeen ovensulkimet maalataan, jonka jälkeen ne tarkastetaan viimeisen kerran ennen pakkausta. Vaikka maalaus nostaa uudelleen ovensulkimen lämpötilaa ja sisäistä painetta, maalaaminen voi toisaalta myös hidastaa vuotojen ilmentymistä, sillä maalipinta voi tukkia vuotokanavan hetkellisesti.

Koneistuksen paljastaman huokoisuuden tunnistamiseen voidaan käyttää muun muassa pneumaattista tunnistusta, koneoppivia kuvausjärjestelmiä, lasermittausta [19]. Huokokset eivät kuitenkaan aina muodosta vuotokanavaa valukomponentin sulkemaan tilaan. Yksi potentiaalinen tuotantolinjaan integroitavissa oleva vuototiiveyden laadunvalvontamenetelmistä on paineilmatestaus. Testattavan komponentin sulkema tilavuus paineistetaan, ilman johtaminen tilavuuteen keskeytetään ja painehäviötä seurataan paineanturilla. [2.]

Kaksi valurungon painetiiveyden laadunvalvontaan mahdollisesti soveltuvaa paineilmamenetelmää perustuvat mitattavan komponentin painehäviöön ja paine-eroon mitattavan komponentin ja verrokkikappaleen välillä. Ensimmäinen menetelmä mittaa painetulkkin painehäviötä. Menetelmä on helposti sovellettavissa tuotantolinjaan erityisesti alle kahden baarin testipaineilla ja alle 100 millilitran testattavilla tilavuuksilla. Toinen menetelmä perustuu paine-eron mittaamiseen testattavan komponentin ja tiiviiksi tunnetun kappaleen välillä. Paine-eromenetelmä on aiempaa menetelmää nopeampi ja tarkempi. Menetelmä vähentää lämpötilaeroista johtuvaa virhettä ja soveltuu lisäksi paremmin korkeammille testauspaineille. Paineilmamenetelmien etuja kilpaileviin menetelmiin nähden ovat muun muassa nopeus, automatisoitavuus ja se, että komponentin kunto ja tila säilyvät muuttumattomina. [2.]

6.2 Laadunvalvonnan kehittäminen

Ovensuljinten vuototiiveyden laadunvalvonta on painottunut kohdeyrityksessä tuotantoprosessin loppupuolelle, kokoonpantujen ja maalattujen ovensuljinten visuaaliseen tarkastukseen. Tällöin löydetyn virheellisen sulkimen aiheuttama sisäinen laatukustannus on kuitenkin lähes huipussaan. Virheellisten ovensuljinten komponentteja ei pääsääntöisesti käytetä uusiin ovensulkimiin pääasiassa, koska ovensuljinten purkaminen komponentteja vaurioittamatta on kallista.

Virheellisten valurunkojen löytäminen aiemmin tuotantoprosessissa, rungon koneistuksen jälkeen, on haastavaa ilman investointeja tuotantoon integroitavaan testausmenetelmään. Vuotokanavat ovat harvoin silminnähtäviä, joten koneistuksen jälkeisen visuaalisen tarkastuksen vaikuttavuus olisi todennäköisesti pieni. Tehokas, tuotantoon integroitavissa oleva menetelmä voisi olla paineilmatestaus. Laadunvalvontaa voidaan kuitenkin kehittää ilman investointeja esimerkiksi tarkistamalla valurunkoa koskevat vaatimukset ja vastaanottotarkastuksen periaatteet huomioiden heikon painetiiveyden syyt ja merkitys.

Laadunvalvontaa on mahdollista kehittää pienin kustannuksin myös pesuvaiheen osalta. Pesun lämpötilan kasvattaminen 43 asteesta 45 celsiusasteeseen voi kokemusten perusteella johtaa joidenkin ovensuljinrunkojen halkeamiseen sisäisen paineen vuoksi. Lämpötilan kasvattaminen johtaisi kuitenkin myös viallisten runkojen vuotojen nopeampaan ja näkyvämpään ilmenemiseen kasvaneen paineen vuoksi. Näin osa viallisista tuotteista voitaisiin tunnistaa ennen maalausta. Muutos voisi vähentää hieman myös asiakkaille päätyvien viallisten ovensulkimien määrää, jolloin osa ulkoisista laatukustannuksista siirtyisi sisäisiksi.

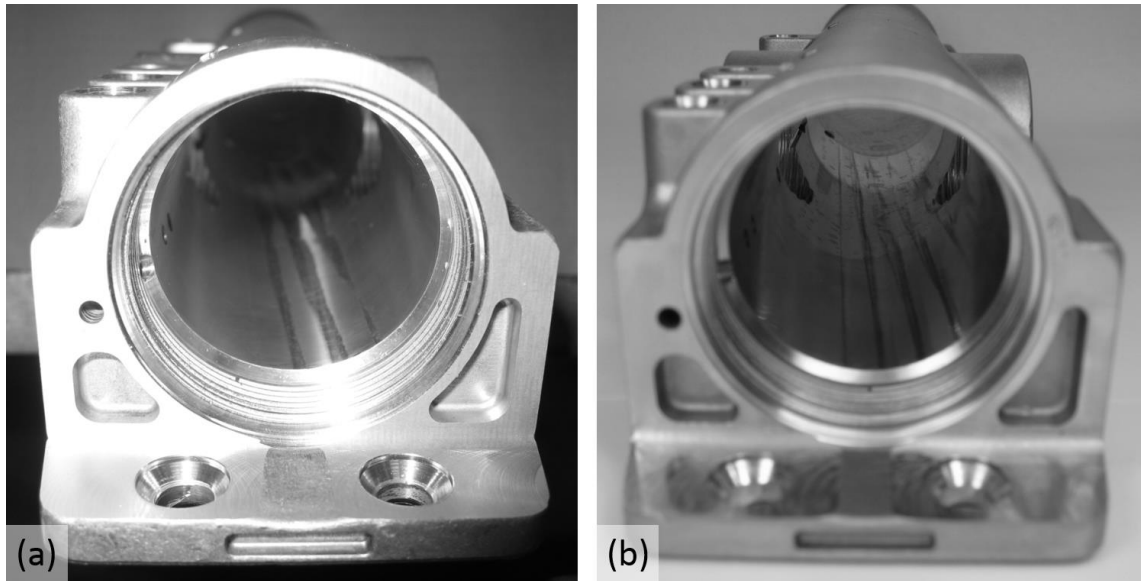
7. MATERIAALIN KONEISTETTAVUUS

Kestomuottimenetelmillä valetut alumiinivalut ovat keskimäärin hyvin koneistettavia hienojakoisen mikrorakenteensa ansiosta. Alumiiniseosvaluissa, kuten muissakin valuissa, esiintyy kuitenkin useita virhetyppejä, jotka voivat aiheuttaa ongelmia työstöprosessissa. Tällaisia virheitä ovat muun muassa muotovirheet ja perusainetta kovemmat rakenteet. Kohdeyrityksen kokemusten mukaan AlSi14Cu4 on lastuttavuudeltaan hyvä seos ja materiaaliin saadaan koneistamalla hyvä pinnanlaatu. Valurunkojen koneistuksessa on kuitenkin ilmennyt satunnaisesti toistuvia ongelmia, jotka ovat aiheutuneet terien huomattavasti tavallista nopeammasta kulumisesta tai harvinaisemmin materiaalin tahmaavuudesta. Tämän työn toisena tavoitteena oli selvittää valurunkojen mikrorakenteellisia koneistettavuutta heikentäviä virheitä.

7.1 Valurungon koneistuksessa ilmenneet ongelmat

Ovensuljinrunkojen koneistuksessa on ilmennyt ajoittaista terien huomattavasti tavallista nopeampaa kulumista, joka johtaa usein terien katkeamisiin. Valurungon sisään jummittuva ja katkeava terä voi johtaa terien rikkoutumisiin risteävien koneistusvaiheiden aikana. Valurungon työstömenetelminä käytetään pääasiassa poraamista, rouhinta- ja hienoavartamista, plaanausta ja kierteistystä. Terämateriaaleina käytetään sekä karbidittä timanttiteriä (PCD).

Terien kulumisen lisäksi koneistuksessa on ilmennyt värähtelyä, jonka seurauksena avarrettujen reikien muoto on kärsinyt. Koneistusvärähtelyä on karkeasti kahdenlaista: korkeataajuuksista kirskumista (eng. chatter) ja matalataajuuksista värähtelyä (eng. low-frequency vibration). Koneistuksessa esiintyvä värähtely on tyypillisesti itseherätteistä. Esimerkiksi materiaalin heterogeeninen rakenne (vaihteleva kovuus) voi aiheuttaa lastuamisvoiman vaihtelua, joka puolestaan aiheuttaa terän tai koneistuspuomin vääntymistä tai taipumista. Syntyvä värähtely lisää edelleen lastuamisvoiman vaihtelua. Lastuamisvoiman vaihtelu nopeuttaa terän kulumista ja voi johtaa sen rikkoutumiseen.



Kuva 36. Rouhinta-avarruksessa puomin värähtelyn seurauksena syntyneitä uria.

Kuva 36 ilmentää rouhinta-avarruksessa puomin värähtelyn seurauksena syntyneitä uria kahden valurungon lieriöpinoilla. Urat näyttävät esiintyvän molemmissa rungoissa (a) ja (b) suurin piirtein samalla jakovälillä mäntätilan lieriöpinnan kehällä. Urat ovat muodostuneet hienoavarruksen työvara-alueeksi syvemmiksi. Voidaan olettaa, että uria on syntynyt rouhinta-avarruksessa koko kehälle, mutta suurin osa on pysynyt hienoavarruksen työvara-alueella.

Reiän kehälle tasaisesti jakautuneita uria voi selittää avarruspuomin matalataajuinen värähtely. Urien määrään vaikuttaa pääasiassa työkalun leikkuuterien määrä. Yksi matalataajuisista värähtelyä aiheuttava tekijä on avarruspuomin riittämätön jäykkyys. Yksinkertaistaen voidaan ajatella, että puomin tulisi olla mahdollisimman paksu ja siten mahdollisimman jäykkä. Puomeissa, joiden halkaisija on erityisen pieni pituuteen nähden, voidaan hyödyntää vaimennusta. Vaimennetut puomit perustuvat värähtelyä vähentävään puomin sisäiseen vaimennusmekanismiin.

Värähtelyä voidaan ehkäistä myös sopivilla teräpaloilla. Oikeanlainen teräpalkan geometria ja teräsärmän suuntaus pitävät lastuamisvoiman tasaisempina. Teräpalat voidaan sijoitella puomiin porrastetusti. Reiän asteittainen rouhinta voi vähentää värähtelyä.

Myös valurungon muotovirheet voivat aiheuttaa värähtelyä ja häiriöitä työstövaiheissa. Valumuotin aikainen avaaminen voi johtaa jäännösjännitysten purkautumiseen valun plastisena muodonmuutoksena. Valu voi vääntyä ja työstön kannalta olennaisissa mitoissa voi tapahtua muutoksia. Valun taipuminen tai vääntymisen voi johtaa puomin värähtelyyn rouhinta-avarruksessa.

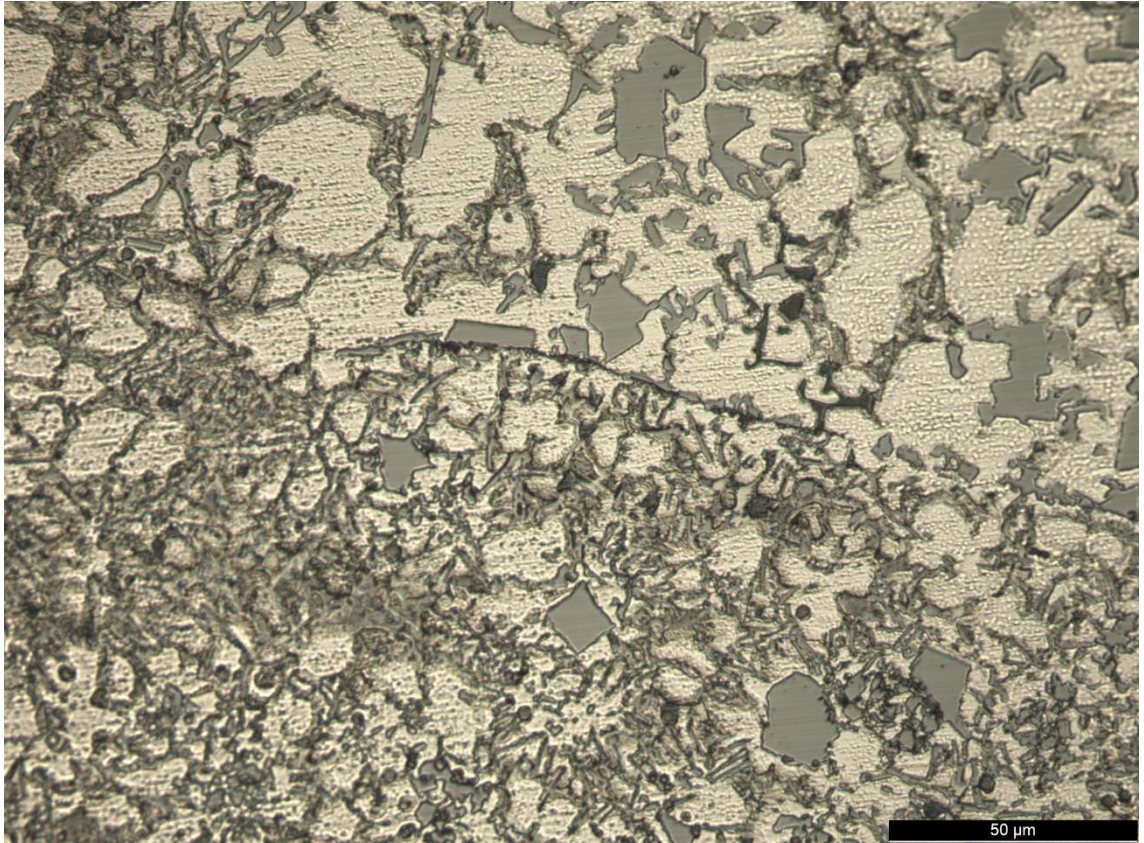
7.2 Mikrorakenteen vaikutukset koneistettavuuteen

Valualumiiniseokset ovat keskimäärin hyvin koneistettavia. Kestomuottimenetelmillä valetut valukappaleet ovat mikrorakenteeltaan hienojakoisia, joka helpottaa niiden koneistamista. Hienojakoinen mikrorakenne on seurausta valun nopeasta jähmettymisestä ja jäähtymisestä ja edistää lastun muodostumista ja katkeamista lastuavassa työstössä. Piiseostus edistää edelleen valuseosten koneistettavuutta, mutta lisää kovuutensa vuoksi teräpalojen kulumista. [2.]

Valumenetelmät altistavat valumateriaalin mikrorakenteellisille virheille, kuten sulaan sekoittuneille kiinteille sulkeumille, ei-toivotuille metallien välisille yhdisteille ja huokoisuudelle. Perusainetta kovemmat tai lujemmat faasit voivat häiritä lastunmuodostusta tai kuluttaa teriä tavallista nopeammin. Alumiiniseosvalujen tapauksessa tällaisia virheitä ovat erityisesti alumiinioksidisulkeumat. Kaksoiskalvot ja muut vastaavat oksidikalvosulkeumat häiritsevät työstöä paitsi kovuutensa ja lujuutensa usein myös laajuutensa vuoksi. Kaksoiskalvojen lisäksi myös piikiteet ja metallien väliset yhdisteet voivat aiheuttaa vaihtelua lastuamisvoimassa ja toimia siten herätteinä työkalun värähtelylle.

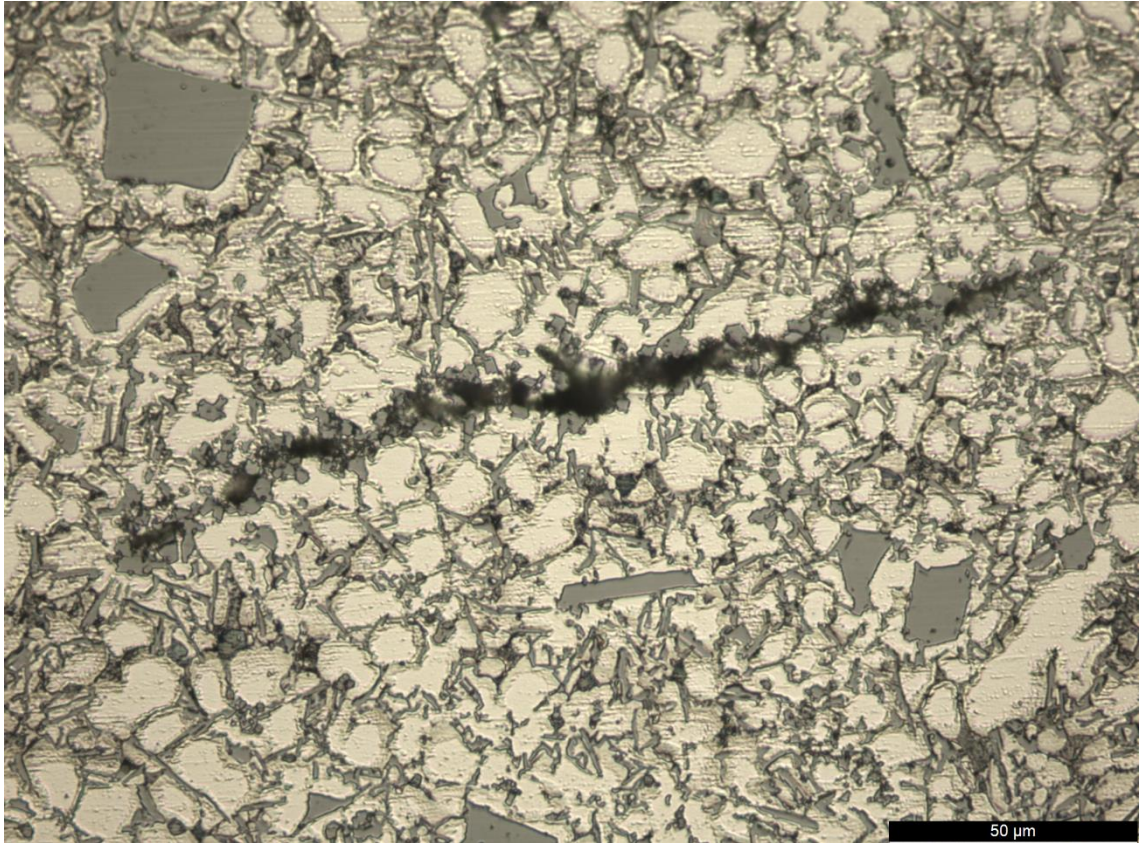
Terien tavallista nopeamman kulumisen on oletettu johtuvan keskimääräistä suuremmista piikiteistä ja kiteiden epätasaisesta jakautumisesta valussa. Piikiteiden koko onkin rajoitettu 50 mikrometriin. On toivottavaa, että primaaripiikiteet ovat riittävän pieniä ja levittyneet tasaisesti kaikkialle valukappaleeseen. Tällöin kulumisen kesto, muut mekaaniset ominaisuudet ja koneistettavuus ovat optimaaliset koko valussa. Valimo lisää sulaan fosforia sisältävää esiseosta primaaripiikiteiden koon hienontamiseksi. Käsittely kasvattaa kiteytymisydinten määrää sulassa johtaen piikiteiden pienempään kokoon. Esiseoksen lisäys suoritetaan yleensä kaasuhuuhtelun tai muun sulankäsittelyvaiheen yhteydessä. [4.]

Useat metallien väliset yhdisteet voivat aiheuttaa ylimääräistä terien kulumista ja koneistuspinnan laadun heikkenemistä. Metallien väliset yhdisteet syntyvät, kun seosaineet eivät liukene täysin keskenään muodostaen jähmeää liuosta, ja kun seosaineiden välinen potentiaaliero on riittävän suuri. Yhdisteiden määrään vaikuttaa siten muun muassa seoksen määrittelystä poikkeava koostumus. Metallien väliset yhdisteet voivat olla ioniyhdisteitä, jolloin ne ovat stoikiometrisia yhdisteitä, tai osittain ionisia yhdisteitä, jolloin sidokset ovat osittain metallisia ja yhdisteitä kutsutaan epästoikiometrisiksi. Metallien väliset yhdisteet sisältävät määritelmänsä mukaan vähintään kahta eri metallia sekä mahdollisesti yhtä tai useampaa epämetallia. Metallien väliset yhdisteet ovat pääasiassa hyvin kovia ja hauraita. Alumiiniseosvaluissa esiintyvät valun ominaisuuksia heikentävät metallien väliset yhdisteet sisältävät tyypillisesti rautaa. Rautaa sekoitetaan painevaluseoksiin vähintään 0,7 %, jotta alumiiniseosvalu ei tarttuisi muottiin ja parantaisi valun kuumarepeilyalttiutta. [4, 20.]



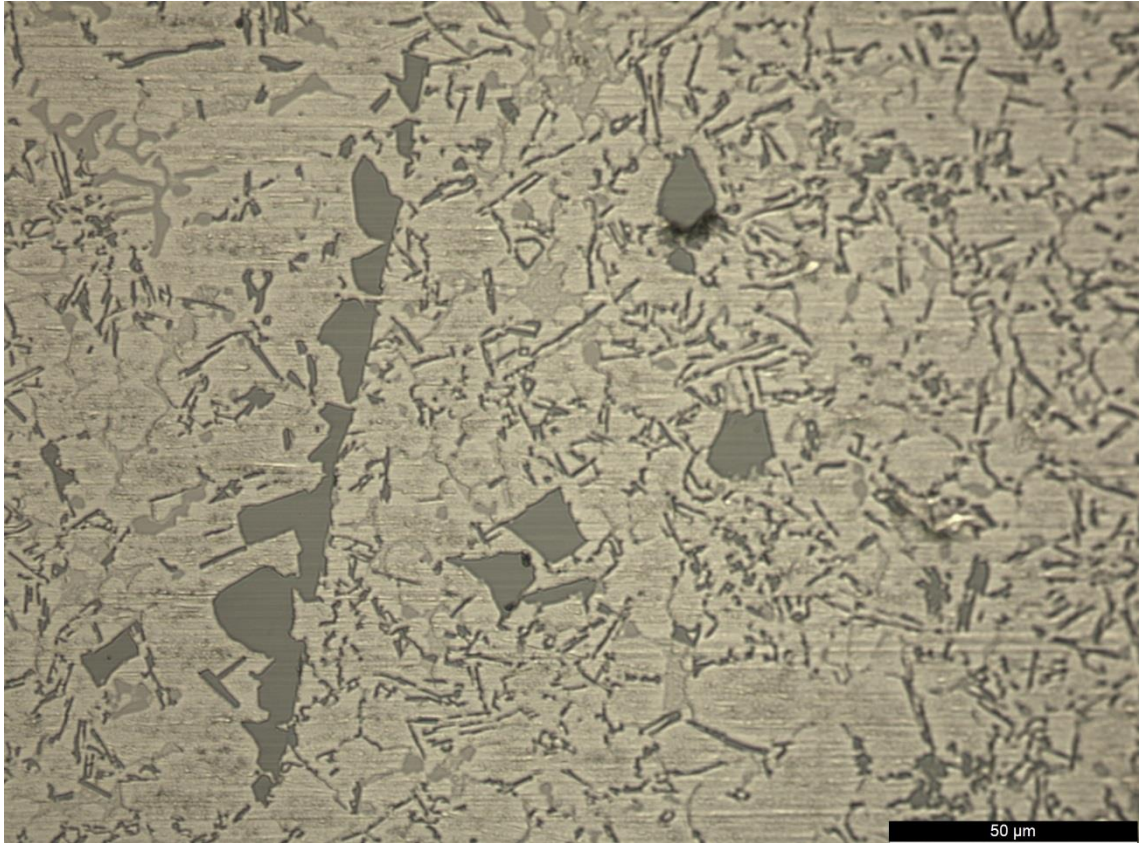
Kuva 37. *Kaksoisoksidikalvo ja sen pintaan kasvaneita primaaripiikiteitä.*

Kuvan 37 keskellä on oletettavasti kaksoiskalvo, joka on sekoittunut sulaan tai syntynyt sularintamien kohdatessa. Kaksoisoksidikalvojen ulkopinta toimii suotuisana ydintymispaikkana piille muun muassa vähäisemmän kiteen ydintymisen aiheuttaman pintaenergian kasvun vuoksi. Kuvassa alavasemmalla voidaan nähdä myös pinnaltaan muusta rakenteesta poikkeava alue joka voi olla rakenteensa perusteella amorfista alumiinioksidia.



Kuva 38. Kaksoiskalvo tai mikrohalkeama.

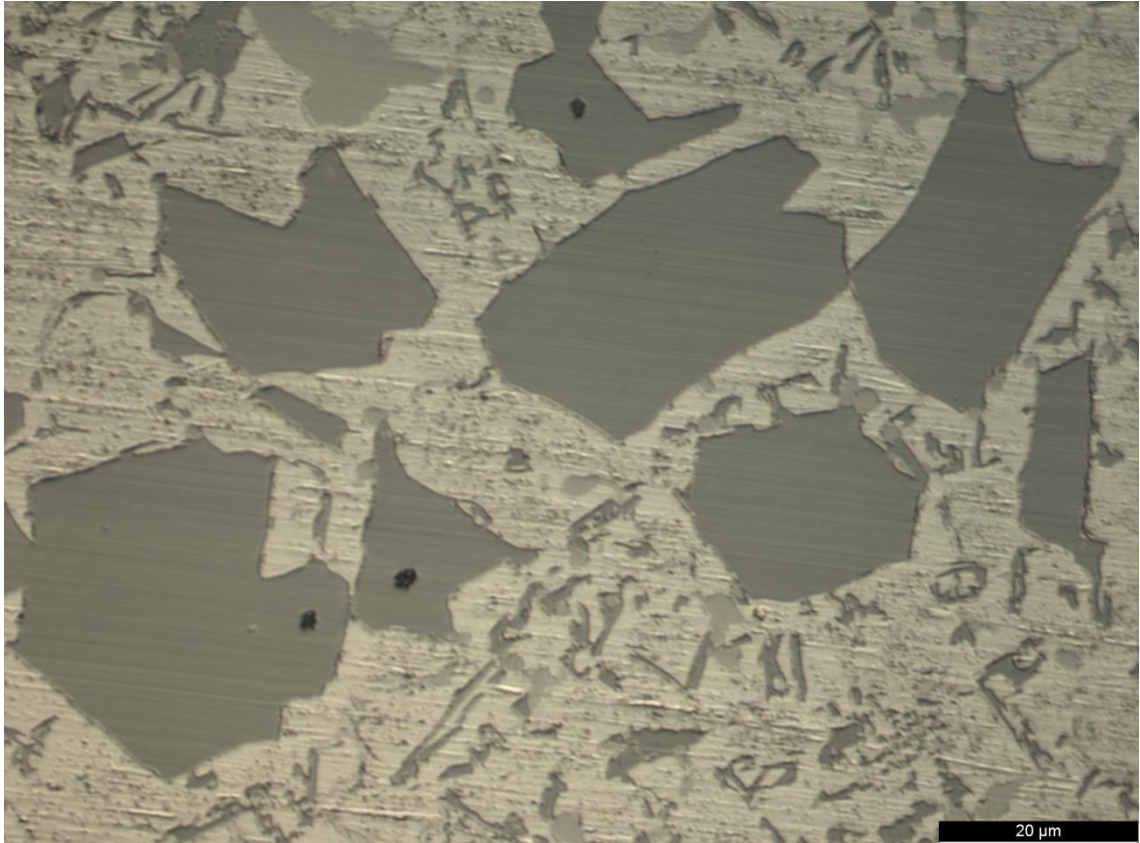
Kuvassa 38 voidaan nähdä halkeamaa muistuttava epäjatkuvuuskohta. Halkeama voi olla raottunut kaksoiskalvo tai mikrohalkeama. Halkeaman molemmilla puolilla on runsaasti primaaripiikiteitä. Halkeaman ympäristössä esiintyy lisäksi selkeästi muuta mikrorakennetta enemmän tummaa faasia, joka voi olla metallien välistä yhdistettä.



Kuva 39. Primaaripiikiteitä jonomuodostelmassa.

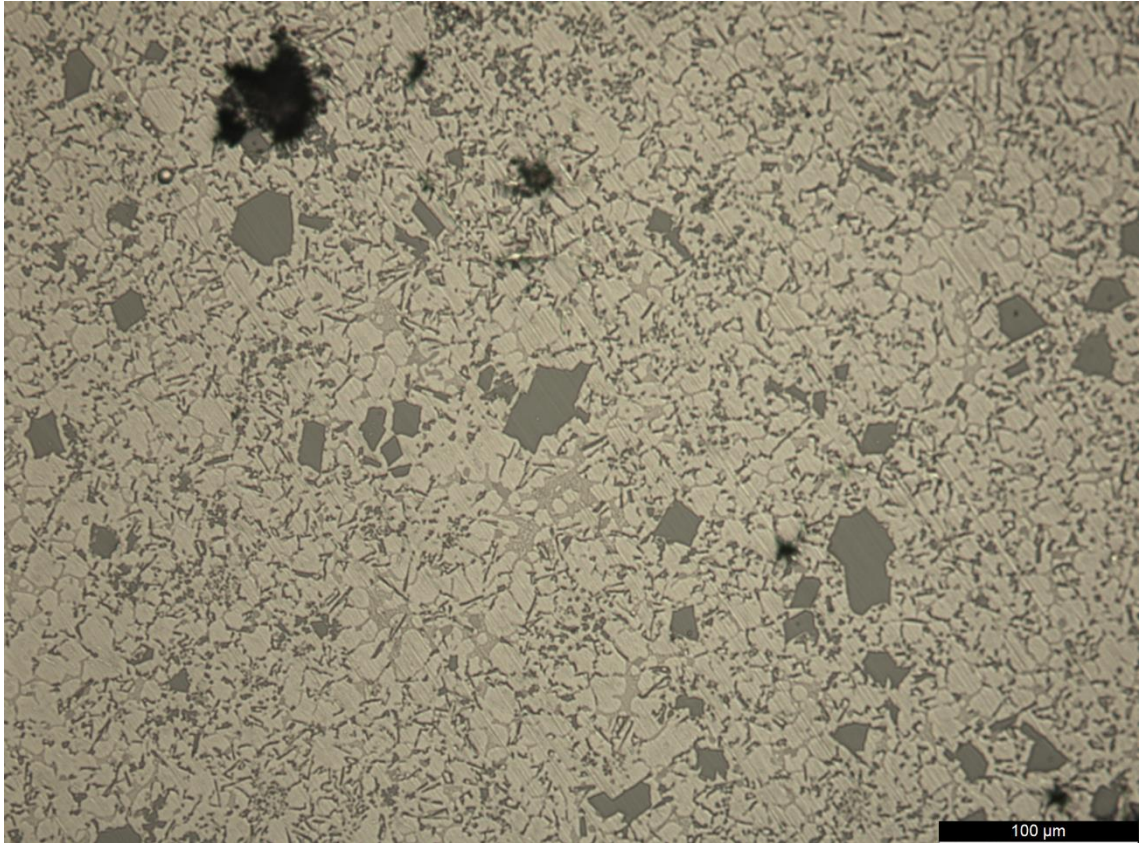
Kuvan 39 piikidejono näyttää muodostuneen suoraa pintaa vasten. Piikidejono voi olla muodostunut alumiinioksidikalvon pinnalle. Primaaripiikiteet ydintyvät pääosin ennen valutapahtumaa, joten muodostelmankin voi olettaa syntyneen ennen sitä. Tämä tukee väitettä piikiteiden ydintymisestä oksidikalvon pinnalle.

Kaksoiskalvojen ulkopinnalle ydintyvät ja vieriviereen kasvavat piikiteet muodostavat yhdessä kaksoiskalvon kanssa mattomaisen virheen. Tällainen virhe voisi kyetä aiheuttamaan merkittävän lastuamisvoiman ja siten teräpalan kokeman jännityksen kasvun. Piikiteiden ydintymistä kaksoiskalvon pintaan voi edistää piikiteiden koon hienontamiseksi lisätty fosfori. AIP-kiteet ydintyvät kaksoiskalvon ulkopinnalle ja primaaripiikiteet edelleen AIP-kiteiden ympärille. [4.]



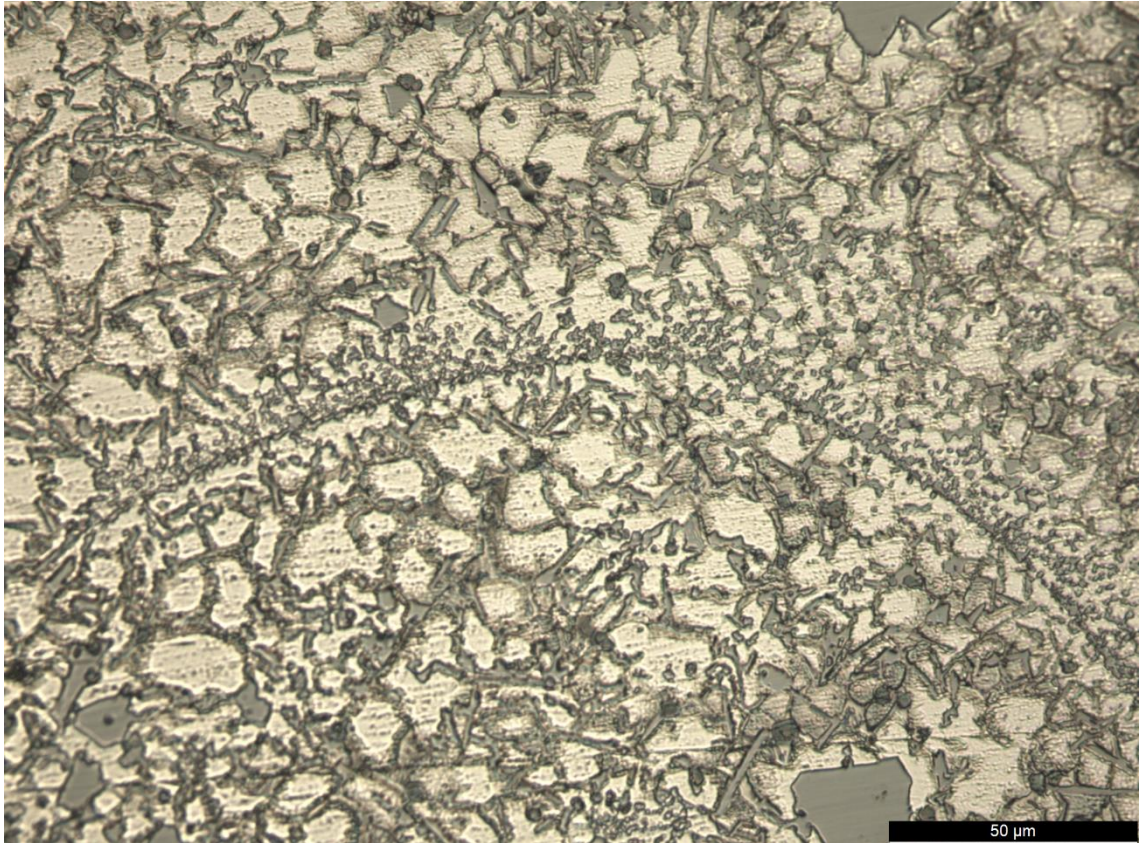
Kuva 40. Suuria primaaripiikiteitä.

Kuvassa 40 on ryhmä suuria piikiteitä. Piikiteiden sisällä voidaan nähdä tummaa faasia pieninä esiintyminä. Faasi voi olla alumiinifosfidia, jonka pinnalle piikiteet ovat ydintyneet. Suurimmat piikiteet ovat noin 40 μm pitkiä. Piikiteitä ympäröi eutektinen mikro-rakenne.



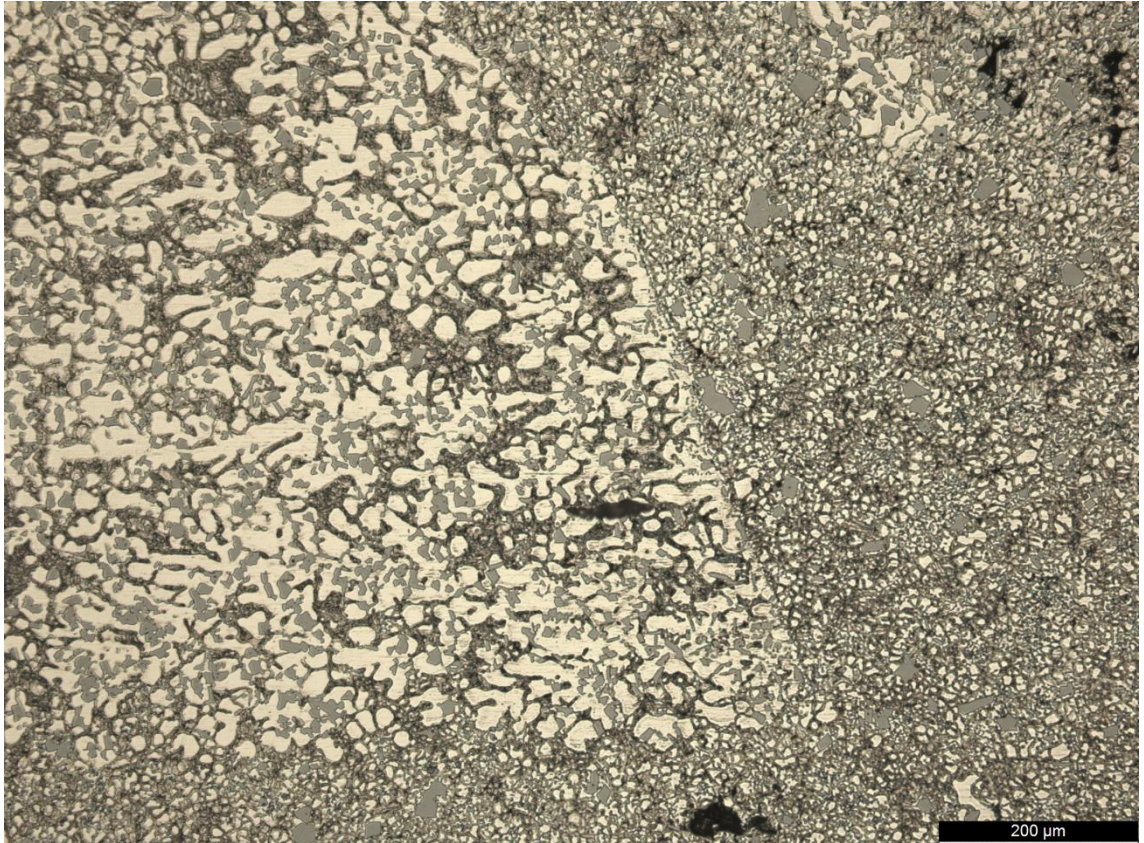
Kuva 41. *Kaksi 50 μm pituista primaaripiikidettä.*

Kuvassa 41 voidaan nähdä kolme suurta piikidettä, joista kaksi suurinta ovat hieman yli 50 μm pitkiä. Kuvan keskellä voidaan nähdä myös harmaata α -alumiinia tummempaa faasia. Faasi on todennäköisesti kuparirikasta metallien välistä yhdistettä. Kuvassa näkyvät voivat olla kutistumahuokosia tai kuplakanavia.



Kuva 42. Piidendriitti.

Pii voi esiintyä alumiiniseosvaluissa myös dendriittisessä muodossa. Kuvassa 42 näkyvä piidendriitti on noin 250 μm pitkä. Dendriittiä ympäröi hienojakoinen mikrorakenne, joka kertoo alueen nopeasta jähmettymisestä.



Kuva 43. Selvärajäinen muutos mikrorakenteessa.

Kuvassa 43 on mikrorakenteeltaan selvästi ympäröivästä rakenteesta erottua alue, joka on voinut syntyä esimerkiksi kaksoiskalvon häiritessä lämmön johtumista jähmettyvässä seoksessa tai muotissa olleen esimerkiksi edellisestä valutapahtumasta jääneen kiinteän metallipartikkelin sekoittuessa sulaan. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa rekristallaatio ei voisi selittää alueen dendriittimäistä rakennetta, vaan partikkelin olisi täytynyt olla rakenteeltaan valmiiksi dendriittinen. [4.]

8. YHTEENVETO

Diplomityön tarkoituksena oli tutkia alumiiniseoksesta painevalettujen ovensuljinrunkojen painetiiveyttä ja koneistettavuutta. Valurunkojen painetiiveydessä oli todettu epä-säännöllistä vaihtelua, joka ilmeni öljyvuotoina ovensuljinten ulkopinnoilla. Lämpötilan nousun aiheuttama ovensulkimen sisäisen paineen nousu johti öljyn puristumiseen valurungon läpi. Läpivuotojen oletettiin tapahtuvan valussa esiintyvien sisäisten epäjatkuvuuskohtien kautta. Diplomityön tavoitteena oli tunnistaa painetiiveyttä ja koneistettavuutta heikentäviä valun sisäisiä virhetyyppejä ja löytää syitä virheiden esiintymiselle.

Työssä tutustuttiin ovensulkimen rakenteeseen ja toimintaan sekä valimon ja kohdeyrityksen tuotantoprosesseihin. Työn keskeisenä tavoitteena oli kartoittaa potentiaalisia keinoja ja menetelmiä heikon painetiiveyden havaitsemiseksi ja siitä aiheutuvien laatu-kustannusten vähentämiseksi. Tavoitetta lähestyttiin valunsuunnittelun, valuprosessin, jälkikäsitteilyjen, ovensulkimen tuotantoprosessin ja laadunvalvonnan kehittämisen näkökulmista.

Vuotaviksi todetuista valurungoista valmistettiin näytteitä murtopinta- ja metallografista tarkastelua varten. Murtopintatarkastelulla pyrittiin löytämään vuotokanavana toimineita virheitä. Metallografinen tarkastelu suoritettiin vuotokanavien poikkileikkausten ja rakenteellisten virheiden tunnistamiseksi. Valurungon geometriaa muutettiin löydösten perusteella tiiveyden parantamiseksi ja uutta geometriaa edustavien ovensuljinten painetiiveyttä testattiin nostamalla näiden sisäistä painetta uunittamalla.

Murtopinta- ja metallografisen tarkastelun sekä vuodoista tehtyjen havaintojen perusteella pääasiallisena vuotomekanismina voitiin pitää erityistä kaasuhuokoisuuden muotoa, kuplakanavia. Näytteistä löydettiin pitkänomaisia epäjatkuvuuskohtia, jotka olivat tunnistettavissa sulassa nousseiksi kupliksi. Kuplakanavien ympäristössä esiintyi kuplakanavista edennyttä kutistuman ajamaa huokosverkostoa, jonka öljy oli kyennyt kostuttamaan laajalti. Tarkasteluissa löydettiin huokoisuuden lisäksi rakenteellisia virheitä, kuten metallien välisiä yhdisteitä ja alumiinioksidisulkeumiksi oletettuja rakenteita.

Kuplakanavien todettiin voivan muodostaa yhtenäisiä vuotokanavia painevalukomponentteihin. Vuotojen esiintyminen valurungon muilla kuin koneistetuilla ulkopinnoilla oli erittäin harvinaista, josta voitiin päätellä, etteivät kuplakanavat pääsääntöisesti ole pintaan avautuvia virheitä. Kuplakanavat voivat kuitenkin olla jopa yli senttimetrin pituisia ja toimia kutistumahuokoisuuden lähteinä, jolloin koneistuksen on todennäköistä avata kuplakanavia läpivuodon mahdollistaviksi vuotokanaviksi.

Valurungon geometrian parantamisen myötä voitiin päätellä kuplakanavien, kuten muunkin huokoisuuden olevan pitkälti ehkäistävissä oikeanlaisella valun, seinämäpaksuuden ja valujärjestelmän suunnittelulla. Diplomityön tuloksia voidaan hyödyntää toisten valurunkomallien sekä muiden valukomponenttien painetiiveyden parantamisessa. Tulokset mahdollistavat lisäksi valuprosessin ja muiden tuotantoprosessien tarkastamisen sekä valukomponenttien teknisten vaatimusten ja tuotteiden laadunvalvonnan kehittämisen edelleen.

LÄHTEET

- [1] E. Itävuori, T. Höök, Painevalu, ValuAtlas – Valimotekniikan perusteet, Tarkistettu 6.3.2014. Saatavissa:
http://www.valuatlas.fi/tietomat/koosteet/kestomuottivalutekniikka/km_20.html
- [2] J. Campbell, Complete Casting Handbook, Butterworth-Heinemann, 2011, 1220 p.
- [3] E. Vinarcik, High Integrity Die Casting Processes, John Wiley & Sons, 2002, 256 p.
- [4] J. Davis, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 1993, 784 p.
- [5] E. Carlholt, käänt. T. Höök, Alumiiniseokset, ValuAtlas – Painevaluseokset, Tarkistettu 28.1.2015. Saatavissa:
http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/metals_aluminum_FI.pdf
- [6] J. Murray, A. McAlister, The Aluminum Silicon System, Bull. Alloy Phase Diagrams, Vol. 5, 1984.
- [7] M. Bladh, käänt. T. Höök, Alumiinikappaleen valuviat ja ominaisuudet, ValuAtlas – Painevalukappaleen suunnittelu. Saatavissa:
http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/HPDCdesign_defects_properties_FI.pdf
- [8] R. Raiszadeh, W. Griffiths, A Semi-empirical Mathematical Model to Estimate the Duration of the Atmosphere within a Double Oxide Film Defect in Pure Aluminum Alloy, Springer US, Metallurgical & Materials Transactions B, 39B, 2008, pp. 298–303.
- [9] M. Divandari, J. Campbell, A New Technique for Study of Aluminum Oxide Films, Aluminum Transactions, 2, 2000, pp. 233–238.
- [10] H. Toda, T. Hikada, M. Kobayashi, Growth Behavior of Hydrogen Micropores in Aluminum Alloys During High-temperature Exposure, Acta Materialia, Vol. 57, Elsevier Ltd., 2009, pp. 2277–2290.
- [11] R. Atwood, S. Sridhar, W. Zhang, P. Lee, Diffusion Controlled Growth of Hydrogen Pores in Aluminium–silicon Castings: In Situ Observation and Modelling, Acta Materialia, Vol. 48, Elsevier Ltd., 2000, pp. 405–417.
- [12] J. Vuorinen, J. Eklund, M. Oksanen, Metallivalut, Valimotekniikan laboratorio, Teknillinen korkeakoulu, 1994.

- [13] B. Korojy, H. Fredriksson, On solidification of hypereutectic Al-Si alloys, Transactions of the Indian Institute of Metals, Vol. 62, 2009, pp. 361–365.
- [14] P. Niemi, Valun simulointi, ValuAtlas, Tampereen ammattiopisto, 2010. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_valunsuunnittelu_18.pdf
- [15] K. Müller, Improved Hypereutectic Al-Si Alloys: Microstructure and Properties, Advanced Light Alloys and Composites, Kluwer Academic Publishers, 1998, pp. 233–241.
- [16] E. Itävuori, T. Höök, Metalliseosten sulatus, Valuatlas – Valimotekniikan perusteet. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/koosteet/valimotekniikanperusteet/vtp_46.html
- [17] Työohje 33000-19/02, Valurunkojen vastaanottotarkastus, Abloy Oy, 2002.
- [18] Työohje 33000-09/14, Valurunkojen vastaanotto-ohje, Abloy Oy, 2014.
- [19] I. Menzies, P. Koshy, In-process Detection of Surface Porosity in Machined Castings, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 49, Elsevier Ltd., 2009, pp. 530–535.
- [20] W. Callister, Materials Science and Engineering, 8th Edition SI Version, John Wiley & Sons, 2010, 1000 p.