

## Alumiiniseokset

*Elin Carlholt - Swecast AB*

*Käännös: Tampereen Teknillinen Yliopisto - Tuula Höök*

### Raaka-aineet

---

Alumiini on maankuoren kolmanneksi yleisin alkuaine. Maankuori sisältää suuremmissa määrin vain happea ja piitä. Alumiini, joka ei koskaan ilmene luonnossa vapaassa tilassa, muodostaa yhdisteitä etupäässä piin ja hapen sekä alkali- ja maa-alkalimetallien kanssa. Alumiinia on maankuoressa noin 8 prosenttia (rautaa, noin 5 %).<sup>1</sup>

Primaarialumiini valmistetaan bauksiitista, joka koostuu pääasiassa alumiinin, raudan ja piin hydroksideista. Suurimmat tunnetut bauksiittivarat sijaitsevat Australiassa, Brasiliassa, Jamaikalla ja Surinamissa. Bauksiittimalmi muunnetaan louhinnan jälkeen tavallisesti alumiinioksidiksi, aluminaksi ( $Al_2O_3$ ), joka vuorostaan muunnetaan primaarialumiiniksi elektrolyysiprosessilla. Kahden alumiinioksiditonin tuottamiseksi tarvitaan 4-5 tonnia bauksiittia, jotka voidaan edelleen muuntaa yhdeksi tonniksi primaarialumiinia. Elektrolyysiprosessi kuluttaa runsaasti sähköenergiaa: Yhden primaarialumiinitonin tuottaminen kahdesta tonnista alumiinioksidia vaatii 15,000 kWh sähköenergiaa.

Primaarialumiinin kokonaistuotanto on maailmanlaajuisesti noin 30 miljoonaa tonnia vuodessa. Arvioidaan, että tunnetut bauksiittivarat riittävät nykyisellä kulutuksella 200 - 400 vuodeksi.

Sekundaarialumiini on peräisin kierrätysalumiinista. Alumiinin uudelleensulatus vaatii vain viisi prosenttia energiasta, jota käytetään primaarialumiinin tuotannossa. Alumiini voidaan sulattaa uudelleen monta kertaa ilman merkittävää laadun alenemista.<sup>2</sup> Sekundaarialumiiniseosten rauta- ja kuparitasoja on kuitenkin vaikea vähentää alle 0,2 prosenttiin.<sup>3</sup>

### Sovellukset

---

Puhdas alumiini on pehmeää, sen lujuus on suhteellisen matala ja on sitä vaikea valaa. Näistä syistä puhdasta alumiinia ei yleensä käytetä valetuissa tuotteissa. Puhdas alumiini soveltuu joihinkin erikoistarkoituksiin, esimerkiksi pienten ja keskikokoisten sähkömoottorien roottorien massatuotantoon. Puhdas alumiini soveltuu näihin tuotteisiin, koska se on hyvä ei-magneettinen sähköjohde. Sitä käytetään sekä rakenneaineena että johtamaan sähköä.<sup>4</sup>

Laajan valikoima alumiinin valusovelluksia löytyy autoteollisuuden tuotteista. Tyypillisiä tuotteita ovat moottorilohkot, sylinteripäät, imusarjat, taka-akselin alustat ja vaihteistokotelot.

---

<sup>1</sup> *Introduktionskurs i pressgjutning i Jönköping 2006*

<sup>2</sup> *Introduktionskurs i pressgjutning i Jönköping 2006*

<sup>3</sup> *Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar*

<sup>4</sup> *Karlebo Gjuteriteknisk handbok*

Toinen merkittävä alumiinivaluja käyttävä teollisuudenala on sähkö- ja elektroniikkateollisuus. Sähkövoimateollisuus käyttää alumiinivaluja esimerkiksi suurjännitekatkaisijoissa. Elektroniikkateollisuus käyttää alumiinivaluja koteloissa, laiterungoissa ja matkapuhelimissa.

Alumiinivaluja käytetään enenevässä määrin myös huonekaluissa, kodinkoneissa ja erilaisissa kannettavissa laitteissa.<sup>5</sup>

#### **Alumiinin edut:**

- Keveys, tiheys 2,7 g/cm<sup>3</sup>
- Seostettuna lujaa. Puhtaan alumiinin murtolujuus on 60 - 80 MPa<sup>6</sup>, mutta valumetalliseoksilla 200 - 450 MPa.
- Hyvät korroosionkesto-omaisuudet
- Hyvä lämmön- ja sähkönjohde
- Hitsattavaa
- Kierrätettävää
- Muokattavaa
- Korkea iskulujuus, jopa matalissa lämpötiloissa
- Ei ole magneettinen
- Korkea heijastavuus

#### **Alumiinin haittapuolet:**

- Pieni lujuus korkeissa lämpötiloissa
- Matala sulamispiste
- Pieni kovuus
- Pieni kimmokerroin
- Pieni kulumisenkestävyys
- Suuri lämpölaajenemiskerroin
- Pieni virumislujuus
- Huono väsymisenkesto<sup>7</sup>

## **Ominaisuudet**

---

### **Tiheys**

Yksi tärkeä syy alumiiniseosten kasvavaan käyttöön on niissä oleva edullinen yhdistelmä matalaa painoa ja suhteellisen korkeaa mekaanista lujuutta. Alumiiniseosten tiheys on noin 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Ne ovat erittäin kevyitä verrattuna esimerkiksi valurautaan, jonka tiheys on noin 7,2 cm<sup>3</sup>.<sup>8</sup>

### **Jähmettymislämpötila**

Jokainen puhdas metalli jähmettyy yksittäisessä lämpötilassa, jähmettymispisteessä. Puhtaan alumiinin jähmettymispiste on 660 °C. Seostaminen siirtää jähmettymisprosessin alkamislämpötilaa, alumiinin tapauksessa tavallisesti matalammaksi.

---

<sup>5</sup> Karlebo Gjuteriteknisk handbok

<sup>6</sup> Korjattu alkuperäisestä tekstistä muualla tekstissä käytettyyn arvoon 60 - 80 MPa. Alkuperäisessä tekstissä kirjoitusvirhe, jossa arvoksi ilmoitettu 70 - 700 MPa.

<sup>7</sup> Introduktionskurs i Pressgjutning

<sup>8</sup> Karlebo Gjuteriteknisk handbok

Seostettujen alumiinien lämpötila pienenee jähmettymisen aikana niin, että jähmettyminen tapahtuu yksittäisen lämpötilan sijasta lämpötilavälillä eli jähmettymisvälillä. 12,5 % piitä sisältävillä seoksilla väli kapeutuu taas yksittäiseksi pisteeksi. Tällaista seosta kutsutaan eutektiseksi. Kuten puhtaalla metallilla, sillä on jähmettymispiste. Teknisten metalliseosten seosaineiden pitoisuudet pidetään tavallisesti eutektista pitoisuutta pienempinä.<sup>9</sup> Yleisimmät painevaluseokset sisältävät 7 - 12 % piitä ja niiden jähmettymisväli sijoittuu 490 - 570 asteen tienoille.

### **Kimmokerroin**

Kimmokerroin (kimmomoduuli, elastisuusmoduuli, Youngin moduuli) on jännityksen ja venymän suhde jännitys-venymäkäyrän elastisella osuudella eli vetomurtolujuuden lisäys pituusyksikköä kohti. Kimmomoduulin yksikkönä käytetään Pascalia (Pa). Kimmokerroin on siis materiaalin joustavuuden mitta.<sup>10</sup>

Alumiiniseosten kimmomoduuli on 70 - 75 GPa eli noin kolmasosa teräksen kimmomoduulista. Tämä tarkoittaa, että alumiiniseoksesta valmistetun kappaleen elastinen muodonmuutos on kolme kertaa suurempi kuin teräksisen kappaleen, jos molempiin kohdistetaan yhtä suuri voima.<sup>11</sup>

Alumiinin kimmomoduuli pienenee, kun lämpötilaa kasvatetaan ja nousee, kun lämpötilaa pienennetään. Kimmomoduuli on jonkin verran korkeampi matalissa lämpötiloissa kuin huoneenlämpöisenä.<sup>12</sup> Se vaihtelee hieman metalliseoksen tyyppin mukaan.<sup>13</sup>

### **Mekaaniset ominaisuudet**

Murtolujuuden, kimmomoduulin ja venymän arvoja käytetään arvioitaessa materiaalin yleistä lujuutta. Arvot määritetään vetämällä koesauvoja poikki tasaisella venymisnopeudella ja kuormituksella.

### **Murtolujuus**

Murtolujuus  $R_m$  on suurin jännitys, joka voidaan kohdistaa kappaleeseen ennen kuin se murtuu.<sup>14</sup> Kupariseoksiin, valurautaan ja teräkseen verrattuna kevytmetalleilla on pieni murtolujuus.<sup>15</sup>

Puhtaan alumiinin murtolujuus on 60 - 80 MPa riippuen puhtausasteesta. Yleisimpien painevaluun käytettävien standardoitujen alumiiniseosten murtolujuudet ovat noin 240 MPa. Erikoisseosten arvot voivat olla korkeampia. Alumiinin lujuus kasvaa, kun lämpötilaa lasketaan.<sup>16</sup>

Nopeus, jolla alumiiniseoksesta valmistettu valukappale on jähmettynyt muotissa vaikuttaa huomattavasti sen mekaanisiin ominaisuuksiin. Suuri jähmettymisnopeus vähentää dendriitin haarojen pituutta ja lisää lujuutta.<sup>17</sup>

### **Myötöraja ja 0,2 % myötöraja**

Myötöraja on jännitys, jolla venymä alkaa kasvaa nopeasti ilman, että kuormitusta lisätään. Jännitys voi jopa pienentyä hetkellisesti, jos kappale myötää riittävän nopeasti. Alumiinilla ei ole selkeää myötörajaa. Myötörajan sijasta määritetään 0,2 % myötöraja. 0,2 % myötöraja on jännitys hetkellä,

---

<sup>9</sup> *Aluminium*

<sup>10</sup> *Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar*

<sup>11</sup> *Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar*

<sup>12</sup> *Aluminium*

<sup>13</sup> *Aluminium*

<sup>14</sup> *Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar*

<sup>15</sup> *Gjutlegeringar*

<sup>16</sup> *Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar*

<sup>17</sup> *Karlebo Gjuteriteknisk handbok*

jolloin kappaleeseen on muodostunut 0,2 % pysyvä venymä. Yleisimpien alumiinipainevaluseosten 0,2 % myötöraja on 140 MPa luokkaa.

### **Murtovenymä ja sitkeys**

Sitkeys on materiaalin kyky muodonmuutokseen. Käytännössä sitkeysarvo ilmaisee, kuinka paljon materiaali venyy rasitettuna ennen murtumista. Jos materiaali on hyvin sitkeää, se ei murru tilapäisen ylikuormituksen vaikutuksesta.<sup>18</sup> Sitkeyttä voidaan arvioida murtovenymän perusteella. Yleisimpien standardoitujen alumiini-painevaluseosten murtovenymä on yhden prosentin luokkaa. Ne eivät siis ole kovin sitkeitä. Painevalettujen sinkkiseosten murtovenymä vaihtelee välillä 2,5 – 13 %, painevalettujen messinkien välillä 3 – 5 %, jopa 25 % saakka ja painevalettujen magnesiumseosten välillä 3 – 18 %.<sup>19</sup>

### **Kovuus**

Kovuuden testaaminen perustuu seuraaviin periaatteisiin: Mitä kovempi materiaali, sen paremmin se pystyy vastustamaan pysyvää muodonmuutosta ulkoisen voiman vaikutuksesta. Mitä pehmeämpi materiaali, sen helpommin muodonmuutos tapahtuu.<sup>20</sup> Kovuuden mittaamiseen käytetään kolmea menetelmää:

- Brinell-menetelmä. Kovasta materiaalista valmistettua kuulaa painetaan määrättyllä voimalla tutkittavaa kappaletta vasten.
- Rockwell-menetelmä. Rockwell C -menetelmässä painetaan timanttikartiota tutkittavaa kappaletta vasten, Rockwell B -menetelmässä karkaistua teräskuulaa.
- Vickers-menetelmä. Pyramidinmuotoista nelisivuista kärkeä painetaan vakiovoimalla tutkittavaa kappaletta vasten.

Kovuusmittauksia voidaan käyttää materiaalin murtolujuuden arvioinnissa.<sup>21</sup> Painevalettujen alumiiniseosten kovuus on tavallisesti 50 - 90 HB.

### **Väsymisominaisuudet**

Alumiiniseoksilla on hyvät dynaamiset lujuusominaisuudet. Ne ovat sopivia käyttökohteisiin, joissa altistutaan väsyttävälle kuormitukselle.<sup>22</sup> Väsymismurtuma tapahtuu tavallisesti joko pelkän veto-kuormituksen tai yhdistetyn veto- ja vaihtokuormituksen vaikutuksesta. Väsymismurtuma voi tapahtua, vaikka kuormitukset pysyisivät materiaalin myötörajan alapuolella.

Vaihtokuormitukselle altistuneen kappaleen poikkileikkauksessa esiintyvät säröt eivät vielä johda väsymismurtuman syntymiseen. Väsymismurtuma ydintyy lähes aina kappaleen pinnassa. Väsymismurtuma etenee kolmessa vaiheessa: ydintyminen, särön kasvu ja haurasmurtuma.<sup>23</sup>

Karkenevilla materiaaleilla on tavallisesti paremmat väsymisominaisuudet kuin ei-karkenevilla materiaaleilla. Suuret oksidisulkeumat, huokokset ja suuret erkaumat heikentävät väsymislujuutta. Koneistetussa pinnassa on enemmän väsymismurtumien ydintymiskohtia kuin esimerkiksi huolellisesti kiillotetussa pinnassa. Painevalukappaleen pintakerros on yleensä hyvin tiivis ja vahva. Väsymislajuuden kannalta olisi edullista pitää se mahdollisimman ehyenä ja koskemattomana.

---

<sup>18</sup> *Aluminium*

<sup>19</sup> *Alumiinin, sinkin, messingin ja magnesiumin painevaluseosten standardit: EN ja ASTM*

<sup>20</sup> *Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar*

<sup>21</sup> *Karlebo Gjuteriteknisk handbok*

<sup>22</sup> *Aluminium*

<sup>23</sup> *Aluminium*

Jos materiaali altistuu korrodoiville olosuhteille ennen kuormitusta tai sen aikana, väsymislujuus alenee huomattavasti.<sup>24</sup>

### **Korroosio**

Yleisesti ottaen alumiiniseoksista valetut kappaleet kykenevät vastustamaan korroosiota hyvin niin kauan, kuin niiden pintaan muodostuva suojaava oksidikerros pysyy ehyenä. Jos oksidikerros vaurioituu, se muodostuu nopeasti uudelleen. pH alueella 4 – 8,5 oksidikerros pysyy passiivisena ja korroosio etenee hitaasti. Ympäristön lisäksi korrodoitumiseen vaikuttaa myös lämpötila ja seoksen alkuainekoostumus.<sup>25</sup>

Osa seoksen sisältämistä alkuaineista on epäpuhtauksia ja osa seosaineita. Peruseriaate: mitä vähemmän epäpuhtausaineita seoksessa on, sitä parempi on sen korroosionkesto.<sup>26</sup> Kupari ja rauta heikentävät alumiiniseosten korroosionkestävyyttä. Kuparia ja rautaa sisältävät seokset saattavat vaatia pintakäsittelyn ennen kuin niitä voidaan käyttää korrodoivissa olosuhteissa. Magnesiumilla ja piillä on positiivinen vaikutus alumiiniseosten korroosionkestävyyteen.

Galvaanista korroosiota tapahtuu, kun alumiini tuodaan kosketuksiin sähkökemiallisessa sarjassa jalomman metallin kanssa. Kupari ja hiiliteräs tehostavat huomattavasti alumiinin galvaanista korroosiota. Ruostumaton teräs vähentää korroosiotaipumusta. Sinkki suojaa alumiinia katodisesti.<sup>27</sup>

Jos korroosionkestolle asetetaan suuria vaatimuksia tai jos alumiinikappale on tarkoitus pinnoittaa visuaalisesti laadukkaalla tavalla anodisointia käyttäen, paras vaihtoehto on jokin alumiini-magnesiumseoksista. Alumiini-magnesiumseoksiin muodostuu hopeanvärinen pinta kiillotettaessa. Anodisointikäsittely parantaa korroosionkestoa jopa suolavesiympäristössä ja emäksisissä olosuhteissa. Alumiini-magnesiumseokset ovat kuitenkin suhteellisen hankalia valaa ja taipuvaisia säröilemään lämmön vaikutuksesta.<sup>28</sup>

## **Metallografia**

---

Metallisulassa metalliatomit pääsevät liikkumaan esteettä. Kun sula jähmettyy, atomit lukkiutuvat paikoilleen hilarakenteeksi. Jähmettymisen jälkeen metallin tiheys on suurempi ja tilavuus pienempi kuin sulassa tilassa.

Alumiini kiteytyy jähmettymisen aikana pintakeskiseen kuutiomuotoon, fcc. Alumiinin hilavakio on 0.4049 nm 20°C lämpötilassa.<sup>29</sup>

Puhtaalla alumiinilla on pieni lujuus. Lujuutta voidaan kasvattaa erilaisilla menetelmillä, joita ovat esimerkiksi:

- lujittaminen raekokoa hienontamalla eli raerajojen määrää lisäämällä
- liuoslujittaminen
- dispersiolujittaminen ja erkaumakarkaisu
- muokkauslujittaminen

---

<sup>24</sup> *Aluminium*

<sup>25</sup> *Gjutlegeringar*

<sup>26</sup> *Aluminium*

<sup>27</sup> *Gjutlegeringar*

<sup>28</sup> *Karlebo Gjuteriteknisk handbok*

<sup>29</sup> *Thundal, Aluminium, 1991*

Kolmea ensin mainittua menetelmää käytetään yleisesti alumiinin valuseosten lujittamiseen. Lujittamismekanismi aktivoidaan sopivilla seosaineilla.

Periaatteessa kaikki metallit liukenevat sulaan alumiiniin. Liukoisuus pienenee, kun alumiiniseos muuttuu kiinteäksi. Tästä syystä seosaineet esiintyvät kiteytyneessä alumiinissa kahdessa muodossa: osa jähmeänä liuksena ja osa erkautuneena raerajoille.

Jähmeiden liuosten kiderakenne on sama kuin alkuperäisellä puhtaalla aineella, mutta sillä poikkeuksella, että jotkin jähmeiden liuosten hilojen osat ovat korvautuneet tai vaihtuneet liuenneiden aineiden atomeihin. Liuenneet aineet ovat jakautuneet satunnaisesti. Seoksia, jotka ovat pääasiassa jähmeitä liuksia, kutsutaan homogeenisiksi seoksiksi. Alumiinilla atomien korvautumista voi tapahtua vain rajatussa määrin. Jos seoksessa on liukoisuutta suurempia määriä seosaineiden atomeita, ylimäärä muodostaa erillisiä kiteitä. Tällaista seosta kutsutaan heterogeeniseksi.<sup>30</sup>

Yleensä seosaineiden liukoisuus kasvaa lämpötilan kasvaessa. Mg, Zn ja Cu liukenevat alumiiniin hyvin, Mn ja Si keskimukaisesti, Fe, Ti ja muut alkuaineet vain hieman. Seos voidaan saattaa ylikylläiseksi lämmittämällä sitä. Esimerkiksi magnesiumin liukoisuus 20°C lämpötilassa on vain 1,6 %, mutta 180 °C lämpötilassa jo 3 %. Jos valu sammutetaan nopeasti huoneenlämpötilaan, magnesium jää jähmeään liukseen, koska sen diffuusionopeus on pieni.

Ylikylläisyys ei ole vakaa tila. Jos ylikylläisestä seoksesta koostuvaa kappaletta lämmitetään hieman, ylimääräiset atomit voivat erkautua pois liuksesta. Tämä ylikylläisen liuksen ominaisuus on tärkeä erkaumakarkaisun kannalta. Erkaumakarkaisu perustuu siihen, että karkaistavassa kappaleessa on olemassa liunneena ylimääräisiä atomeja, jotka voidaan saattaa erillisiksi erkaumiksi lämpökäsittelyn avulla.

## Alumiiniseokset

---

### Standardit

Alumiiniseoksia käsitellään kahdessa eurooppalaisessa standardissa. Kummassakin on lueteltu 37 seosta.

- EN 1706 Aluminium and aluminium alloys. Castings. Chemical composition and mechanical properties (SFS-EN 1706 - Alumiini ja alumiiniseokset. Valut. Kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet.)
- EN 1676 Aluminium and aluminium alloys. Alloyed ingots for remelting. Specifications. (SFS-EN 1676 - Alumiini ja alumiiniseokset. Uudelleen sulatettavat seostetut alumiiniharkot. Spesifikaatiot.)

Alumiinivaluseoksia on kahta tyyppiä: karkenevia ja karkenemattomia. Seokset voidaan jakaa seitsemään ryhmään seosaineiden perusteella. Painevaltavat seokset erottaa muista alumiinin valuseoksista se, että painevaltaviin seoksiin on lisätty rautaa niin, että pitoisuus on noin 1,2 % luokkaa. Ylimääräisen raudan on tarkoitus ehkäistä painevalumuotin muottipesän syöpymistä ja alumiinin takertumista muottipesän pintaan.<sup>31</sup>

---

<sup>30</sup> *Aluminium*

<sup>31</sup> *Aluminium*

Painevaluun käytettävät seosryhmät ovat:

### **Alumiini-pii**

Tähän ryhmään kuuluvat kaikki EN AC-44 000 ja EN AC-47 000 -seokset. Alumiini-pii-seoksilla on hyvät valuominaisuudet. Niiden juoksevuus on hyvä, niillä on keskinkertaiset lujuusominaisuudet, hyvä korroosionkesto, erittäin hyvät mekaaniset ominaisuudet ja ne ovat hitsattavia. Alumiini-pii-seokset sopivat monimutkaisiin ohutseinämaisiiin ja painetiiviisiin kappaleisiin. Yleisin seos on AlSi12, jossa on 12 % piitä. Pienemmät piipitoisuudet tekevät seoksista tiheämpiä.

### **Alumiini-pii-kupari**

Tähän ryhmään kuuluvat kaikki EN AC-46 000 -seokset. Kupari lisää seosten lujuutta, kovuutta ja lastuttavuutta. Alumiini-pii-kupari-seoksilla on hyvät valuominaisuudet. Tavallisesti alumiini-pii-kupari-seoksista valettuja kappaleita ei lämpökäsitellä, vaikka periaatteessa ne olisivat lämpökäsiteltävissä, jos valuolosuhteet ovat onnistuneet. Ryhmän seoksia käytetään erityisesti lastuamalla jälkikäsiteltäviin, isoina sarjoina valmistettaviin valuihin. Alumiini-pii-kupari-seokset ovat kaikista alumiiniseoksista halvimpia.

### **Alumiini-pii-magnesium**

Tähän ryhmään kuuluvat kaikki EN AC-42 000 ja EN AC-43 000 -seokset. Alumiini-pii-magnesium-seoksilla on hyvät korroosionkesto-ominaisuudet, erityisesti suolavesiolosuhteissa. Ne voidaan kiillottaa ja anodisoida helposti. Alumiini-magnesium-seoksista valettuja kappaleita käytetään erityisesti laivateollisuuden armatuureissa, kemian teollisuuden putkistoissa ja rakennusteollisuuden kohteissa, joissa vaaditaan korkeaa visuaalista laatua (koristeellisuutta). Seosten lujuus kasvaa magnesiumpitoisuuden kasvaessa.

### **Erikoisseokset**

Vaikka tämän ryhmän seoksilla on joitakin erittäin hyviä ominaisuuksia, niitä käytetään harvemmin kuin muita seoksia. Erikoisseokset eivät aina ole kovin helposti valettavia ja niihin muodostuu helposti lämpöväsymissäryöilyä. Erikoisseoksiin luetaan anodisoitavat alumiini-magnesium-seokset, alumiini-sinkki-magnesium-seos, alumiini-kupari-titaani-seos ja alumiini-pii-kupari-nikkeli-magnesium-seos. Al-Zn-Mg-seos on vanheneva. Se saavuttaa optimaalisen lujuuden neljässä viikossa huoneenlämpötilassa. Al-Cu-Ti-(Mg) -seoksilla on alumiiniseokseksi poikkeuksellisen korkea lujuus. Al-Si-Cu-Ni-Mg -seos pitää lujuusarvonsa tavallista korkeammassa lämpötiloissa ja sillä on hyvä kulumisen kestävyys.

### **Kansainväliset standardit**

Eurooppalaisen nimeämiskäytännön lisäksi joillakin Euroopan mailla ja Euroopan ulkopuolisilla mailla (USA ja Japani) on omia kansallisia luokittelujärjestelmiään. Eri standardointijärjestelmissä luokitellut seokset ovat vain harvoin täysin vertailukelpoisia.

Taulukko 1. Tavallisimpien standardoitujen alumiiniseosten ominaisuuksia.<sup>32,33</sup>

Seosryhmä	Numero	Tila	Murto- lujuus, R <sub>m</sub> (MPa)	Myötö- raja, R <sub>p0,2</sub> , (MPa)	Venymä, A <sub>50mm</sub> (%)	Brinell- kovuus, HBS	Jähmet- tymis- väli, °C
AlSi10Mg	EN AC-43 400	F	240	140	1	70	600 - 550
AlSi	EN AC-44 300	F	240	130	1	60	580 - 570
	EN AC-44 400	F	220	120	2	55	600 - 550
AlSi9Cu	EN AC-46 000	F	240	140	<1	80	600 - 490
	EN AC-46 100	F	240	140	<1	80	580 - 530
	EN AC-46 200	F	240	140	1	80	600 - 490
	EN AC-46 500	F	240	140	<1	80	600 - 490
AlSi(Cu)	EN AC-47100	F	240	140	1	70	580 - 530
AlMg	EN AC-51 200	F	200	130	1	70	630 - 550

### Seosaineet

Koska puhtaalla alumiinilla on pieni lujuus ja se on hankalaa valaa, sitä käytetään vain erikoistapauksissa. Erikoistapauksia ovat esimerkiksi sähkömoottorien osat, joilta vaaditaan hyvää sähkön- ja lämmönjohtokykyä.<sup>34</sup>

Alumiini seostetaan, jotta sille saadaan halutut ominaisuudet. Tavallisimmat seosaineet ovat:

- **Pii (Si)** On kaikkein tärkein alumiinin seostamiseen käytetty alkuaine. Useimmiten piitä seostetaan 7 – 12 %. Pii laskee seoksen sulamispistettä ja parantaa sulan juoksevuutta, kovuutta ja lujuutta.
- **Kupari (Cu)** Ajautuu usein kierrätysalumiiniseokseen mukaan epäpuhtausaineena, koska sitä on kierrätysromun joukossa. On myös seoksia, joihin lisätään kuparia tarkoituksella parantamaan seoksen kovuutta ja lastuttavuutta.<sup>35</sup> Painevalettavat alumiiniseokset voivat sisältää kuparia 3 – 4 % saakka. Kupari heikentää alumiiniseosten korroosionkesto-ominaisuuksia, mutta toisaalta mahdollistaa jotkin lämpökäsittelymenetelmät ja parantaa valukappaleiden lastuttavuutta.
- **Magnesium (Mg)** Lisätään tavallisesti alumiini-pii-seoksiin noin 0,65 % luokkaa olevilla pitoisuuksilla ja alumiini-magnesium-seoksiin 10 % pitoisuuteen saakka. Magnesium parantaa kovuutta, lujuutta ja korroosionkestävyyttä. Toisaalta se voi heikentää seoksen juoksevuutta ja kasvattaa pelkistymispotentiaalia.
- **Rauta (Fe)** On tavallinen epäpuhtausaine alumiiniseoksissa. Se pienentää korroosionkestävyyttä suurilla pitoisuuksilla. Painevaluseoksiin lisätään kuitenkin rautaa 1,2 % saakka, koska se vähentää lämpöväsymissäroilyä ja riskiä siihen, että alumiiniseos takertuu muottipesän pintaan valuprosessin aikana. Jos sulassa on korkea rautapitoisuus, jähmettyneessä

<sup>32</sup> EN 1706-Aluminium och aluminiumlegeringar- gjutgoods- kemisk sammansättning och mekaniska egenskaper

<sup>33</sup> Stena Aluminium, Gjuttlegeringar av aluminium

<sup>34</sup> Aluminium

<sup>35</sup> Gjuttlegeringar



seoksessa on usein haitallisia metalliyhdistefaaseja. Metalliyhdisteet heikentävät seoksen sitkeyttä erittäin paljon.<sup>36</sup> Rautafaasi voi myös ydintää huokosia.

- **Mangaani (Mn)** On tavallisesti epäpuhtausaine, joka voi muodostaa raudan ja kromin kanssa metalliyhdisteitä eli nk. kovia pisteitä. Kovat pisteet tuottavat ongelmia koneistettaessa. Mangaanilla on myös hyviä ominaisuuksia. Se esimerkiksi vähentää raudan haitallista vaikutusta.

Muut seosaineet:

- **Sinkki (Zn)** Voidaan lisätä 1,2 % saakka. Sinkki lisää seoksen kovuutta ja lujuutta, mutta voi heikentää korroosionkestoa. 4 – 5 % sinkkipitoisuuksiin saakka seokset vanhenevat luonnollisesti ilman lämpökäsittelyä.
- **Nikkeli (Ni)** On epäpuhtausaine ja sen pitoisuus on tavallisesti rajattu alle 0,05 %:iin. Sitä voidaan kuitenkin käyttää parantamaan lujuutta korkeissa lämpötiloissa, erityisesti yhdessä kromin kanssa.<sup>37</sup>

## Sulattaminen

---

Alumiinin sulattamiseen on olemassa erilaisia käytäntöjä. Suurissa valimoissa on usein kaasui- tai sähkökäyttöinen keskussulatto, jossa voidaan sulattaa sekä harkkoja että kierrätysalumiinia. Keskussulaton uunista sula kaadetaan kuljetusenkkaan ja käsitellään mahdollisesti joillakin sulankäsittelymenetelmillä. Käsittelyjen jälkeen sula kaadetaan valupaikan vieressä olevaan kuumanapituuuniin. Pienissä valimoissa sulattaminen tehdään usein valupaikan vieressä olevalla yhdistetyllä sulatus- ja kuumanapituuunilla.

Kuumanapituuuni voi olla upokkaallinen vastusuuni tai tulenkestävillä tiilillä vuorattu induktio- uuni. Valupaikalla voidaan käyttää myös annostelevia uuneja. Annostelevastasta uunista sulaa ei siirretä valukoneeseen tai muottiin kauhomalla, vaan annostelukanavan kautta juoksuttamalla.

Jotta sulatus voidaan tehdä kustannus- ja energiatehokkaasti, on hyvä valita uuniin mahdollisimman pitkäikäinen ja hyvälaatuinen vuoraus. Vuorauksen laadulla on merkitystä myös työympäristön kan-  
nalta.<sup>38</sup> Koska alumiini reagoi herkästi raudan kanssa, upokas ei voi olla valurautaa tai terästä.<sup>39</sup>

## Sulankäsittely

---

Useimmissa valimoissa on käytäntönä puhdistaa sula ennen valua, koska sula alumiini on herkkä hapettumaan ja liuottamaan vetykaasua. Taipumus kasvaa, kun lämpötilaa nostetaan. Puhdistustoimenpiteitä ovat kaasunpoistokäsittely ja hapettuneiden ainesosien poisto eli kuonaus. Näihin on olemassa erilaisia menetelmiä, välineitä ja käsittelyaineita.

Puhdistaminen parantaa valettavuutta sekä vähentää huokoisuutta. Huokoisuuden vähentyessä va-  
lujen painetiiveys paranee ja muitakin valuvikoja esiintyy vähemmän. Kappaleiden sitkeys, lujuus, lastuttavuus ja lämpökäsittelyominaisuudet paranevat myös.

---

<sup>36</sup> *Gjutlegeringar*

<sup>37</sup> *Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar*

<sup>38</sup> *Karlebo gjuteriteknisk handbok*

<sup>39</sup> *Karlebo gjuteriteknisk handbok*

Puhdistamisen lisäksi tehdään myös muita sulankäsittelyitä, joista tavallisimmat ovat jalostaminen ja raerakenteen hienontaminen.

### **Jalostaminen**

Jalostaminen on sulankäsittelymenetelmä, jolla tähdätään jäähmettyneen alumiiniseoksen mikrorakenteen parantamiseen. Lähes kaikissa alumiiniseoksissa käytetään seosaineena piitä, koska se parantaa alumiinin juoksevuutta ja valettavuutta. Pii parantaa myös valujen mekaanisia ominaisuuksia, lähinnä lujuutta ja kovuutta.

Piipitoinen faasi jäähmettyy tavallisesti pyöreiksi rakenteiksi, jotka muistuttavat poikkileikkauksen suunnassa paksuja neuloja. Paksut neulamaiset muodot voivat heikentää seoksen sitkeyttä voimakkaasti, koska ne toimivat samoin, kuin jos kappaleen sisällä olisi pyällyksiä tai loveuksia. Jos sulaan lisätään strontiumia (Sr) tai natriumia (Na), piipitoisen faasin muodot pyöristyvät ja sitkeys kasvaa merkittävästi.<sup>40</sup> Sulan juoksevuus paranee samalla.

Strontium lisätään sulan joukkoon alumiiniseoseksena (master alloy). Esiseoksia myydään pieninä harkkoina tai tankoina. Sopiva strontiumpitoisuus on painealussa 200 ppm. Alumiiniharkkojen toimittajilta saa ostettua myös seoksia, joissa strontium on valmiina. Strontiumkäsittelyä voidaan käyttää muiden menetelmien ohella, kun tarkoituksena on tuottaa ohutseinämäisiä valukappaleita. Strontiummenetelmä vaatii, että kappale jäähmettyy nopeasti.

Strontiumin jalostusvaikutus heikkenee ajan myötä, jos käsiteltyä sulaa seisotetaan. Strontium kestää kuitenkin pitempään kuin esimerkiksi natrium.

Strontiummenetelmän edut:

- helppo käyttää ja annostella
- ei reagoi upokasmateriaalin kanssa
- parantaa sulan juoksevuutta.

Strontiummenetelmän haitat:

- vaatii nopean jäähmettymisen, jotta jalostusvaikutus olisi mahdollisimman tehokas
- voi aiheuttaa kappaleeseen ylimääräistä huokoisuutta.

Natriumia (Na) käytetään alumiinin jalostuksessa siinä tapauksessa, että valetaan paksuseinäisiä kappaleita hiekka- tai kokillivaluna. Natriumin vaikutus heikkenee sulassa nopeammin kuin strontiumin. Natriumin etuna on helppokäyttöisyys ja nopeus. Natriumia lisätään tavallisesti pelletteinä, jotka painetaan upoksiin kauhalla. Tästä seuraa voimakas kemiallinen reaktio, joka tuottaa hengitysteitä ja muuta kudosta ärsyttävää kaasua. Reaktio sekoittaa sulaa, jonka seurauksena hapettuminen kiihtyy.

Jalostaminen laskee alumiiniseoksen eutektista lämpötilaa. Tällöin sula alijäähtyy ja strontium- tai natriumpartikkeleiden läsnäolo hienontaa jäähmettyneen seoksen raerakennetta.

---

<sup>40</sup> Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar.

### **Raerakenteen hienontaminen**

Kun alumiiniseos jähmettyy nopeasti, siihen tulee hieno raerakenne. Tämä on usein toivottu tilanne. Hienon raerakenteen muodostavat seokset ovat kovempia kuin karkean rakenteen muodostavat seokset ja niistä on suhteellisen helppo valmistaa painetiiviitä kappaleita. Paksuseinämäiset kappaleet jähmettyvät hitaasti ja niihin muodostuu karkea raerakenne. Tällöin voi olla välttämätöntä käyttää raerakennetta hienontavia aineita. Raerakenteen hienontamiseen käytetään yleisesti suoloja, jotka sisältävät esimerkiksi titaania tai booria.<sup>41</sup> Raerakenteen hienonnuskäsittelyn jälkeen muotti täyttyy tehokkaammin ja kappaleisiin muodostuu vähemmän lämpösäröjä kuin ilman käsittelyä. Raerakenteen hienonnuskäsittelyä ei tavallisesti käytetä painevaluprosessin yhteydessä.<sup>42</sup>

### **Puhdistus/kuonaus**

Alumiini reagoi erittäin herkästi ilmassa olevan hapen kanssa muodostaen alumiinioksiedeita. Oksidit kertyvät kalvomaisiksi rakenteiksi, jotka nousevat sulan pinnalle paksuksi kerrokseksi. Kun sulaa sekoitetaan, kaadetaan tai kauhotaan, oksidia muodostuu lisää. Toisinaan oksidit kulkeutuvat valuihin saakka. Valukappaleisiin päätyneet oksidit aiheuttavat oksidisulkeumia ja muita valuvikoja.

Oksidien poistamiseen ja metallien erottamiseen kuonan seasta käytetään puhdistus- ja kuonausaineita. Kuonausaineen vaikutuksesta sulan pinnalle muodostuu kuiva, noin 20 % alumiinia sisältävä kuonakerros. Ilman kuonausainetta muodostuneen kuonan alumiinipitoisuus voi olla jopa 80 % ja se takertuu hyvin helposti upokkaan seinämiin.<sup>43</sup>

Kuonaus tapahtuu siten, että sulan joukkoon annostellaan jauhemaista, pelletöityä tai rakeista kuonausainetta. Kuonausaineita on kahta tyyppiä: puhdistusainetta ja peiteainetta. Kuonausaineet koostuvat alkuaineyhdisteistä ja suoloista, esimerkiksi Ca, K, Na, Cl ja F.<sup>44</sup>

Useimmissa tapauksissa valitaan jokin peiteaine. Kuonasta käytetään eniten hiekka- ja kokillivalimoissa,<sup>45</sup> mutta se on tavallinen menettely myös painevalimoissa.

### **Kaasunpoisto**

Eräänä alumiinivalukappaleissa olevan huokoisuuden lähteenä on sulaan liuennut vety. Vetykaasua muodostuu sulan reagoiessa ilmankosteuden kanssa. Se liukenee helposti sulaan alumiiniin, mutta liukoisuus pienenee nopeasti, kun lämpötilaa lasketaan. Kun sula jähmettyy, vety kertyy kaasunte-loiksi ja pieniksi kupliksi metallin sisään aiheuttaen huokoisuudeksi kutsutun valuvian.

Sulalle voidaan tehdä kaasunpoistokäsittelyjä, jos on aihetta epäillä, että siihen on liuennut kaasuja. Käytössä on kaksi menetelmää: kaasuhuuhtelu tai tyyppiä sisältävät pelletit. Kaasuhuuhtelu suoritetaan injektoimalla kantajakaasua (argon tai tyyppi) sulaan lanssilla. Lanssin päässä on siipipyörä. Sekä lanssi että siipipyörä pyörivät kaasun injektioinnin aikana. Vety ja muut epäpuhtaudet nousevat kantajakaasun mukana sulan pinnalle. Kaasunpoistokäsittelystä sulasta valetuissa kappaleissa on pienempi määrä kaasuhuokoisuutta kuin käsittelemättömästä sulasta valetuissa kappaleissa. Pienentynyt huokoisuus lisää kappaleiden lujuutta ja sitkeyttä.<sup>46</sup>

Painevalu on poikkeus muihin valumenetelmiin verrattuna. Painevalun huokokset eivät useinkaan ole vedyn aiheuttamia. Ne ovat syntyneet muotin täyttämisen aikana sulaan sekoittuneesta ilmasta. Painevalun valutapahtuma jähmettymisaikoinen on niin lyhyt, että liuennut vety jää pakkotilaan

---

<sup>41</sup> *Karlebo gjuteriteknisk handbok*

<sup>42</sup> *Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar.*

<sup>43</sup> *Karlebo gjuteriteknisk handbok*

<sup>44</sup> *Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar.*

<sup>45</sup> *Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar*

<sup>46</sup> *Gjutlegeringar*

metallin sisään eikä erkaannu kupliksi. Hitaammissa valuprosesseissa kaasu ennättää erkaantua. Kaasunpoistokäsittelyä ei tästä syystä käytetä painevalimoissa niin usein kuin hiekkavalimoissa.

## Painevaluprosessi

---

Painevalumenetelmässä sula metalli työnnetään valukammion (valusylinterin) kautta teräksiseen muottiin erittäin suurella nopeudella. Suuren valunopeuden vuoksi painevalukappaleissa voi olla ohuita seinämiä ja monimutkaisia muotoja. Metallin jähmettyä, kun siitä johtuu lämpöä teräksiseen muottiin. Metallin jähmettyttyä muotti voidaan avata ja kappale poistetaan.

Painevalumenetelmiä on kaksi: kylmäkammiomenetelmä ja kuumakammiomenetelmä. Alumiini-seosten valamisessa käytetään lähes yksinomaan kylmäkammiomenetelmää. Painevaluja voidaan valmistaa alumiiniseosten lisäksi magnesium-, kupari- ja sinkkiseoksista.<sup>47</sup>

Painevalumenetelmän ominaispiirteitä:

- teknisesti edistykselliset laitteet
- hyvä tuottavuus
- valukappaleissa on tarkat mittatoleranssit ja tasaiset, tasalaatuiset pinnat
- valukappaleet voivat olla ohutseinäisiä
- kappaleita ei yleensä tarvitse koneistaa kovin paljon
- kallis muotti, jonka takaisinmaksu vaatii pitkiä sarjoja, yleensä vasta vähintään 5000 – 10000 kappaleen kokonaistuotantomäärä on kannattava

### Kylmäkammiomenetelmä

Sula säilytetään tavallisesti valukoneen vieressä olevassa kuumapituunissa. Valukoneen valumäntä on vaakasuorassa asennossa. Valukammio on valukoneessa ja siitä on suora yhteys muottiin. Sula annostellaan uunista valukammioon, jonka jälkeen valukone pakottaa sulan muottiin valumännällä iskien. Valumännän iskuliike on yleensä kolmivaiheinen.

**Valuiskun 1. vaihe.** Valuiskun ensimmäistä vaihetta kutsutaan lähestymisvaiheeksi. Ensimmäinen vaihe alkaa, kun sula on annosteltu painevalukoneen valukammioon. Painevalukoneen valumäntä liikkuu kiihtyvällä nopeudella noin 0,5 m/s nopeuteen saakka. Liike pidetään suhteellisen hitaana, jotta ilmaa ei sekoittuisi sulan joukkoon. Ensimmäinen vaihe lopetetaan siihen, että sula on täyttänyt muotin valujärjestelmän valuportille saakka.

**Valuiskun 2. vaihe.** Valuiskun toista vaihetta kutsutaan täyttövaiheeksi. Täyttövaiheen aikana muotipesät täytetään nopeasti. Mäntä liikkuu 2 - 6 m/s. Täyttövaihe kestää tavallisesti 30 - 300 millisekuntia. Täyttövaihe pidetään lyhyenä, jotta kaikki ohuimmatkin muotipesien osat ennättäisivät täytyä kunnolla ennen kuin sula alkaa jähmettyä. On tärkeää, että valuiskun täyttövaihe saadaan alkamaan tarkasti sillä hetkellä, kun sula on saavuttanut valuportin. Ajoitus tehdään joko mittamalla männän kulkemaa matkaa tai tarkkailemalla mäntää liikuttavan hydraulijärjestelmän painetta. Paine kasvaa, kun sula alkaa kulkea valuportin läpi, koska valuportin poikkipinta-ala on huomattavasti pienempi kuin sitä edeltävissä valujärjestelmän osissa.

**Valuiskun 3. vaihe.** Valuiskun kolmatta vaihetta kutsutaan tiivistysvaiheeksi. Tiivistysvaihe aloitetaan, kun muotti on täytetty sulalla kokonaan. Muotin täyttyttyä painevalukoneen hydraulijärjestelmään vaikuttaa erittäin voimakas vastus, koska sula pysähtyy eikä valumäntä enää pysty painamaan lisää sulaa muottiin. Valukoneesta aktivoidaan ylimääräistä painetta, jotta mäntää

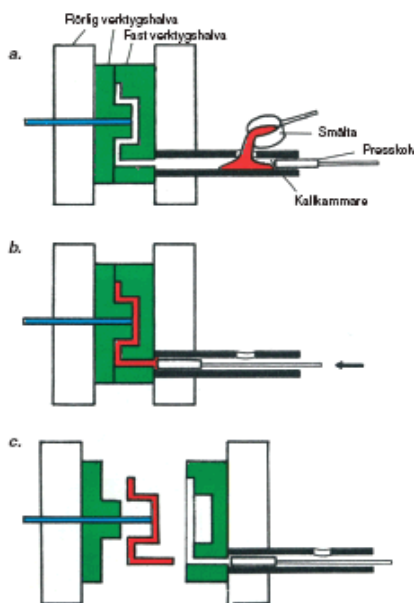
---

<sup>47</sup> Karlebo gjuteriteknisk handbok

saadaan liikutettua vielä hieman eteenpäin. Pienellä liikkeellä painetaan muottipesään lisää sulaa korvaamaan jähmettymiskutistuma ja tiivistämään mahdolliset ilmakuplat. Sulan paine nostetaan hyvin korkeaksi, jopa 400 - 1500 bar välille. Tarkka arvo riippuu valukappaleelle asetetuista vaatimuksista. Korkea tiivistyspaine tekee valukappaleesta painetiiviin ja parantaa sen mekaanisia ominaisuuksia, mutta toisaalta nopeuttaa muotin ja valukoneen osien kulumista.

### Tyhjölaitteisto

Painevalukappaleisiin syntyy usein sulan ja ilma-atmosfäärin vuorovaikutuksesta johtuvia valuvikoja, kuten oksidisulkeumia ja huokosia. 50 - 90 % sulasta joutuu kosketuksiin ilman kanssa joko annostelun aikana tai muotin ja valukammion sisällä. Ilman aiheuttamia valuvikoja voidaan vähentää käyttämällä tyhjölaitteistoa. Tyhjölaitteiston avulla sulan sisään loukkuun jääneen ilman ja muiden kaasujen aiheuttamia valuvikoja voidaan vähentää jopa kymmenenteen osaan. Myös muotin täyttöaikaa ja valukoneen hydraulijärjestelmän painetta voidaan pienentää.<sup>48</sup>



Kuva 1. Painevalun päävaiheet kylmäkammiomenetelmässä. a. Muotti on suljettu. Sula kaadetaan valukammioon (valusylinteriin). b. Valumäntä pakottaa sulan muottipesään suurella nopeudella ja loppuvaiheessa myös suurella paineella. Sula pidetään paineen alaisena koko jähmettymisajan. c. Kun sula on jähmettynyt, muotti avataan ja valukappale pakotetaan muotista pois ulostyöntimien avulla.

## Valujen puhdistus

### Purseiden leikkaaminen

Jakotason suuntaiset purseet ja valujärjestelmä voidaan poistaa leikkaamalla tarkoitusta varten erikseen valmistetulla leikkaintyökalulla. Menetelmää voidaan nykyisin käyttää melko pienillekin tuotantomäärille, koska leikkaintyökalun vaihtoon kuluva aika on saatu lyhennettyä merkittävästi. Toisaalta leikkaintyökalun hankintakustannus on suhteellisen suuri.

<sup>48</sup> Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar

## Hiominen

Hiominen on nopea tapa tasoittaa valukappaleen pintoja. Alumiinin hiomiseen käytettävät välineet ovat samoja, joita käytetään muidenkin metallien hiomiseen. Hiomalaikkaa ei kuitenkaan käytetä yleisesti, koska alumiinilla on taipumus muuttua takertuvaksi.<sup>49</sup>

## Rummuttaminen

Alumiinikappaleita voidaan rummuttaa sekä kuivina että lastuamismesteen kanssa. Tavallisesti käytetään lastuamismestettä. Rummutusmenetelmää voidaan käyttää sekä purseenpoistoon että pintojen viimeistelytyöstöön joko pelkästään tai esikäsitteilynä pintakäsittelyille.

## Kuulapuhallus

Kaikkia kovia materiaaleja - kuten rautaa, terästä, alumiinia, lasia ja kovaa muovia - voidaan työstää kuulapuhaltamalla. Kuulapuhallusta voidaan soveltaa esimerkiksi purseenpoistoon, muottien puhdistamiseen ja terävien koneistettujen nurkkien pyöristämiseen.<sup>50</sup> Herkät pinnat voidaan hiekkapuhaltaa kuulapuhalluksen sijasta.<sup>51</sup>

## Muut menetelmät

Valukappaleiden puhdistukseen voidaan käyttää rajoitetusti vesileikkausta. Vesileikkauksen haitta-  
puolina ovat suuret aloitus- ja käyttökustannukset. Robottiautomaatiota ja NC-koneistusta sovelletaan usein.<sup>52</sup>

## Lämpökäsittelyt

---

Lämpökäsittelyn tarkoituksena on muuttaa valukappaleiden mekaanisia ominaisuuksia. Lämpökäsittelyn avulla voidaan esimerkiksi pienentää tai suurentaa murtolujuutta, sitkeyttä ja myötörajaa. Painevalukappaleita ei tavallisesti lämpökäsitellä, koska painevaluprosessin jäljiltä kappaleessa on sulkeumia ja huokoisuutta. Lämpökäsittelyn vaikutuksesta huokokset saattavat laajeta ja näkyä pinnassa suurina kohoumina. Lämpökäsittely on kuitenkin mahdollista, jos huokoisuus on pientä.

Alumiinivaluille käytettäviä lämpökäsittelyjä ovat **erkautuskarkaisu** ja **erilaiset hehkutukset**. **Täydellinen erkautuskarkaisu** sisältää seuraavat vaiheet: liuotushehkutus, sammutus ja vanhentaminen joko luonnollisesti tai keinovanhentamalla. Standardin mukaisia erkautuskarkaisutiloja merkitään T-kirjaimella ja numerolla. Valukappaleille ovat käytössä tilat T4, T5, T6 ja T7. **Hehkutuskäsittelyinä** tehdään edellä mainitun liuotushehkutuksen lisäksi, jännitystenpoistohehkutus, pehmeäsihehkutus tai stabilointi. Pehmeäsihehkutustila merkitään standardin mukaan O-kirjaimella ja pelkkä liuotushehkutus W-kirjaimella. Muille hehkutustiloille ei ole erityisiä merkintöjä. F-kirjaimella tarkoitetaan valutilaa.

### T4: Liuotushehkutettu ja luonnollisesti vanhennettu.

Käsittely suoritetaan lämmittämällä kappale aluksi nopeasti liuotuslämpötilaan. Liuotuslämpötila riippuu seoksen koostumuksesta. Tavallisesti se on 500 - 530 °C. Liuotusaika riippuu sekä seoksen koostumuksesta että kappaleen koosta. Tarkoituksena on liuottaa jotakin valuseokseen kuuluvaa seosaineita (tavallisesti magnesium) materiaalin matriisiin niin paljon kuin mahdollista. Liuotuksen

---

<sup>49</sup> *Aluminium*

<sup>50</sup> *KMC ytbehandling AB*

<sup>51</sup> *Vigen@varmzink.se*

<sup>52</sup> *Karlebo Gjuteriteknisk handbok*

jälkeen kappale jäädytetään nopeasti 50 °C veteen. Kappale täytyy upottaa veteen kokonaan lähes välittömästi sen jälkeen, kun se on poistettu lämmitysuunista. Nopealla jäädyttämisellä pyritään varmistamaan, että liuenneet aineet eivät muodosta yhdisteitä matriisissa olevien alkuaineiden kanssa, vaan pysyvät pakkotilaisina alkuainemuodossa. Tällaista liuosta sanotaan ylikylläiseksi. Ylikylläinen seos on epästabiili, koska pakkotilaiset seosaineet pyrkivät ajan myötä erkaantumaan metalliyhdisteiksi. Prosessia kutsutaan vanhenemiseksi.

T4-käsittelyssä kappaleen annetaan vanhentua luonnollisesti huoneenlämpötilassa. Toisinaan kappaleet vääntyilevät jäähtymisen aikana ja ne täytyy suoristaa. Suoristaminen on tehtävä välittömästi, koska vanhenemisprosessi alkaa heti, kun kappale on saavuttanut huoneenlämpötilan. Liuotuskäsittely lisää materiaalin sitkeyttä.

#### **T5: Kontrolloidusti jäädytetty, keinovanhennettu tai ylivanhennettu.**

Kontrolloitu jäädyttäminen jättää osan valuseoksen seosaineista ylikylläiseksi liuokseksi pakkotilaan materiaalin matriisiin sisään vastaavalla mekanismilla kuin T4 käsittelyyn kuuluva liuotushehkus. Kontrolloidun jäädyttämisen kautta muodostunut ylikylläinen liuos ei ole stabiili, vaan pakkotilassa olevat alkuaineet pyrkivät ajan myötä erkaantumaan metalliyhdisteiksi eli materiaali pyrkii vanhenemaan.

T5 käsittelyssä materiaalin luonnollista vanhenemisprosessia nopeutetaan lämmittämisen avulla. Valukappale lämmitetään tavallisesti 150 – 170 °C lämpötilaan ja sen jälkeen jäädytetään ilmassa. Kun kappaletta on pidetty tietty, materiaalin koostumuksesta riippuva aika vanhennuslämpötilassa, materiaali saavuttaa maksimilujuutensa. Tämän jälkeen lujuus alkaa pienentyä, jos lämmitystä vielä jatketaan. Lujuuden pienentyminen johtuu siitä, että lämmittämisen aikana muodostuneet metalliyhdisteiden erkaumat kasvavat kooltaan. Suuret erkaumat eivät enää lujita materiaalia, vaan päinvastoin lujuus alkaa vähentyä. Erkaumien kasvua yli lujuuden kannalta optimaalisen koon kutsutaan ylivanhenemiseksi.

#### **T6: Liuotushehkutettu ja täysin keinovanhennettu.**

Sama kuin T4, mutta vanhentaminen tehdään nopeutetusti. Täydellinen vanhennuskäsittely sisältäen kaikki kolme vaihetta: liuotushehkus, jäädytys ja keinovanhentaminen. Keinovanhennuksen jälkeen kappale jäädytetään ilmassa.

#### **T7: Liuotushehkutettu ja ylivanhennettu.**

Sama kuin T6, mutta keinovanhennuskäsittely tehdään pitempiketoisesti siten, että materiaali ylivanhenee ja maksimilujuus alkaa pienentyä.

#### **Jännitystenpoistohehkus**

Jännitystenpoistohehkus tehdään usein koneistuksen yhteydessä. Koneistus vapauttaa valamisen tai lämpökäsittelyn aiheuttamia sisäisiä jännityksiä ja kappale saattaa vääntyillä. Jännitystenpoistohehkus tehdään alumiiniseosvaluille tavallisesti 315 - 345 °C lämpötilassa 2 - 4 tunnin ajan.

#### **Painevalujen lämpökäsittelyvaihtoehdot**

Tietyissä olosuhteissa myös painevalujen lujuutta, sitkeyttä ja venyvyyttä voidaan muunnella lämpökäsittelmällä. Tavanomaisia nämä käsittelyt eivät kuitenkaan ole. Ilman liuotushehkutusta tehtävä erkautuskarkaisu T5 on riskittömin vaihtoehto. Sen avulla on mahdollista kasvattaa materiaalin myötö- ja murtorajaa ilman, että kappaleen pintaan nousee loukkuun jääneen ilman aiheuttamia

kuplia. Muissa erkautuskarkaisumenetelmissä (T4, T6, T7) kuplia saattaa syntyä, koska liuotusheh-  
kutuksessa käytetty lämpötila on melko korkea. Jos liuotushehkusvaihe otetaan mukaan, täytyy  
huolella testata, mikä on korkein mahdollinen lämpötila ja pitoaika.<sup>53</sup>

## **Pintakäsittely**

---

Alumiinivaluja käytetään monissa sovelluskohteissa ilman minkäänlaisia pintakäsittelyjä. Alumiini  
kestää hyvin korroosiota, joten korroosionestoa varten tarvitaan pintakäsittely vain harvoin. Pintakä-  
sittelyjä voidaan kuitenkin tehdä muista syistä. Niiden avulla voi muuttaa pinnan rakennetta tai väriä  
sekä parantaa kovuutta, kulutuksenkestävyyttä, korkeiden lämpötilojen kestoja tai sähköneristä-  
vyyttä.<sup>54</sup>

Alumiinivalujen pintakäsittely voi olla haasteellista, koska useissa valuseoksissa on suuri piipitoi-  
suus. Seosaineina käytetyt kupari ja magnesium voivat myös olla ongelmallisia. Seosaineet  
vaikuttavat eri tavoin. Piipitoisuus vaikuttaa esimerkiksi anodisointikerroksen paksuuteen ja kovuu-  
teen.

### **Mekaaninen pintakäsittely**

Mekaanisella käsittelyllä poistetaan ainetta kappaleen pintakerroksesta tai vaikutetaan pintakerrok-  
sen rakenteeseen siten, että pinnasta tulee tasainen, jopa kiiltävä. Aineen poistamiseen tähtääviä  
menetelmiä ovat hionta, harjaus, ainetta poistava kiillotus ja kuulapuhallus. Harjaus tai kiillotus jär-  
jestää pintakerrosta siten, että siinä olevat korkeat kohdat painuvat sisäänpäin. Mekaanista  
pintakäsittelyä voidaan käyttää joko itsenäisesti tai esikäsittelynä kemiallisille ja sähkökemiallisille  
menetelmille.<sup>55</sup>

### **Kemiallinen pintakäsittely**

Kemiallisia pintakäsittelymenetelmiä ovat peittäus, kiiltopeittäus, kemiallinen niklaus sekä reak-  
tiopinnoitusmenetelmät, kuten fosfatoi- ja kromatoi-  
ti. Piipitoisten alumiiniseosten peittäus voi  
kuitenkin tuottaa hankaluutta. Fosfatoi- ja kromatoi-  
tikäsittelyillä parannetaan korroosionkestä-  
vyyttä ja tehdään kappaleen pinnasta liukas. Kromatoi-  
tikäsittely tehdään toisinaan myös  
ulkonäkösyistä.

### **Sähkökemiallinen pintakäsittely**

Sähkökemiallisia pintakäsittelymenetelmiä ovat anodisointi, kova-anodisointi, kiiltoanodisointi ja  
kovakromaus. Anodisointi kasvattaa valukappaleen pinnassa olevan luonnollisen oksidikerroksen  
paksuutta, jolloin korroosion- ja kulumisenkestävyys paranee. Paksu oksidikerros toimii myös säh-  
köneristeenä. Kerros on hyvin tasainen ja miellyttävän tuntuinen. Anodisointia ei kuitenkaan käytetä  
painevalukappaleilla, jos tarkoituksena on pelkästään tuottaa koristeellinen pinta, koska painevalun  
pinta tummenee. Kova-anodisointi tuottaa tavallista paksumman oksidikerroksen, joka kasvattaa  
kappaleen kovuutta ja korroosionkestoa. Kovakromaus tuottaa kappaleeseen kovan ja kulumiskestä-  
vän pinnan, joka on esteettisesti miellyttävä.

---

<sup>53</sup> *Gjutlegeringar*

<sup>54</sup> *Aluminium*

<sup>55</sup> *Aluminium*



### **Muut pintakäsittelymenetelmät**

Muita pintakäsittelymenetelmiä ovat esimerkiksi maalaus, lakkaus, pinnoittaminen muovikalvolla, emalointi ja metallointi. Koska alumiini on yksinäänkin korroosionkestävää, maalausta, lakkausta ja muita pinnoitteita ei käytetä korroosiosuojina, vaan parantamaan tuotteen ulkonäköä ja muuntelemaan pinnan ominaisuuksia. Pinnoitteita voidaan käyttää myös esimerkiksi pienentämään kitkaa.<sup>56</sup>

### **Katodinen suojaus**

Katodisella suojauksella tarkoitetaan suojautumista sähkökemiallista korroosiota vastaan nk. uhrautuvaa elektroodia käyttäen. Katodinen suojaus on tarpeen esimerkiksi merellisessä ilmastossa tai muissa märissä ympäristöissä, kuten uima-altaissa ja säiliöissä. Uhrautuvaksi anodiksi valitaan jokin sähkökemiallisessa sarjassa alempana oleva aine. Magnesium ja sinkki sopivat alumiinin suojaukseen.<sup>57</sup>

## **Kappaleen jälkikäsittely**

---

### **Koneistaminen**

Useimmat alumiiniseokset ovat hyvin koneistettavia. Koneistamisen yksikkökustannus on alhainen ja tuotantovauhti suuri. Koneistusvoimat ovat pieniä. Lastut eivät kasva yhtä pitkiksi kuin esimerkiksi muovikappaleita koneistettaessa, mutta terät kuluvat nopeammin.<sup>58</sup> Lastujen pituus riippuu seoksen koostumuksesta. Alle 12 % Si sisältävät seokset muodostavat pitempiä ja kiharaisempia lastuja kuin yli 12 % Si sisältävät seokset.

Alumiiniseoksia ei voi leikata polttoleikkaamalla kuten teräksiä. Tavallisin alumiinin leikkausmenetelmä on plasmaleikkaus. Laserleikkaus on myös sopiva menetelmä.<sup>59</sup> Vesisuihkuleikkausta on kehitetty viimeisen 20 vuoden aikana ja sen käyttö alumiinisovelluksiin on lisääntymässä.<sup>60</sup>

## **Valuviat**

---

Alumiinivalujen suurin ongelma on huokoisuus. Imu- ja kaasuhuokokset ovat tavallisimmat huokostyyppit. On erittäin tärkeää määrittää, kumpi on kyseessä, koska poistamistoimenpiteet ovat lähes vastakkaisia. Tyyppi saadaan tavallisesti selville 5 – 50 -kertaisesta suurennoksesta.

### **Kaasuhuokokset**

Kaasuhuokosten pääasialliset lähteet ovat loukkuun jäänyt kaasu, vesihöyry tai palanut irrotusaine. Useimmiten aiheuttaja on loukkuun jäänyt kaasu. Kaasuhuokokset esiintyvät usein ryhmänä. Huokosten sisäseinämät ovat usein sileät ja niissä on joko matta tai kiiltävä pinta. Jos huokokset ovat tummanharmaita, syynä on voinut olla palanut ja kaasuuntunut irrotusaine.

---

<sup>56</sup> *Aluminium*

<sup>57</sup> *Aluminium*

<sup>58</sup> *Aluminium*

<sup>59</sup> *Aluminium*

<sup>60</sup> *Aluminium*

### **Imuhuokokset**

Imuhuokosia muodostuu, kun metalli muuttuu jähmettyessään tiheämmäksi. Metallia kutistuu sekä jähmettymisen että jäähtymisen aikana. Alumiinin tilavuuskutistuma on karkeasti arvioiden 4 - 5 %. Imuhuokosia muodostuu eniten kuumimpaan ja viimeiseksi jähmettyvään osaan valukappaleelta. Painevalussa valtaosa huokosista painuu kokoon suuren tiivistyspaineen vaikutuksesta. On tärkeää, että valujärjestelmä muotoillaan siten, että valuportin ympärillä olevat kappaleen osat jähmettyvät viimeiseksi. Jos valuportti tukkeutuu, tiivistyspaine ei pääse vaikuttamaan kappaleeseen.

Huokokset voivat vaikeuttaa pinnoituksen onnistumista. Ne voivat pinnoituksen esikäsitteilyn aikana täyttyä nesteellä, joka höyrystyy varsinaiseen pinnoitukseen ja muodostaa kuplia.

### **Oksidit ja kovat sulkeumat**

Alumiini reagoi nopeasti ilmassa olevan hapen kanssa ja muodostaa oksidikerroksen. Sulan alumiinin pinnalle muodostuu kalvomainen kerros, joka ehkäisee uutta oksidoitumista. Jos alumiiniseoksen magnesiumipitoisuus on korkea, muodostuu oksidien seos, joka ei suojaa yhtä tehokkaasti kuin puhdas alumiinioksidi. Alumiinioksidi muuttuu korkean lämpötilan ja paineen vaikutuksesta korundiksi, joka laskeutuu uunin pohjalle. Korundi on erittäin kovaa. Korundisulkeumat aiheuttavat ongelmia esimerkiksi koneistuksen aikana.

Uunin pintakerros rikkoontuu säännöllisesti, kun sulaa kauhotaan. Oksidikalvoja saattaa päätyä kauhon mukana sisälle valumuottiin. Oksidikalvot heikentävät valukappaleen lujuutta ja tiiveysominaisuuksia sekä synnyttävät huokosia. Oksidikalvoja muodostuu aina, kun sula sekoittuu. Sekoittumista tapahtuu esimerkiksi, kun sulaa kaadetaan sulatusuunista kuljetukseenkkaan. Oksideita voi kulkeutua sulaan myös kosteiden tai epäpuhtaiden harkkojen tai muun panoksen mukana.

Sulassa voi muodostua rautapitoisia yhdisteitä, jotka lisäävät huokoisuutta ja imuja. Jos yhdisteet kertyvät levymäisiksi muodostelmiksi, sulan juoksevuus huononee voimakkaasti. Jotta haitoilta vältetään, sulan rautapitoisuus tulisi pitää mahdollisimman pienenä ja korvata osa raudasta mangaanilla.

Kaikki, mikä alumiinisulassa ei ole metallista, on haitallista. Alumiinimatriisi ei pysty tarttumaan ei-metallisiin ainesosiin. Jokainen ei-metallinen sulkeuma heikentää lujuutta. Kovat sulkeumat huonontavat materiaalin lastuttavuutta. Lastuamistyökalut kuluvat nopeasti ja voivat jopa rikkoontua.

### **Pintaviat**

Suurin osa pintavioista on näkyviä. Useimmiten ne johtavat kappaleen hylkäämiseen jo silmämääräisen tarkastuksen aikana. Kylmäjuoksut ovat tavallisin pintavikojen ryhmä. Kylmäjuoksu syntyy, kun metalli jähmettyy ennen kuin kahdesta suunnasta tulevat sularintamat kohtaavat toisensa. Kylmäjuoksut voidaan välttää suunnittelemalla valujärjestelmä huolellisesti sekä pitämällä muotti ja sula sopivissa lämpötiloissa.

### **Kerrostumat**

Kerrostuma muodostuu, kun sulakerrokset eivät yhdisty toisiinsa täydellisesti. Tällainen tilanne syntyy, kun kerros osittain jähmettynyt ja oksidilla pinnoittunutta metallia virtaa vastaavan alemman kerroksen päältä. Kerrokset pysyvät erillisinä, vaikka ne voivatkin paikoin sulautua toisiinsa. Sulautumista tapahtuu erityisesti niissä kohdin, joissa ei ole eristävää oksidikerrosta. Kerrokset voivat takertua toisiinsa, mutta ne irtaantuvat pienelläkin voimalla. Esimerkiksi rummuttamisen aikana muodostuu jo riittäviä voimia. Jos kappaleet pinnoitetaan rummuttamisen jälkeen, pinnoitusaine tunkeutuu helposti kerrostuman väliin ja muodostaa kuplia. Kerrostumat voivat myös aiheuttaa kappaleisiin mittavirhettä.

### **Muotin syöpyä ja kuluminen**

Muotin syöpyä voi aiheutua monesta syystä: sulan nopeus, muotin ominaisuudet ja sulan lämpötila vaikuttavat kaikki osaltaan. Syöpyä ja kulumia voi muodostua myös, jos sulassa on paljon sulkeumia tai jos sulan koostumus on muuttunut epäedulliseksi. Alumiini reagoi muottipesän pinnan raudan kanssa herkästi, jos sulan rautapitoisuus laskee liian alhaiseksi. Muottipesän kuluminen on usein seurausta sekä eroosiosta että korroosiosta. Molempia ilmenee korkeissa lämpötiloissa.

### **Purseet**

Purse muodostuu, kun sulaa pääsee muotissa osaan, johon sitä ei ole tarkoitus päästää: esimerkiksi jakotasolle tai metallimuotin ulostyöntimen ympärille. Tavallisimmat syyt ovat liian korkea sulan lämpötila, liian väljä sovite muotin osien välillä sekä myös riittämätön sulkuvoima tai epätasainen aisojen jännitys painevalukoneessa. Syynä voi olla myös sulkuvoiman laskeminen väärin tai työkalun ja valukoneen kuluminen.<sup>61</sup>

## **Ainetta rikkomaton tarkastus (NDT)**

---

Ainetta rikkomattomin tarkastusmenetelmin voidaan löytää muita kuin pinnassa olevia valuvikoja. Ainetta rikkomattomin menetelmin pystytään parantamaan valukappaleiden laadun lisäksi myös valuprosessin laatua, jos vikojen syyt selvitetään ja poistetaan huolella. Tarkastusmenetelmiä on useita, mutta niillä kaikilla on rajoitteensa. Usein täytyy tehdä testejä ennen kuin löydetään sopiva menetelmä.<sup>62</sup> Menetelmän valintaan vaikuttavat esimerkiksi vian laatu, kappaleen seinämänpaksuus ja laatuvaatimukset.

Esimerkkejä tarkastusmenetelmistä:

- röntgenkuvausta käytetään paikantamaan valukappaleen sisällä olevia virheitä, kuten huokosia ja sulkeumia; tavallinen alumiinivalukappaleiden NDT -menetelmä
- ultraäänellä tutkitaan säröjä, sulkeumia ja huokosia
- tunkeumanesteellä haetaan pinnassa olevia säröjä, kerrostumia ja huokosia<sup>63</sup>

## **Energia**

---

Alumiini erotetaan bauksiitista elektrolyyttisesti. Elektrolyysiprosessi vaatii huomattavan paljon energiaa, noin 15 000 kWh alumiinitonnia kohden. Alumiinin uudelleen sulattamiseen tarvitaan paljon vähemmän energiaa.

Kun autoissa ja esimerkiksi kuljetuskonteissa käytetään teräksen ja valuraudan sijasta alumiinia tai muita kevytmetalleja, on mahdollista saavuttaa hyvinkin suuria energiasäästöjä. Jos auton paino vähenee 25 kilolla, CO<sub>2</sub> -päästöt vähenevät 3,0 g kilometriä kohden. Energiaa säästetään myös, jos kupariset sähkönjohtimet vaihdetaan alumiinisiin.<sup>64</sup>

---

<sup>61</sup> *Introduktionskurs i pressgjutning*

<sup>62</sup> *Karlebo Gjuteriteknisk handbok*

<sup>63</sup> *Aluminium*

<sup>64</sup> *Metallurgi för aluminiumlegeringar*

## Terveys ja ympäristö

---

Alumiini on eräs kaikkein yleisimmistä alkuaineista luonnossa.<sup>65</sup> Se on myrkytön ja sellaisenaan käytökelpoinen raaka-aine elintarvikepakkauksissa. Aikaisemmin uskottiin, että alumiini aiheuttaa Alzheimerin tautia, mutta syy-seuraussuhdetta ei ole pystytty osoittamaan.<sup>66</sup> Lähes kaikki ihmisen elimistöön päätyneet alumiini poistuu virtsan mukana 24 tunnin kuluessa.<sup>67</sup>

Alumiinia voi päätyä elimistöön hengitysilman mukana. Hengitetty alumiini saattaa johtaa alumiinosisiksi kutsuttuun sairauteen.<sup>68</sup> Suuri altistus voi johtaa alumiinin kertymiseen luihin. Alumiini poistuu luista hyvin hitaasti. Puoliintumisaika on useita vuosia.

Suurin alumiinin tuotantolaitosten aiheuttama ympäristöhaitta on lietteen syntyminen. Joitain ongelmia on aiheutunut kaatopaikalle päätyneestä alumiinijätteestä, mutta tieto oikeista käsittelytavoista on lisääntynyt. Kaatopaikkoja myös valvotaan ja säännellään nykyisin viranomaisten toimesta.<sup>69</sup>

Pohjaveden alumiinipitoisuus riippuu veden pH -arvosta. Alumiinipitoisuus ylittää vain harvoin 100 ml/l, mikäli pH pysyttelee arvossa noin 5,5. Alumiinin liukoisuus kasvaa, kun pH alenee.

Alumiinin raaka-ainetta, bauksiittia, louhitaan avolouhoksista. Maailmanlaajuisesti bauksiitin louhimiseen avataan vuosittain noin 40 – 50 km<sup>2</sup> uutta maa-alueita, josta noin 20 % eli 8 km<sup>2</sup> on sademetsää<sup>70</sup>. Ympäristökuormituksen vähentämiseksi louhinta tehdään jakamalla alue lohkoihin. Osa lohkoista pidetään käyttämättöminä, jotta alueen ekosysteemi palautuisi mahdollisimman nopeasti. Tavoitteena on palauttaa louhinta-alueelle normaali ekosysteemi 10 - 15 vuoden kuluessa siitä, kun louhinta on lopetettu.<sup>71</sup>

## Lähteet

---

Gjuteriteknisk handbok, Karlebo, 2004

Utbildningsmaterial: Metallurgi för aluminiumgjutlegeringar (Sv. Gjuteriföreningen 2001)

Gjutlegeringar, SMS Handbok 3, 2001

Aluminium, SIS handbok, 12:2001

EN 1706 - Aluminium och aluminiumlegeringar – Gjutgods - Kemisk sammansättning och mekaniska egenskaper

<http://www.adc-sweden.se>, 2007

Thundal, Aluminium, 1991

<http://www.tremol.com>, 2007

Utbildningsmaterial: Introduktionskurs i pressgjutning (Swecast november 2006)

---

<sup>65</sup> Gjutlegeringar

<sup>66</sup> Metallurgi för aluminiumlegeringar

<sup>67</sup> Gjutlegeringar

<sup>68</sup> Aluminium

<sup>69</sup> Aluminium

<sup>70</sup> Suomentajan korjaus alkuperäiseen tekstiin, jossa louhinta-alueen kooksi on ilmoitettu 25 km<sup>2</sup>. Korjatun tiedon lähde: <http://www.hydro.com/en/About-aluminium/Aluminium-life-cycle/Bauxite-mining>, viitattu 28.1.2015

<sup>71</sup> Aluminium

## **Linkit**

---

<http://www.aleastur.com>

<http://www.kballoys.com>

<http://www.kbmaffilips.com> (linkki vanhentunut, tarkistettu 27.1.2015, uusi linkki

<http://www.afilips.com>)

<http://www.metallurgal.com> (linkki vanhentunut, tarkistettu 27.1.2015)