

AlSi7Mg EN AC-42100 ERKAUTUSKARKAISUN OPTIMOINTI



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Konetekniikka, insinööri (AMK)

Syksy, 2022

Mikael Kuisma

Tekijä Mikael Kuisma

Vuosi 2022

Työn nimi AlSi7Mg EN AC-42100 Erkautuskarkaisun optimointi

Ohjaajat Tapio Väisänen

TIIVISTELMÄ

Alumiinivalimossa lämpökäsittely on työvaiheena yksi puhtaimmista valimotöistä. Nykyaikaiset nostolaitteet tekevät alumiinikappaleiden siirtelystä ja nostelusta kevyempää. Lämpökäsittelyä optimoitaessa pyritään löytämään sopiva lämpökäsittelyssä käytettävä lämpötila, sekä alumiinikappaleiden lämpökäsittelyaika lämpökäsittelyuuneissa. Tässä opinnäytetyössä käytettävän materiaalin lämpökäsittelyä kutsutaan erkautuskarkaisuksi, joka koostuu liuotushehkutuksesta, sammutuksesta sekä keinovanhentamisesta.

Tutkimustyön ensimmäisenä tavoitteena oli löytää materiaalin lujuusominaisuuksiin sekä kovuuteen peilaten sopivat lämpökäsittelylämpötilat. Jos lujuusominaisuuksia menettämättä voidaan siirtyä käyttämään matalampia lämpötiloja, voidaan saavuttaa parempi energiatehokkuus ja kappaleiden oikaisun tarve liuotushehkutuksen jälkeen voisi vähentyä. Opinnäytetyössä haluttiin lisäksi tutkia, voidaanko vetokoesauvan ja ohuempien alumiinikappaleiden lämpökäsittelyaikoja lyhentää. Opinnäytetyön lopuksi tutkittiin erkautuskarkaisun vaikutuksia materiaalin mikrorakenteeseen.

Opinnäytetyössä kartoitettiin lämpökäsittelyyn liittyvää teoriaa sekä sitä tapaa, jolla lämpökäsittelyjä toistaiseksi tehdään Lopen alumiinivalimolla. Lämpökäsittelyjen teoriaosuus sekä lähtötilanteen kartoitus antoivat perustan suunnitella ja testata erilaisia lämpökäsittelyjä sekä niiden vaikutusta materiaalin lujuusominaisuuksiin ja kovuuteen. Tutkimusmenetelmänä oli koesauvojen valaminen, niiden lämpökäsittelyt, sauvojen vetokokeet sekä kovuuskokeet. Aineenkoetuskokeilla voitiin tutkia lämpökäsittelyn vaikutusta lujuuteen ja kovuuteen, jolloin päästiin optimoimaan käytettäviä lämpötiloja.

Avainsanat Lämpökäsittely, erkautuskarkaisu, liuotushehkutus, sammutus, keinovanhennus, vetokoe

Sivut 62 sivua ja liitteitä 4 sivua

ABSTRACT

In the aluminum foundry, heat treatment is one of the cleanest foundry works. Modern lifting equipment makes moving and lifting aluminum pieces easier. When optimizing the heat treatment, the aim is to find the suitable temperature used in the heat treatment, as well as the heat treatment time of the aluminum pieces in the heat treatment ovens. The heat treatment of the material used in this thesis is called tempering, which consists of solution annealing, quenching, and artificial aging.

The first goal of the research was to find suitable heat treatment temperatures for the strength properties and hardness of the material. If it is possible to switch to lower temperatures without losing strength properties, better energy efficiency could be achieved and the need to straighten the pieces after solution annealing could be reduced. The thesis also wanted to investigate whether the heat treatment times of the tensile test rod and thinner aluminum pieces can be reduced. At the end of the thesis, the effects of injection hardening on the microstructure of the material were investigated.

In the thesis, the theory related to heat treatment was mapped, as well as the way in which heat treatments are currently carried out at Loppi aluminum foundry. The theory part of heat treatments and the mapping of the initial situation provided the basis for planning and testing different heat treatments, as well as their effect on the material's strength properties and hardness. The research method was the casting of test rods, their heat treatments, tensile tests of the rods, and hardness tests. With material testing tests, it was possible to study the effect of heat treatment on strength and hardness, which allowed us to optimize the temperatures used.

Keywords Heat treatment, optimization, tensile test

Pages 62 pages and appendices 4 pages

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Yritysesittely	1
1.2	Opinnäytetyön esittely	2
2	Valaminen, sulan käsittely, sekä hiekkavalu	3
3	AlSi7Mg EN AC-42100 materiaalina	5
3.1	Toimitustilojen, sekä valumenetelmien tunnuksset	8
3.2	EN AC-42100 nimikkeiden vertailua	10
3.3	Alumiini valuseoksen jähmettyminen	11
4	Alumiiniseosten lämpökäsittelyt	13
4.1	Tasaushehkus	14
4.2	Jännityksenpoistohehkus	14
4.3	Pehmennyshehkus	15
4.4	Erkautuskarkaisu	15
5	Vetokoe	19
5.1	Termistöä	22
5.2	Jännitysvenymäkäyrä	24
6	Käsitteet	29
6.1	Lujuus käsitteenä	29
6.2	Kovuus käsitteenä, sekä Brinellin kovuus (HBW)	30
6.3	Sitkeys käsitteenä	32
7	Mikroskopia ja hien valmistus	33
8	Lämpötilan mittaaminen, sekä säätö	34
9	Lämpökäsittelyn laatu, kunnossapito, sekä kustannukset	35
10	Lämpökäsittelyiden ympäristövaikutukset	37
11	Erkautuskarkaisun lähtötilanne	39
11.1	Liutushehkus	39
11.2	Sammutus	42
11.3	Keinovanhentaminen	43
12	Testit, mikrorakenne, sekä tulokset	44
12.1	Testi 1: Liutushehkuslämpötilan optimointi	48
12.1.1	Koemenetelmät	48
12.1.2	Tulokset	49
12.2	Testi 2: Keinovanhennuslämpötilan optimointi	51

12.2.1 Koemenetelmät.....	51
12.2.2 Tulokset	52
12.3 Testi 3: Lämpökäsittelyaikojen optimointi.....	54
12.3.1 Koemenetelmät.....	54
12.3.2 Tulokset	55
12.4 Erkautuskarkaisun vaikutus AlSi7Mg EN AC-42100 mikrorakenteeseen.....	56
12.4.1 Tutkimusmenetelmät	56
12.4.2 Tulokset	58
12.5 Tulosten tarkastelu, pohdinta ja johtopäätökset	60
Lähteet.....	63

Kuvat, taulukot ja kaavat

Kuva 1. Alteams Finland Oy Lopen alumiinivalimon toimistorakennus.....	2
Kuva 2. Al-Si tasapainopiirros ja mikrorakenteet (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).....	12
Kuva 3. Al-Si Valuseoksien mikrorakenne (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).....	14
Kuva 4. Alumiiniseosten lämpökäsittely (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).....	16
Kuva 5. Erkautuskarkaisu-lujittaminen (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).....	19
Kuva 6. Vetokoesauvan käyttäytyminen vetokokeen aikana (Lepola, P. & Makkonen, M., 2000, s. 46).	22
Kuva 7. Jännitysvenymäkäyrä (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 26).	25
Kuva 8. Myötörajojen määrittäminen (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 27).	26
Kuva 9. 0,2-venymärajan määrittäminen vetokokeella seokselle, jolla ei ilmene selvää myötörajaa (Lepola, P. & Makkonen, M., 2000, s. 47).	27
Kuva 10. Brinellin kovuuskokeen suoritusperiaate (SFS-EN ISO 6506-1, 2014, s. 7).	31
Kuva 11. Kerroksittain panostettu häkki.	40
Kuva 12. Pohjalle panostettu häkki.	41
Kuva 13. Liuotushehkutusuuni 1.	41
Kuva 14. Sammutusallas nro.1.	42

Kuva 15. Keinovanhennusuuni.	44
Kuva 16: Vetokoesauvojen muotin valmistukseen käytetty puinen malli.	45
Kuva 17: Valetut hiekkamuotit.	46
Kuva 18: Valetut vetokoesauvat muotista purettuna.	46
Kuva 19: Valmis vetokoesauva.	47
Kuva 20: Galdabini Q200-vetokone (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen (Metlab), henkilökohtainen tiedonanto, 14.10.2022).	47
Kuva 21: Brinellin kovuuskone, Metlab.	48
Kuva 22: Vannesaha, Metlab.	57
Kuva 23: Hiomakoneet, Metlab.	57
Kuva 24: Optinen mikroskooppi Zeiss Axio Observer Z1m, Metlab.	58
Kuva 25: EN AC-42100 Valutilainen mikrorakenne (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen (Metlab), henkilökohtainen tiedonanto, 19.10.2022).	59
Kuva 26: EN AC-42100 Liotushehkutettu mikrorakenne (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen (Metlab), henkilökohtainen tiedonanto, 19.10.2022).	59
Kuva 27: EN AC-42100 Erkautuskarkaistu mikrorakenne (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen (Metlab), henkilökohtainen tiedonanto, 19.10.2022).	60
Taulukko 1. Alumiiniseoksen EN AC-42100 kemiallinen koostumus (SFS-EN 1706, 2020, s. 9).	5
Taulukko 2. Alumiiniseoksen EN AC-42100 fysikaaliset ominaisuudet (Huhtaniemi ym., 2002, s. 219).	7
Taulukko 3. Liotushehkutusaika eri seinämänpaksuuksille (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).	17
Taulukko 4. Karkaisutiedot (Huhtaniemi ym., 2002, s. 220).	17
Taulukko 5. Hiekkavaluseosten erillään valettujen koesauvojen mekaaniset ominaisuudet (SFS-EN 1706, 2020, s. 13).	20
Taulukko 6. Tunnukset ja lyhenteet (SFS-EN ISO 6506-1, 2014, s. 5–6).	32
Taulukko 7: Liotushehkutuslämpötilan mittauspöytäkirja.	50
Taulukko 8: Testi 1: Testipöytäkirja.	50
Taulukko 9: Testi 1: Keskiarvotaulukko.	51
Taulukko 10: Keinovanhennuslämpötilan mittauspöytäkirja.	53

Taulukko 11: Testi 2: Testipöytäkirja.....	53
Taulukko 12: Testi 2: Keskiarvotaulukko.	53
Taulukko 13: Testi 3: Testipöytäkirja.....	55
Taulukko 14: Testi 3: Keskiarvotaulukko.	55
Kaava 1: Suhdesauva (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 14).	21
Kaava 2. Murtokurouma (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 9).	23
Kaava 3. Kimmokerroin (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 11).....	24
Kaava 4. Murtolujuus (Kotilainen, H. & Rantanen, M., 1981, s. 14).	27
Kaava 5. Murtovenymä (Kotilainen, H. & Rantanen, M., 1981, s. 14).	28
Kaava 6. Tasavenymä (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 22).....	28

Liitteet

Liite 1	Testi 1: Testausseloste
Liite 2	Testi 2: Testausseloste
Liite 3	Testi 3: Testausseloste
Liite 4	Mikroskopiattutkimusten testausseloste

1 Johdanto

Johdannossa on kerrottu yrityksestä, joka toimi opinnäytetyön toimeksiantajana, sekä esitelty opinnäytetyö.

1.1 Yritysesittely

Olavi Piha kuvaa kirjassaan Suomen valimoteollisuus sivulla 373 Lopen alumiinivalimon historiaa perustamisvuodesta 1955 aina vuoteen 1995 asti. 2000-luvun alkupuolen vaiheiden jälkeen vuonna 2015 perustettiin yritys nimeltään Alteams Finland Oy, jonka toimipisteitä ovat Lopen, sekä Laihian valimot.

Alteams palvelee suurta joukkoa asiakkaita, kuten ABB, Cummings, Valmet, Wärtsilä, sekä monia muita. Tuotteita tehdään mm. ajoneuvoteollisuuden tarpeisiin moottoreiden, sekä vaihdelaatikoidenosiin. Elektroniikkateollisuuden kotelarakenteet ovat myös merkittävä tuoteryhmä. Vuonna 2020 Lopen alumiinivalimolla oli 60 tehdastyöntekijää, sekä 8 toimistotyöntekijää. Vuonna 2020 Alteams Finlandin nettomyynti oli 16 miljoonaa euroa. Lopen alumiinivalimo tarjoaa monia palveluja, kuten tuotteiden optimointia, valusimulaatioita, sekä prototyyppien tekoa. Tuotesuunnittelussa hyödynnetään nykyaikaista 3D-suunnittelua. Laadunvalvonnassa käytetään mm. vetokokeita, kovuusmittauksia, sekä tiiveyskokeita. Lopen alumiinivalimolla tehdään furaanihiekkavaluja, kuorimuottivaluja, kokillivaluja, sekä matalapainevaluja. Kuvassa 1 on esitetty Lopen alumiinivalimon toimistorakennus. (Alteams Finland Oy, 2021, s. 3–19)

Kuva 1. Alteams Finland Oy Lopen alumiinivalimon toimistorakennus.



1.2 Opinnäytetyön esittely

Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää materiaalin lujuusominaisuudet huomioiden optimaaliset lämpötilat kolmivaiheiselle lämpökäsittelylle, jota kutsutaan erkautuskarkaisuksi. Erkautuskarkaisu koostuu liotusherkutuksesta, sammutuksesta, sekä keinovanhentamisesta. Tavoitteena oli siis optimoida lämpökäsittelyissä käytettäviä lämpötiloja. Opinnäytetyöni hyöty voi konkretisoitua yritykselle uunien parantuneena energiatehokkuutena, jos lämpötilaa voidaan madaltaa ja/tai käytettyjä uunitusaikoja pienentää. Tutkimuskysymyksenä on: ”Voidaanko lämpökäsittelyä optimoimalla saada aikaan säästöjä”?

Opinnäytetyössäni kartoitetaan lämpökäsittelyjen teoriaa, kartoitetaan erkautuskarkaisun nykytilannetta yrityksessä, sekä lopuksi pyritään optimoimaan erkautuskarkaisussa käytettäviä lämpötiloja ja pienempien alumiinivalujen lämpökäsittelyaikoja. Liotusherkutuslämpötilan laskeminen voisi esimerkiksi vähentää valukappaleiden oikaisun tarvetta ja ohuilla kappaleilla yksi tai jopa kaksi ylimääräistä uunituskertaa vuorokaudessa toisi myös säästöjä yritykselle ja tehostaisi tuotantoa. Työn lopuksi tutkitaan erkautuskarkaisun vaikutuksia alumiinin mikrorakenteeseen mikroskopian avulla. Erkautuskarkaisuun liittyvää työturvallisuutta ei tässä opinnäytetyössä käsitelty.

2 Valaminen, sulan käsittely, sekä hiekkavalu

Kun sulaa metallista materiaalia kaadetaan muottiin, niin voidaan puhua valamisesta tai valusta. Tuotetta valmistettaessa valamalla sula saatetaan muottiin kaatamalla tai paineella. Sula kulkeutuu muottiin ja jähmettyessään se muodostaa halutunlaisen kappaleen. Valaminen soveltuu erikokoisten kappaleiden valmistukseen. (Kivivuori, S., 2016, s. 154)

Alumiini on valuraudan jälkeen toiseksi käytetyin valumateriaali. Valetun alumiinin etuja ovat mm. painonsäästö, värähtelynvaimennus, hyvä sitkeys, dynaaminen lujuus, muovattavuus, sitkeys matalissa lämpötiloissa, kulumiskestävyys, valmistusmenetelmän taloudellisuus, hitsaaminen teräkseen tai kupariin siirtymäkappaleen avulla, hyvä lämmönjohtavuus, hyvä lämpökapasiteetti, palamattomuus, korroosionkesto jopa merivedessä, hyvät heijastusominaisuudet, myrkyttömyys, lastuttavuus, sekä kierrätettävyys. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 222—223). Alumiini murtuu sitkeästi matalissakin lämpötiloissa (Haurasmurtuma, 2016).

Sula alumiini hapettuu, sekä absorboi vetyä, kun lämpötilaa kasvatetaan. Laadun takaamiseksi sula käsitellään, sekä puhdistetaan. Käsittelyyn, sekä puhdistukseen on olemassa useita menetelmiä. Raekoko voidaan pienentää suolavalmisteilla tai titaani-booriseoksilla. Suolavalmisteet ovat titaani-boori-pitoisia ja titaani-boori-seokset ovat alumiinipohjaisia. Lisätyt aineet helpottavat valettavuutta. Raekoon pienentäminen parantaa kuumahalkeilunkestokykyä, tekee materiaalista lämpökäsiteltävän, kaasutiiviin ja antaa materiaalille hyvät mekaaniset ominaisuudet. Alumiinipiiseoksilla voidaan suorittaa piifaasin modifiointi natriumin ja sontriumin avulla. Modifioinnin avulla murtovenymä kasvaa. Argonin tai typen avulla voidaan sulalle tehdä huuhtelu vedyn poistamiseksi. Huuhtelun sijaan voidaan myös käyttää typpitabletteja. Kaasunpoistokäsittelyn myötä materiaaliin jää vähemmän kaasuhuokosia, jolloin lujuus, sekä sitkeys paranevat. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 221)

Tehdaspäällikkö Sami Oksasen (haastattelu 28.06.2021) kertoman mukaan Lopen alumiinivalimolla on käytössä neljä valumenetelmää, jotka ovat hiekkavalu, kuorikaavaus, matalapainevalu, sekä kokillivalu. Matalapainevalu, sekä kokillivalu tehdään

teräsmuotteihin. Tässä opinnäytetyössä käsitellään tarkemmin eniten käytettyä valumenetelmää, joka on hiekkavalu. Muut valumenetelmät sivuutetaan.

Vanha ja paljon käytetty menetelmä on hiekkavalu, joka soveltuu teollisuuden käyttöön ja menetelmällä voidaan valmistaa vaikkapa koneenosia. Käytetty muottihiekka koostuu hiekan lisäksi sideaineesta ja syntynyt seos toisintaa muotoja tarkasti. Saavutettava muodon tarkkuus on seurausta hiekan raekoosta ja muotintäyttötavasta. Usein sideaineena käytetään hartsia, joka on kemiallisesti kovettuvaa. Muottipinnat voidaan maalata peitosteella, joka kestää korkeita lämpötiloja. Peitoste estää hiekkaa palamasta kiinni valukappaleeseen. (Kivivuori, S., 2016, s. 155)

Hiekkavalussa ensin tehdään tavallisesti kaksiosainen malli, jolloin muotin puoliskot valmistetaan erikseen. Malli voidaan valmistaa esimerkiksi puusta ja sen tulee kestää vääntymättä muottia valmistettaessa, sekä varastoinnissa. Muotti valmistetaan muottihiekasta, joka saadaan tiiviiksi käsin sullomalla ja täryttämällä. Yläpuolisen mallin muottiin sijoitetaan valukanavan, sekä kaasukanavien mallit ennen muotin täyttöä. Valukappaleesta saadaan tarvittaessa ontto käyttämällä keernaa. Monimuotoisessa kappaleessa keernoja voi olla useita. Kun hiekka on kovettunut malliin muottipuoliskot irroitetaan malleistaan. Peittauksen jälkeen keernat sijoitetaan paikalleen ja muotinpuoliskot liitetään toisiinsa. Seuraavaksi muotti kuljetetaan valupaikalle valua varten. Kun kappale on valun jälkeen jäähtynyt tarpeeksi muotissa, niin muotti puretaan ja valukappale poistetaan. (Kivivuori, S., 2016, s. 155)

Valamiseen voidaan käyttää alumiiniharkkoja tai kierrätysromua, joita voidaan myös kutsua primäärialumiiniksi, sekä sekundäärialumiiniksi. P-tunnus tarkoittaa, että kyseessä on primäärimetalli, joka on elektrolyttisesti valmistettua ja sisältää sekundäärialumiinia vähemmän rautaa, sekä kuparia. Primäärialumiinilla saavutetaan parempi venymä ja korroosionkesto, kuin sekundäärialumiinilla. AlSi-seos on helppo valettava, sillä pii tekee sulasta juoksevan. AlSi-seoksen muotintäyttökyky on hyvä. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 216). Hyvää sitkeyttä tavoiteltaessa voidaan valita primäärialumiinista valmistettu seos AC-42100 (Huhtaniemi ym., 2002, s. 217).

3 AlSi7Mg EN AC-42100 materiaalina

Materiaalin nimikkeet kirjoitetaan vaikkapa valuseokselle EN AC-42100. A tarkoittaa alumiinia, C valuseosta. Numerotunnus 42100 on seoskohtainen. Valuseoksilla on viisinumeroinen nimike. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 231). Valuseoksen nimikkeessä oleva ensimmäinen numero kertoo pääseosaineen. 40000-sarjan alumiineilla pääseosaineena on pii. Muokattavilla alumiiniseoksilla nimike on nelinumeroinen. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 62)

Yleisin karkeneva alumiiniseos on alumiini-magnesium-pii, jossa magnesium ja pii tekevät seoksesta karkenevan. Seoksella, jossa on 1,3 % Mg_2Si -partikkelia tapahtuu seosaineiden liukeneminen 500...580 asteen lämpötilassa. Korkeammissa lämpötiloissa seos sulaa. Sammutuksen ja vanhentamisen jälkeen Mg_2Si -partikkelit muodostavat erkaumia uudestaan. AlMgSi-seoksia voidaan keinovanhentaa tai antaa materiaalin vanheta luonnollisesti. Seoksella saavutettavat lujuusominaisuudet vaihtelevat keskinkertaisen ja hyvän välillä. Korroosionkesto on erittäin hyvä. Muovattavuus on hyvä, joten profiilien pursottaminen on mahdollista. Hitsattavuus on myös hyvä. Seostyyppillä saavutetaan hyvä lujuuden ja korroosionkeston yhdistelmä. Seos soveltuu rakennuskohteisiin, sekä ajoneuvojen ja laivojen kantaviin osiin. Materiaalilla on hyvä sähkön- ja lämmönjohtavuus. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 58)

Al-Si-seoksia ei voi lämpökäsitellä, ellei seokseen lisätä magnesiumia, mangaania, kuparia, rautaa tai nikkeliä. Tavoitteena on luoda seoksia, joissa voi tapahtua erkautuslujittumista, joka edellyttää myös keinovanhennusta. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 232—233).

AlSi7Mg EN AC-42100 kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 1:

Taulukko 1. Alumiiniseoksen EN AC-42100 kemiallinen koostumus (SFS-EN 1706, 2020, s. 9).

Seosryhmä	Seoksen nimike	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Pb %	Sn %	Ti %	Alumiini
AlSi7Mg	EN AC-42100	6,5...7,5	0,19	0,05	0,1	0,25...0,45	0	0	0,07	0	0	0,25	Loput

AlSi7Mg EN AC-42100 on materiaalina teräkseen verrattuna kevyt, sen lujuusarvojen suhde painoon verrattuna on hyvä. Alumiinilla on hyvä korroosionkesto, sekä hyvä sähkön- ja lämmönjohtavuus. Alumiiniseoksia on helppo koneistaa, AlSi-seoksilla on hyvä valettavuus ja niiden pääseosaineena on pii. Alumiinilla on hyvä sitkeys ja materiaali on helppo kierrättää.

AlSi-seokset ovat loistavia valuseoksia, sillä pii antaa kiteytyessään virtaavaa sulaa ja parantaa sulan juoksevuuutta. Puhdas alumiini kutistuu lämpötilan laskiessa noin 7,5 %, mutta koska pii laajenee jähmettyessään noin 10 %, niin seostuksella kokonaiskutistumaa voidaan alentaa noin 4 %:iin. Ilman piin laajenemisen vaikutusta AlSi-seoksilla olisi suurempi taipumus kutistumahuokoisuuteen ja kuumarepeilyyn. (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).

Alumiinista valmistettujen valettujen tuotteiden korroosionkesto perustuu ehjään passivoivaan oksidikalvoon kappaleen pinnalla. pH-arvoilla 4...9 oksidikalvo on passiivinen ja korroosio on hidasta. Kemiallinen ympäristö, lämpötila, sekä seostus vaikuttavat korroosionkestävyyteen. Rauta ja kupari vaikuttavat korroosionkestoan negatiivisesti. Magnesium, sekä pii vaikuttavat korroosionkestoan positiivisesti. Jos alumiini koskettaa jalompaa metallia, niin voi syntyä ns. galvaaninen korroosio. Teräs, sekä kupari aiheuttavat selkeää syöpymistä alumiiniseen rakenteeseen. Sinkki luo katodisen suojan alumiinille. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 219)

Pii (Si) seosaineena siis pienentää jähmettymiskutistumaa, mutta lisäksi se parantaa sulan juoksevuuutta, sekä vähentää taipumusta kuumarepeilyyn. Pii ei liukene alumiiniin eikä myöskään reagoi alumiinin kanssa vaan esiintyy erillisinä piikiteinä. Magnesium (Mg) reagoi piin kanssa ja parantaa lämpökäsiteltävyyttä. Suurina määrinä magnesium huonontaa materiaalin sitkeysominaisuuksia, sekä hapettuessaan se voi huonontaa sulan juoksevuuutta. Rauta (Fe) aiheuttaa metallien välisiä yhdisteitä, jotka voivat aiheuttaa sitkeysominaisuuksien alenemista. Seosaineena rauta nostaa lujuusominaisuuksia, huonontaa valettavuutta, muodostaa pohjasakkaa, sekä liukenee alumiiniin. Mangaani (Mn) liukenee 0,3...0,5 % alumiinin sekaan. Mangaani vähentää raudan haurastumista aiheuttamaa vaikutusta, sekä muodostaa pohjasakkaa. Kupari (Cu) liuoslujittaa aina kuparipitoisuuden noustessa 2 % asti. Kupari erkautuskarkenee, pienentää jähmettymiskutistumista, parantaa juoksevuuutta, pienentää kaasujen liukenemista, sekä vaikuttaa heikentävästi korroosionkestoan. Nikkeli (Ni) ei liukene sulan sekaan vaan muodostaa yhdisteitä eli sakkaa. Nikkeli parantaa korkean lämpötilan lujuusominaisuuksia, sekä heikentää yli 12,5 % piitä (Si) sisältävien seosten valuominaisuuksia. Sinkki (Zn) liukenee alumiiniin eikä se liuoslujita. Sinkki parantaa venymää 2 % pitoisuuteen saakka, parantaa juoksevuuutta, sekä aiheuttaa yli 5 % pitoisuuksina kuumahaurautta. Sinkki muodostaa

yhdisteitä magnesiumin (Mg) ja piin (Si) kanssa. Lyijy (Pb), sekä tina (Sn) eivät liukene tai muodosta yhdisteitä alumiinin kanssa. Lyijy, sekä tina ovat puhtaina metalleina raerajoilla ja niiden pitoisuudet on rajoitettu pieneksi. Titaani (Ti) hienontaa raekokoa, kasvattaa lujuutta, parantaa sitkeyttä, sekä juoksevuuatta. Lisäksi titaani vähentä kuumahauraustaipumusta, sekä voi heikentä materiaalin soveltuvuutta koneistukseen. (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).

Seostamalla piitä (Si), kuparia (Cu), magnesiumia (Mg), sekä sinkkiä (Zn) saadaan materiaali lujemmaksi. Alumiinin väsymislujuus on vain 35...55 % sen murtolujuudesta. Virumisilmin takia materiaalin korkein käyttölämpötila rajoittuu 200...250 C lämpötilaan. Hyvä korroosionkesto perustuu alumiinin pintaan syntyvään oksidikerrokseen. Alumiiniseosten väsymislujuus alenee huomattavasti syvyttviss olosuhteissa. (Björk ym., 2014, s. 100). Seoksen EN AC-42100 fysikaalisia ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Alumiiniseoksen EN AC-42100 fysikaaliset ominaisuudet (Huhtaniemi ym., 2002, s. 219).

Seos EN AC-	Tiheys g/cm ³	Lmplajenemiskerroin 1/K	Sähkönjohtavuus MS/m	Lämmönjohtavuus W	Väsymislujuus MPa	Kimmomoduuli MPa
42100	2,7	22x10 ⁻⁶	21-27	160-180	80-110	75 000

Virumisilmin aiheuttaa alumiinin alhainen sulamispiste (658 C) ja materiaalin lujuus paranee, kun lämpötila laskee alle huoneenlämpötilan. Alumiinilla ei esiinny kylmhaurastumista aiheuttavaa lämpötilaa. (Björk ym., 2014, s. 109). AlSi7Mg EN AC-42000 puuroalue on 550–625C (Huhtaniemi ym., 2002, s. 77). Aineen faasimuutoksia kuvattaessa solidus (kiinteä) ja likvidus (sula) eivät aina ole sama viiva vaan niiden väliin saattaa jäädä aukko, joka on niin sanottu puuroalue. Puuroalueella aine ei ole stabiili kiinteänä tai nesteen. Puuroalueella aineen toiset komponentit ovat kiinteässä ja osa sulassa tilassa. (Solidus (faasimuutokset) 2013).

Alumiinivaluseoksen kimmomoduuli on kolmasosa teräksen kimmomoduulista.

Alumiiniseoksilla on kaksinkertainen pituuden lmplajenemiskerroin verrattuna teräksiin. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 218–219)

Pienempi raekoko nostaa lujuutta, koska raeraja estää dislokaation liikettä. Raekoon pienentäminen nostaa iskusitkeyttä ja pienentää transitiolämpötilaa. Murtokurouma, sekä venymä kasvavat isommalla raekoolla. Raekokoon voidaan vaikuttaa seosaineilla, jotka estävät rakeen kasvua. Seosaineet vaikuttavat liuenneena tai erkaumina. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 22—23)

3.1 Toimitustilojen, sekä valumenetelmien tunnuks

Tila tarkoittaa, että metallia on työstetty tai lämpökäsitelty, jolloin metallilla on tietynlainen rakenne, ja ominaisuudet (SFS-EN 515, 2017, s. 4).

Lämpökäsittelytiloille käytettävät tunnuks:

- F tarkoittaa, että kappale on valutilassa. Valmistuksessa ei käytetä lämpötilan valvontaa eikä materiaalia ole muokauslujitettu. (SFS-EN 515, 2017, s. 6)
- O tarkoittaa, että valettu kappale on hehkutettu. Saavutetaan pienin lujuus. (SFS-EN 515, 2017, s. 6)
- O1 tarkoittaa, että kappale on pehmeäksi hehkutettu, sekä hitaasti jäähdytetty. Tuotetta on tarkoitus työstää ennen liuotushehkutusta. (SFS-EN 515, 2017, s. 6)
- O2 tarkoittaa, että kappale on termomekaanisesti käsitelty. Tuotetta on tarkoitus muovata superplastisesti ennen liuotushehkutusta. (SFS-EN 515, 2017, s. 7)
- O3 tarkoittaa, että materiaali on homogenisoitu. Tunnusta käytetään jatkuvavaletuille vetoaihioille tai nauhoille. O3 tarkoittaa, että liuotuskäsittelyssä vähennetään erkaumia, jolloin muovattavuus, sekä liuotushehkutettavuus paranevat. (SFS-EN 515, 2017, s. 7)
- H tarkoittaa, että kappaletta on muokauslujitettu. Tuotetta on kylmämuokattu hehkutuksen/ kuumamuokkauksen jälkeen. Voidaan myös tarkoittaa tuotetta, jota on kylmämuokattu, sekä osittain hehkutettu tai stabiloitu haluttujen mekaanisten ominaisuuksien saavuttamiseksi. H kirjaimen jälkeen tulee aina vähintään kaksi

merkkiä, jossa ensimmäinen tarkoittaa peruskäsittelyiden yhdistelmää, toinen muokkauslujittamisasteen, sekä kolmas tarkoittaa tilan muunnelmaa. (SFS-EN 515, 2017, s. 6)

- W tarkoittaa, että materiaalia on liuotushehkutettu. Tunnusta käytetään ainoastaan seoksille, jotka vanhenevat huoneenlämpötilassa, kun liuotushehkutus on tehty. (SFS-EN 515, 2017, s. 6)
- T1 tarkoittaa, että kappale on jäähdytetty, sekä luonnollisesti vanhennettu (SFS-EN 515, 2017, s. 9).
- T2 tarkoittaa, että kappale on jäähdytetty korkeassa lämpötilassa tapahtuneesta muokkauksesta. Materiaali on kylmämuokattu, sekä luonnollisesti vanhennettu. (SFS-EN 515, 2017, s. 9)
- T3 tarkoittaa, että kappale on liuotushehkutettu, kylmämuokattu, sekä luonnollisesti vanhennettu. (SFS-EN 515, 2017, s. 9)
- T4 tarkoittaa, että on tehty liuotushehkutus, sekä luonnollisesti vanhennettu (SFS-EN 515, 2017, s. 10).
- T5 tarkoittaa, että kappale on jäähdytetty korkeassa lämpötilassa tapahtuneesta muokkauksesta, sekä keinovanhennettu tai ylivanhennettu (SFS-EN 515, 2017, s. 10).
- T6 tarkoittaa, että kappale on liuotushehkutettu ja täysin keinovanhennettu (SFS-EN 515, 2017, s. 10).
- T64 tarkoittaa, että kappale on liuotushehkutettu ja keinovanhennuksella alivanhennettu (SFS-EN 515, 2017, s. 16).
- T7 tarkoittaa, että kappale on liuotushehkutettu, sekä keinovanhennuksella ylivanhennettu. Edellä mainittua kutsutaan myös stabiloinniksi. (SFS-EN 515, 2017, s. 10)

- T8 tarkoittaa, että kappale on liuotushehkutettu, kylmämuokattu, sekä keinovanhennettu (SFS-EN 515, 2017, s. 10).
- T9 tarkoittaa, että kappale on liuotushehkutettu, keinovanhennettu, sekä kylmämuokattu (SFS-EN 515, 2017, s. 10).
- T10 tarkoittaa, että on tehty jäähditys korkeassa lämpötilassa tapahtuvasta muokkauksesta, jonka jälkeen kappale on kylmämuokattu, sekä keinovanhennettu. (SFS-EN 515, 2017, s. 10)

Liuotushehkutuksen jälkeen tehdään sammutus korkeasta lämpötilasta, jolloin voi syntyä muodonmuutoksia kappaleeseen. (SFS-EN 1706, 2020, s. 7)

Valumenetelmille käytetään tunnuksia seuraavasti:

- S tarkoittaa, että valu on toteutettu hiekkavaluna.
- K tarkoittaa, että valu on toteutettu kokillivaluna.
- D tarkoittaa, että valu on toteutettu painevaluna.
- L tarkoittaa, että valu on toteutettu tarkkuusvaluna.

Esimerkiksi EN 1706 AC-42100-S-T6 on hiekkavaletun, liuotushehkutetun, sekä täysin keinovanhennetun seoksen EN AC-42100 täydellinen nimike. (SFS-EN 1706, 2020, s. 8)

3.2 EN AC-42100 nimikkeiden vertailua

Alumiinivaluseoksille on annettu erilaisia nimikkeitä. Samalle alumiiniseokselle on olemassa erilaisia nimikkeitä eripuolilla maailmaa. Tässä luvussa on kuvattu Suomessa tunnetun EN AC-42100 valuseoksen erilaisia nimikkeitä. (SFS-EN 1706, 2020, s. 24)

EN numeerinen nimike: EN AC-42100

EN kemialliseen koostumukseen perustuva: EN AC–Al Si7Mg0,3

Vastaava ISO-nimike: Al Si7Mg0,3

AA- nimike (Aluminium Association): A356.0

JIS- nimike (Japanese Industrial Standard): AC4CH

(SFS-EN 1706, 2020, s. 24)

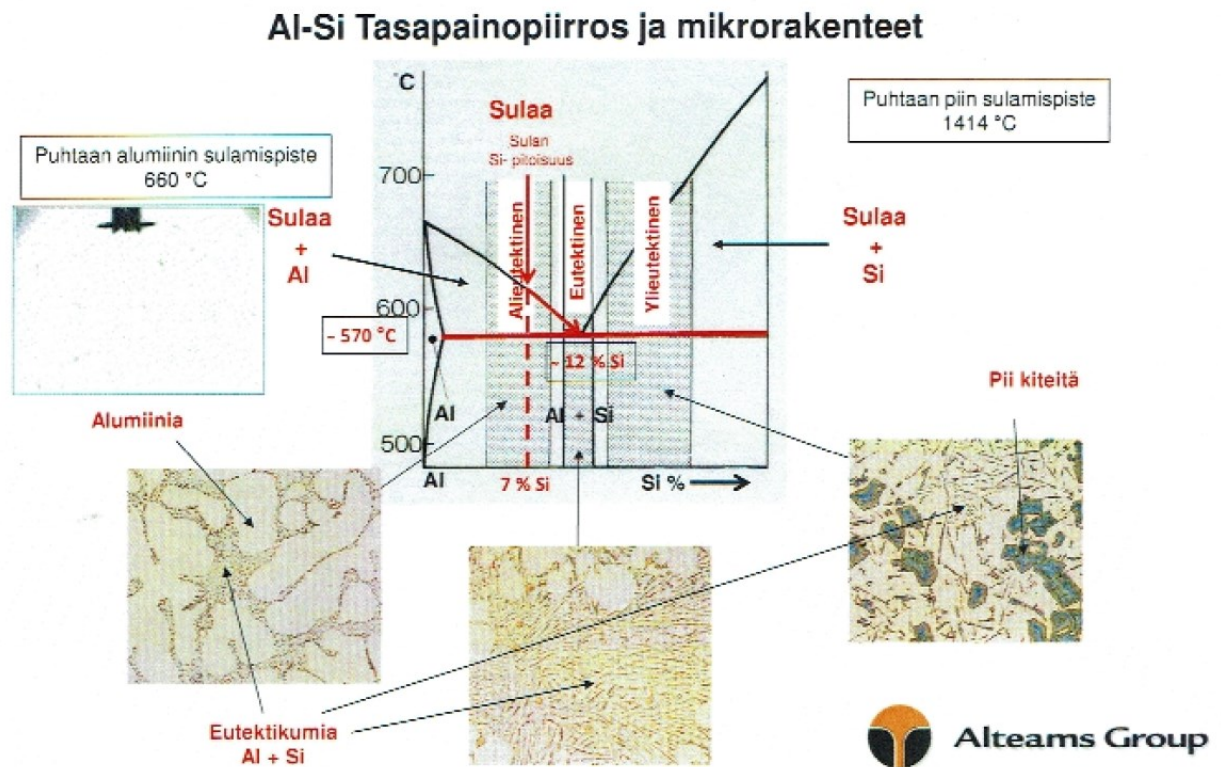
Alumiiniseoksia voidaan luokitella sen mukaan, onko kyseessä muokattava vai valettava seos. Alumiinista valmistettavia valutuotteita voidaan valmistaa vaikkapa hiekka-, kokilli-, sekä painevaluna. 4000-sarjan alumiineissa on pääseosaineena pii. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 231)

3.3 Alumiini valuseoksen jähmettyminen

Seos sisältää vähintään kahta alkuainetta, joita ei voi erottaa. Seosaine on alkuaine, jonka pitoisuus on määritelty haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Valuseos tarkoittaa valukappaleiden valmistukseen tarkoitettua seosta. (EN 12258-1, 2012, s. 9–10)

Al-Si Tasapainopiirros ja mikrorakenteet on esitetty kuvassa 2, joka löytyy Esa Suikkasen tekemästä Alteamsin sisäisestä sula- ja lämpökäsittelykoulutusmateriaalista sivulta 20. AlSi7 Mg valuseoksen jähmettymislämpötila on 620...550 °C (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).

Kuva 2. Al-Si tasapainopiirros ja mikrorakenteet (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).



AlSi7Mg seoksen jähmettyessä aluksi alumiinipartikkelit, dendriitit syntyvät sulaan n.600...630 °C:ssa. Alumiini kiteytyy, jolloin loppusulan Si-pitoisuus kasvaa aina noin 12 %:iin saakka. Seuraavaksi ja samanaikaisesti muodostuu rautapitoisia Al₅FeSi partikkeleita alumiinikiteiden sekaan. Jähmettymisen tapahtuessa hitaasti rautapitoiset partikkelit kasvavat suuremmiksi alentaen materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. Alumiinia ja rautapitoisia partikkeleita syntyy lisää niiden kasvaessa aina n.570 °C lämpötilaan saakka. Syntyneiden kiteiden väliin jää sulaa metallia. Syntyneen sulan Si-pitoisuus on noin 12 %. Noin 550 °C:ssa AlSi7Mg jähmettyy ja syntyy kiinteä valukappale. Jähmettymiseen vaikuttaa kemiallinen koostumus, sekä jäähtymisnopeus. Syntyneiden rakeiden välissä saattaa olla vielä sulia alueita, mutta sulan syöttäminen ei enää ole mahdollista. 550 °C lämpötilassa magnesiumyhdisteitä kiteytyy eutektikumirakeiden välissä. Noin 490 °C lämpötilassa kupariyhdisteet kiteytyvät. Jos seoksessa on lyijyä tai tinaa ne jähmettyvät puhtaina metalleina 327 °C ja 232 °C lämpötiloissa raerajoille ja jähmettyminen on lopultakin valmis. (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019)

Varsinainen valu tulisi tehdä alle 760 °C lämpötilassa, jolloin vältetään vedyn liukenemista, oksidien muodostumista, imuhuokoisuutta, sekä saadaan hienompi raerakenne. Toisaalta liian matala lämpötila aiheuttaa sen, että alkaa syntyä pohjasakkaa. (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019). Valimotoimenjohtaja Eero Pellikka (haastattelu 10.08.2021) täsmensi, että AlSi7Mg EN AC-42100 valuseokselle käytettävä valulämpötila on 740 °C.

4 Alumiiniseosten lämpökäsittelyt

Alumiini omaa runsaasti hyviä ominaisuuksia, kuten korroosionkestävyys, keveys, lämmönjohtavuus tai vaikkapa työstettävyys. Puhdas alumiini on ominaisuuksiltaan pehmeää ja sen lujuusominaisuudet ovat melko huonot, joten sen vuoksi puhtaan alumiinin käyttö on melko vähäistä. Alumiinia voidaan kuitenkin seostaa käyttötarkoituksensa mukaan. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 231)

Viimevuosina alumiinien käyttö on lisääntynyt. Markkinoilta voi hankkia esimerkiksi valettuja puolivalmisteita, joiden käyttöön lähes poikkeuksetta kuuluu lämpökäsittely.

Lujittamismenetelmiin kuuluvat liuos-, muokkaus- sekä erkautuslujittaminen. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 233)

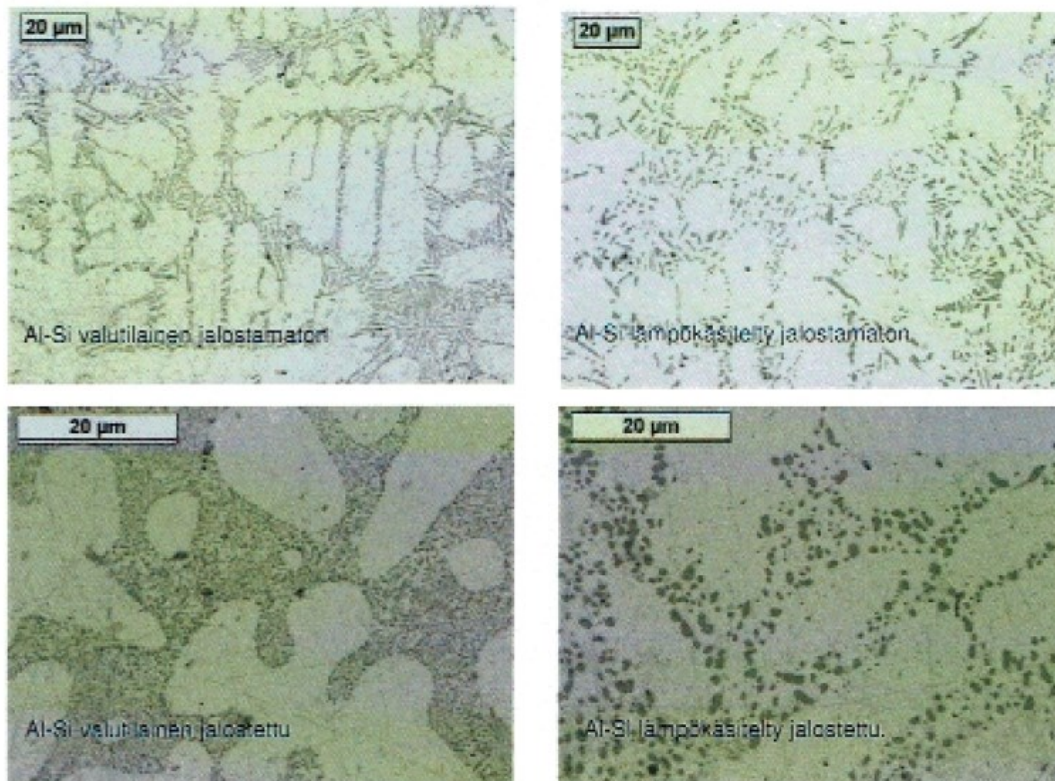
Tärkeitä ominaisuuksia alumiinisille valuseoksille ovat murtolujuus, myötölujuus, venymä, sekä väsymislujuus. Lisäksi elektroniikkateollisuudessa arvostetaan lämmönjohtavuutta, sähkönjohtavuutta, sekä korroosionkestoa. (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019)

Mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa vaikuttamalla materiaalin mikrorakenteeseen. Kemiallinen koostumus, sekä käsittelyt ovat keinoja vaikuttaa mikrorakenteeseen. Kuvassa 3 on havainnollistettu lämpökäsittelyn vaikutusta mikrorakenteeseen. (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019)

Kuva 3. Al-Si Valuseoksien mikrorakenne (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).

Tärkeitä ominaisuuksia valuseoksille

Mekaaniset ominaisuudet



4.1 Tasaushehkus

Tasaushehkus (homogenisointihehkus) tasoittaa valussa syntyneitä seosaineiden suotautumia. Käytettävä hehkuslämpötila voi olla väliltä 480...560 °C. Lisäksi pitoajan on oltava tarpeeksi pitkä. Tasaushehkuksessa materiaali muuttuu tasalaatuisemmaksi ja muokattavuus, sekä mekaaniset ominaisuudet paranevat. Tasaushehkus helpottaa myös myöhemmin tehtävää liotushehkutusta karkenevilla seoksilla. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 233—234)

4.2 Jännityksenpoistohehkus

Jännityksenpoistohehkus on menetelmä, jota voidaan soveltaa valettujen, muovattujen tai hitsattuihin rakenteisiin. Muokkaus tai nopea jäähtyminen voi aiheuttaa materiaaliin

jäännösjännityksiä, jotka voidaan poistaa jännityksenpoistohehkutuksella.

Hehkutuslämpötila on n. 200...300 °C, jolloin lujuus ei laske liikaa. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 233—234)

4.3 Pehmennyshehkutus

Pehmennyshehkutus on tavallisin lämpökäsittely, joka tehdään kylmämuokkauksen jälkeen. Pehmennyshehkutuksessa lujittunut rakenne pehmenee ja saadaan kiteytymään uudelleen. Muokkausta ja työstöä varten materiaalin tulee olla sitkeää ja pehmeää, joka saadaan aikaan pehmeäsihehkutuksella. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 234)

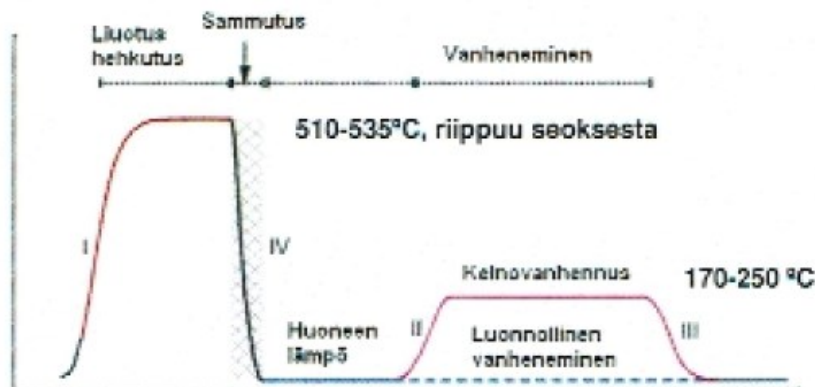
4.4 Erkautuskarkaisu

Erkautuskarkaisuun liittyy liuotushehkutus, sammutus, sekä vanhennus. Liuos- ja erkaumalujittuminen perustuu dislokaatioiden liikkeen vaikeuttamiseen. Liikkeen vaikeuttaminen tapahtuu liukutasoon ulottuvien erkaumien, sekä kiteeseen liuenneiden atomien avulla. Liuotushehkutuksessa alumiinia hehkutetaan yksifaasialueella, jotta aikaisemmin erkautuneet faasit liukenevat jälleen liuokseen. Sammutuksessa tasalaatuinen jähmeä liuos jäähdytetään nopeasti esimerkiksi kylmään veteen. Tavoitteena on saattaa jähmeä liuos ylikyllästeisenä huoneenlämpötilaan. Erkautus voidaan toteuttaa pitämällä materiaalia huoneenlämpötilassa, jolloin kyseessä on luonnollinen vanheneminen. Alumiinia voidaan myös hehkuttaa huoneenlämpötilan yläpuolella, jolloin kyseessä on keinovanheneminen. Vanhentamisessa seosaineista ylikyllästeinen jähmeä liuos hajaantuu muodostaen erkaumia. Erkaumat kohottavat alumiinin kovuutta. Joissakin seoksissa erkautumisreaktio tapahtuu jo huoneenlämpötilassa ilman hehkutusta, tällöin puhutaan luonnollisesta vanhentamisesta. Monissa seoksissa erkautuminen on huoneenlämpötilassa hidasta tai olematonta, jolloin tarvitaan keinovanhennusta. Keinovanhennuksessa erkautuskarkenemisen kulku kiihtyy, kun lämpötilaa nostetaan. Keinovanhentamalla saavutetaan nopeammin kovuuden enimmäisarvo, mutta samalla ylivanhenemisen riski kasvaa. Keinovanhennuksella saavutetaan kuitenkin suurempia lujuuksia, kuin luonnollisella vanhentamisella. (Kivivuori, S. & Härkönen, S. 2004, s. 234)

Uunin kuumentaminen haluttuun liuotushehkutuslämpötilaan on oltava nopea. Kappaleen tulee kuumentua täydellisesti, joten materiaalin paksuus määrittelee tarvittavan lämmitysajan. Liuotushehkutukseen käytettävä aika voi vaihdella minuuteista useisiin tunteihin. Uunin kapasiteetti, sekä panoksen koko vaikuttavat myös aikaan. Tavoitteena on, että lämpötilan muutokset ovat tasaisia koko panoksessa. Pyrkimyksenä on, että korkean lämpötilan aiheuttamat muodonmuutokset olisivat pieniä. Pitoajaksi suositellaan 15...60 minuuttia kappaleen ensin kuumennuttua haluttuun pitolämpötilaan. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 93)

Lämpökäsittely parantaa Al-Si- seoksen lujuusominaisuuksia, sekä sähkön- ja lämmönjohtavuutta. Mg- ja Cu- pitoiset seokset ovat lämpökäsiteltäviä. Lämpökäsittelyssä tavoitteena on liuottaa ensimmäisenä Mg tai Cu alumiinirakenteeseen, jonka jälkeen kappale sammutetaan nopeasti vaikkapa veteen. Sammutuksessa seosaineet eivät pääse muodostamaan yhdisteitä ja jäävät hilarakenteeseen. (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019). Erkautuskarkaisua on havainnollistettu kuvassa 4.

Kuva 4. Alumiiniseosten lämpökäsittely (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).



Liuotushehkutuslämpötila riippuu käytettävästä seoksesta ja liuotushehkutus on kestoltaan aika, jossa saavutetaan 90 % maksimaalisesta lujuudesta. Liuotushehkutukseen käytettävän ajan ja kappaleen seinämäpaksuuden välistä suhdetta on kuvattu taulukossa 3. Esa Suikkanen on kuvannut liuotushehkutusta tekemässään Alteams:in sisäisessä sula- ja lämpökäsittelykoulutusmateriaalissa sivulla 43, josta löytyy myös taulukko 3. (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019). Lämpökäsittelyn pitoaika tarkoittaa aikaa, jonka

tuote on halutussa lämpötilassa (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 264). Taulukossa 4 on esitetty seoksen EN AC-42100 liuotushehkuksessa, sekä keinovanhennuksessa käytetyt lämpötilat, sekä lämpökäsittelyajat.

Taulukko 3. Liuotushehkutusaika eri seinämänpaksuuksille (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).

Seinämäpaksuus, mm	Hehkutusaika, h
4	2
6,3	2,5
10	3
16	3,5

Taulukko 4. Karkaisutiedot (Huhtaniemi ym., 2002, s. 220).

Seos EN AC-	Liuotushehkuks	Luonnollinen vanhennus	Keinovanhennus
42100	540°C, 12h	20°C, 24h	150°C, 12h

Oikeanlainen sammutus on tärkeää lämpökäsittelyn onnistumisen kannalta. Sammutuksessa nestemäärän tulee olla riittävä, jotta vapautuva lämpö ei nosta liikaa sammutusveden lämpötilaa. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 268). Liuotushehkuksien jälkeisessä sammutuksessa kappale jäähdytetään nopeasti veteen, jonka lämpötila saa olla maksimissaan 50-astetta. Nopea jäähtyminen voi synnyttää mittamuutoksia, jotka on oikaistava välittömästi ennen vanhennusta. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 219)

Liuotushehkuksien jälkeisessä sammutuksessa lämpöä siirtyy säteilemällä, kuljettumalla ja johtumalla. Tavallisesti sammutustapahtuma koostuu kaikkien mainittujen lämmönsiirtotapojen yhdistelmästä. Kun lämpöä siirtyy kuljettumalla, voidaan puhua myös konvektiosta, jossa lämpöä siirtyy väliaineen kuljettamana kappaleen pinnalta. Kun väliaine virtaa vapaasti kysymyksessä on vapaa konvektio. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 64)

Nesteeseen, kuten veteen sammutettaessa voidaan erottaa kolme aluetta, joissa jokaisessa on erilainen jäähtymisnopeus. Sammutuksen aluksi syntyy höyrykalvovaihe, jolloin sammutusaine höyrystyy sammutettavan kappaleen pinnalla tai sen läheisyydessä. Höyrykalvon ansiosta kappale ei kosketa sammutukseen käytettävää ainetta. Lämpöä siirtyy höyrykalvovaiheen aikana vain vähän. Lämmönsiirto on pienimmillään konvektion lopussa,

kun lämpötilaero ei ole enää suuri. Höyrykalvo syntyy, kun lämpöä siirtyy enemmän, kuin käytettävä väliaine kykenee poistamaan kappaleen pinnalta. Sammutuksessa käytettävä väliaine höyrystyy, jonka seurauksena lämpö siirtyy lähes täysin säteilemällä. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 65)

Höyrykalvon rikkouduttua syntyy höyrykuplia ja sammutuksessa käytettävä väliaine alkaa kiehua. Käytetty väliaine koskettaa nyt kappaletta ainakin jossain määrin. Lämmönsiirto on tehokasta, koska lämpöenergiaa kuluu höyrystymiseen. Höyrykalvo katoaa toisen vaiheen loppupuolella ja lämmönsiirtyminen on suurimmillaan. Kun höyrykalvo on kadonnut seuraa konvektiovaihe, jolloin sammutuksessa käytettävä väliaine kuljettaa lämpöä enemmän, kuin kappale kykenee luovuttamaan. Kappale jäähtyy pinnaltaan sisustaansa nopeammin. Kun kappale on jäähtynyt tarpeeksi, hidastuu höyrykuplien muodostuminen ja lämmönsiirto vähenee. Kun kappale on jäähtynyt väliaineen kiehumispisteen alapuolelle ei höyrykuplia enää synny. Lämmönsiirto on pienimmillään konvektion loppupuolella, kun lämpötilaero on enää mitätön. Sammutuksen lämmönsiirtoon vaikuttavat lisäksi sammutusaineen lämpötila, viskositeetti, sekä kappaleen pinnankarheus ja muoto. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 65)

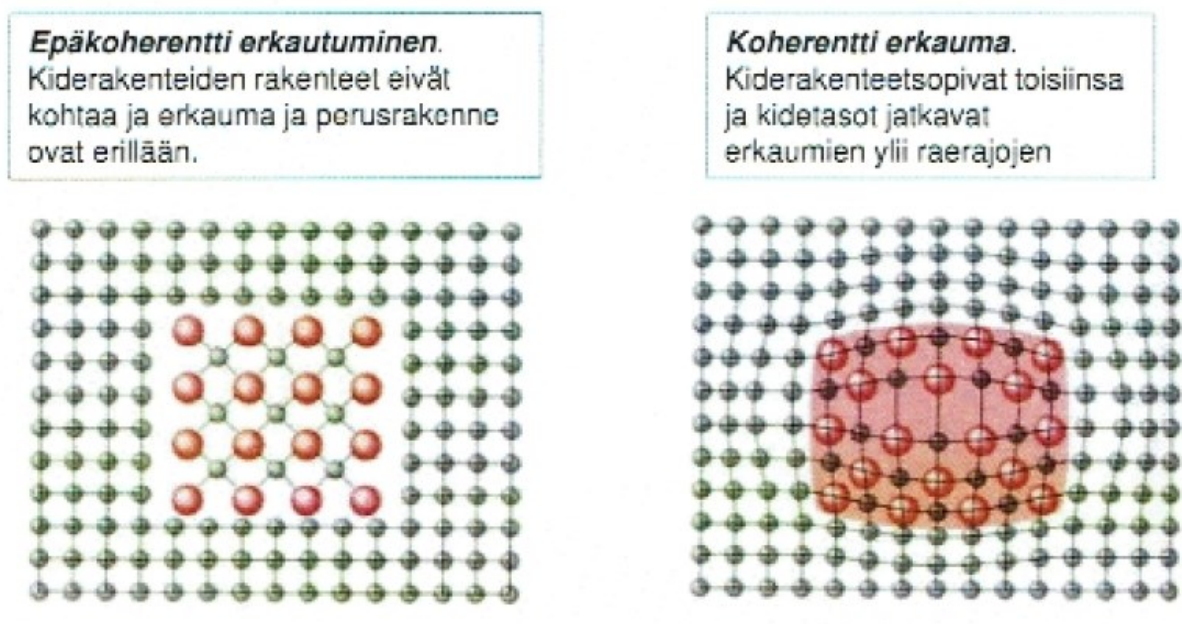
Liutushehkutuksen jälkeisessä sammutuksessa saadaan materiaali homogeeniseen tilaan, jolloin se ei ole lujaa. Lujuus saavutetaan vasta tekemällä vanhennus. Vanhennuskäsittelyssä materiaalin seosaineet diffundoituvat isojen konsentraatioiden alueiksi. Syntyneitä alueita kutsutaan erkaumiksi. Erkaumien syntyessä materiaalin lujuus kasvaa. Optimaaliset lujuusominaisuudet saavutetaan, kun erkaumien koko ja esiintymistiheys vaikuttavat yhdessä dislokaatioiden liikkeen vaikeuttamiseksi kiderakenteessa. Tavoiteltu rakenne saavutetaan tavallisesti keinovanhennuksella. (Kivivuori, S., 2016, s. 113).

Keinovanhentamisen jälkeinen jäähdytys tapahtuu vapaasti huoneenlämpötilaan (Huhtaniemi ym., 2002, s. 220). Keinovanhentaminen hitsaustyön jälkeen pienentää materiaalin syöpymisvaaraa (Huhtaniemi ym., 2002, s. 106).

Erkaumalujittumisessa pyritään saamaan aikaan koherentteja erkaumia, jolloin kiderakenteet yhdistyvät, sekä kidetasot jatkuvat yli erkaumien raerajojen. Kun kiderakenteet eivät kohtaa, sekä erkauma ja muu rakenne ovat erillään on kyseessä epäkoherentti erkautuminen. Esa Suikkanen on kuvannut erkaumalujittumista tekemässään

Alteamsin sisäisessä sula- ja lämpökäsittelykoulutusmateriaalissa sivulla 84, josta löytyy myöskin erkaumalujittumista havainnollistava kuva 5. (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019). Koherentti erkauma muodostaa ympärilleen jännityskentän, jolloin se lisää erkauman pinta-alaa, sekä kasvattaa tarvittavaa leikkausjännitystä (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 20). Pienikokoiset erkaumat pienentävät raekokoa, sekä hankaloittavat dislokaatioiden liikettä (Kivivuori, S., 2016, s. 54).

Kuva 5. Erkautuskarkaisu-lujittaminen (E. Suikkanen, henkilökohtainen tiedonanto, 20.12.2019).



Onnistunut lämpökäsittely edellyttää tavallisesti kiertoilmauuneja, sekä tarpeeksi tarkkaa lämpötilan hallintaa liuotushehkutusta, sekä keinovanhennusta tehtäessä. Uunin atmosfäärinä on usein ilma. Jos ilmassa on kosteutta tai rikkiä niin käsiteltävät tuotteet voivat värjäytyä. Kuumennus hehkutuslämpötilaan tehdään nopeasti. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 91)

5 Vetokoe

Vetokoe on materiaalitieteen ja -tekniikan yleisin testi, jossa näytesauva altistuu kontrolloidulle jännitykselle, kunnes se murtuu. Vetokokeita tehdään, jotta voidaan selvittää materiaalin murtolujuus, myötölujuus, suurin venymä ja poikkipinta-alan pieneneminen.

Näistä mittauksista voidaan määrittää materiaalille myös muita ominaisuuksia. (Tensile testing, 2022)

Vetokoetta varten tarvitaan valukappale, jota kutsutaan vetokoesauvaksi. Valu tehdään hiekkavaluna, jolloin valu tehdään hiekkamuottiin. Valukappale tarkoittaa tuotetta, joka muodostuu metallin jäähmettyessä muottiin. (EN 12258-1, 2012, s. 19–20). Hiekkavaluna valetun koesauvan mekaanisia vaatimuksia on esitelty taulukossa 5. Vetokoe kuuluu rikkoviin aineenkoetusmenetelmiin (Kivivuori, S., 2016, s. 235).

Taulukko 5. Hiekkavaluseosten erillään valettujen koesauvojen mekaaniset ominaisuudet (SFS-EN 1706, 2020, s. 13).

Seosryhmä	Numeerinen nimike	Tilan tunnus	Murtolujuus R_m (MPa) min.	Venymisraja $R_{p0,2}$ (MPa) min.	Murtovenymä (%) min.	Brinellin kovuus HBW min.
AlSi7Mg	EN AC-42100	T6	230	190	2	75

Vetokoesauvat on valettava samasta sulatuspanoksesta, kuin valukappaleetkin käyttämällä samanlaista valumenetelmää. Jos valukappaleet lämpökäsitellään, niin vetokoesauvat tulee myös lämpökäsitellä. Vetokoesauvat tulee valaa samankaltaisiin hiekkamuotteihin, kuin muutkin valukappaleet. Vetokoesauvan minimihalkaisija on 12 mm (SFS-EN 1706, 2020, s. 16)

Vetokokeessa vetokoesauvaa vedetään katkeamiseen asti ja tulosten perusteella voidaan arvioida materiaalin mekaanisia ominaisuuksia. Koe tehdään huoneenlämpötilassa 10...35 °C. (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 13)

Standardi suosittelee koesauvoja, joiden alkumittapituus L_0 ja suoran osan poikkipinta-ala S_0 toteuttavat määritellyn ehdon (kaava 1), jossa k on verrannollisuuskerroin. Edellä mainitun ehdon täyttäviä koesauvoja kutsutaan suhdeseauvoiksi. Vakion k arvoksi on sovittu 5,65. Koesauvan lyhin sallittu alkumittapituus on 15 mm. Jos koesauvan poikkipinta on pieni vakion k arvolle, voidaan siirtyä käyttämään suurempaa arvoa (suositaan arvoa 11,3) tai voidaan siirtyä käyttämään ei-suhdeseauvaa. Jos alkumittapituus laskee alle 20 mm niin

murtovenymän epävarmuus lisääntyy. Jos käytetään ei-suhdesauvoja, niin alkumittapituus L_0 ei riipu sauvan poikkipinta-alasta S_0 . (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 14)

Kaava 1: Suhdesauva (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 14).

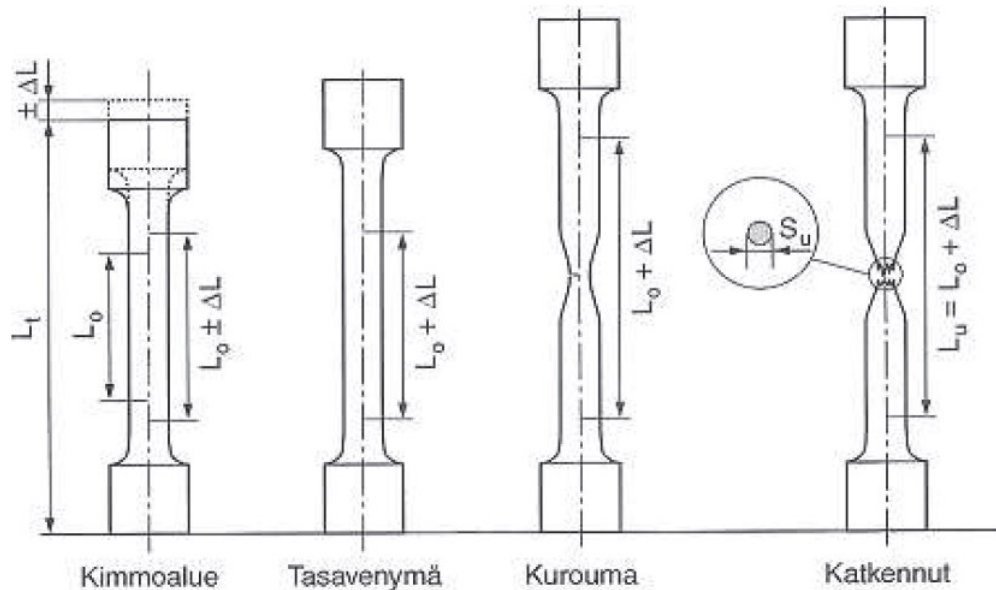
$$L_0 := k \cdot \sqrt{S_0}$$

Koesauvan muodot ja mitat vaihtelevat ja ne tulee suunnitella siten, että testattavassa tuotteessa on samankaltaisia muotoja. Koesauva voidaan valmistaa tekemällä se näytteestä, aihioista tai valusta. Jos tuote on palkki, tanko, lanka tai vaikkapa valu, voidaan käyttää myös koesauvoja, joita ei ole työstetty. Koesauva voi olla poikkileikkaukseltaan ympyrä, neliö, suorakaide tai vaikkapa rengasmainen. Valetulla koesauvalla sauvan suoran osuuden, sekä sauvan paksumman pään välinen yhtyminen tulee tapahtua loivasti. Vetokoneeseen tulevat sauvan päät tulee olla kiinnitykseen soveltuvat. Koesauva mitataan mielellään kolmesta kohdasta sauvan suorasta osasta. Sauvan poikkipinta-ala (S_0) lasketaan näiden kolmen mittauksen keskiarvona.

(SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 14—15)

Kun vetokoesauvaa kiinnitetään vetokoneeseen, voidaan käyttää kiilaleukoja, kierteitä, suoraa leukoja tai olakkeita. Vetävä voima tulisi kohdistua mahdollisimman hyvin vetokoesauvan pituusakselin suuntaisesti. Jos murtovenymä määritellään käsin, tulee alkumittapituuden rajat merkitä viivaamalla ne. Alkumittapituuden rajoja ei saa merkitä lovilla, sillä ne voivat aiheuttaa sauvan ennenaikaisen murtumisen. (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 16). Vetokoesauvan käyttäytymistä vetokokeen aikana on havainnollistettu kuvassa 6.

Kuva 6. Vetokoesauvan käyttäytyminen vetokokeen aikana (Lepola, P. & Makkonen, M., 2000, s. 46).



5.1 Termistöä

Mittapituus tarkoittaa koesauvassa olevaa tasamittaista osuutta, jonka avulla pitenemä saadaan mitattua. Vetokokeessa pitenemä mitataan mittapituudelta. Alkumittapituus (L_0) tarkoittaa mittapituudella olevien mittamerkkien välistä etäisyyttä huoneenlämpötilassa. Loppumittapituus (L_u) tarkoittaa katkenneessa koesauvassa olevien mittamerkkien välistä etäisyyttä huoneenlämpötilassa, kun katkennut koesauva on sovitettu yhteen. Koepituus on vetokoesauvassa olevan kapean suoran osan pituus. Pitenemä tarkoittaa alkumittapituuden kasvua vetokokeen aikana. Venymä tarkoittaa alkumittapituuden muutosta prosentteina. (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 7)

Pysyvä venymä tarkoittaa alkumittapituuden muutosta prosentteina, kun koesauvaan ei enää kohdistu jännityksiä. Murtovenymä ($L_u - L_0$) tarkoittaa alkumittapituuden pitenemää prosentteina, kun sauva on jo katkennut. Nimellisvenymä tarkoittaa venymämittarin mittapituuden kasvua prosentteina. Venymämittarin mittapituuden pysyvä venymä tarkoittaa sen pitenemää prosentteina verrattuna alkuperäiseen mittapituuteen, kun vetokoesauvaan ei enää kohdistu jännityksiä. Myötövenymä ilmenee materiaaleilla, joilla on epäjatkuva myötöraja. Myötövenymä ilmoitetaan prosentteina venymämittarin mittapituudesta ja se ilmoittaa myötörajavaiheen aikaista pitenemää myötämisen

alkamisesta muokkauslujittumisen alkamiseen. Kokonaistasavenymä ilmoittaa kokonaispitenemän (kimmainen, sekä plastinen) isoimmalla voimalla ja se ilmaistaan prosentteina venymämittarin mittapituudesta. (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 8)

Plastinen tasavenymä suurimmalla voimalla tarkoittaa plastista pituuden muutosta suurimmalla voimalla ja se ilmoitetaan prosentteina venymämittarin mittapituuden avulla. Kokonaisvenymä murtohetkellä tarkoittaa pituuden muutosta (kimmainen, sekä plastinen) murtohetkellä ja se ilmoitetaan prosentteina venymämittarin mittapituuden avulla. Koenopeus tarkoittaa vetokokeessa käytettävää nopeutta tai nopeuksia. Venymän muutosnopeus tarkoittaa venymämittarilla saatua mittapituuden venymän lisäystä aikayksikköä kohden. Murtokurouma (Z) tarkoittaa vetokokeessa tapahtuvaa poikkipinnan muutosta prosentteina alkuperäisestä poikkipinta- alasta (S_o). (S_u) on poikkipinta-ala vetokokeen jälkeen. (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 9). Murtokurouma on esitetty kaavassa 2.

Kaava 2. Murtokurouma (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 9).

$$Z := \left(\frac{(S_o - S_u)}{S_o} \right) \cdot 100$$

Suurin voima (F_m) tarkoittaa koesauvan kestävämmä enimmäisvoimaa. Jännitys (R) tarkoittaa vaikuttavaa voimaa jaettuna vetokoesauvan suoran osan poikkipinta- alalla alussa (S_o). Murtolujuus (R_m) tarkoittaa suurimman voiman aiheuttamaa jännitystä. Myötöraja tarkoittaa jännitystä, jonka jälkeen alkaa tapahtua pysyvää muodonmuutosta voimaa kasvattamatta. Selvä myötöraja on vain myötöilmion omaavilla metalleilla. Ylempi myötöraja (R_{eh}) tarkoittaa jännityksen maksimiarvoa ennen kuin voima alkaa vähentyä. Alempi myötöraja (R_{el}) tarkoittaa pienintä jännitystä plastisessa myötämisessä. (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 10)

Murtuminen tapahtuu, kun vetokoesauvan osat ovat erillään toisistaan. Kimmoisalla alueella jännitys-venymäkäyrän suoralla osuudella kimmokerroin (E) tarkoittaa jännityksen (ΔR), sekä venymän (Δe) muutoksien suhdetta kerrottuna 100 %. (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 11)

Kimmainen alue tarkoittaa, että jännityksen poistuttua materiaali palautuu alkuperäiseen

tilaansa. Materiaalin jäykkyys on suhteessa kimmomoduuliin. (Björk ym., 2014, s. 78)
Kimmokerroin on esitetty kaavassa 3.

Kaava 3. Kimmokerroin (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 11).

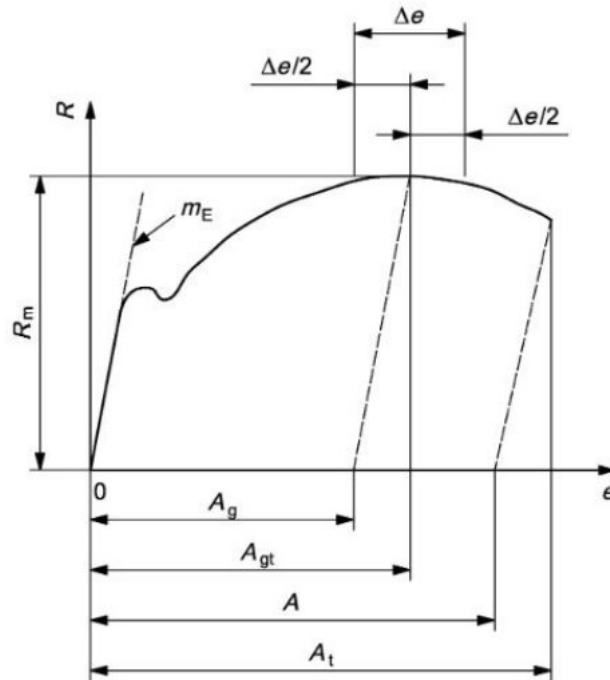
$$E := \left(\frac{\Delta R}{\Delta e} \right) \cdot 100$$

5.2 Jännitysvenymäkäyrä

Ennen koetta ovat jännitys, sekä venymä nolla. Kuormituksen takia sauva venyy. Kokeen alkupuolella venymä, sekä jännitys kasvavat samassa suhteessa. Jos kokeen tässä vaiheessa jännitys poistetaan, niin sauva palautuu takaisin alkumittapituuteensa. Tällöin liikutaan kimmoisella alueella. Jännityksen saavutettua riittävän suuren arvon tapahtuu käyrän kulussa liikahtus, jonka jälkeen venymä alkaa kasvaa jännitystä nopeammin. Tällöin on saavutettu myötöraja. Jos kuormitus nyt poistettaisiin, niin vetokoesauva jäisi alkumittapituuttaan pidemmäksi. Tällöin on siirrytty plastisen muodonmuutoksen alueelle. Plastinen muodonmuutos tarkoittaa pysyvää muodonmuutosta. Kuormitusta edelleen lisättäessä sauva kuroutuu ja lopulta katkeaa. Suurin saavutettu jännitys on murtoraja eli murtolujuus. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 271)

Vetokokeesta saatava jännitysvenymäkäyrä kuvaa siis jännityksen, sekä venymän välistä suhdetta. Kuvassa 7 on jännitysvenymäkäyrä, sekä selitykset kuvasta saataviin mekaanisiin ominaisuuksiin.

Kuva 7. Jännitysvenymäkäyrä (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 26).

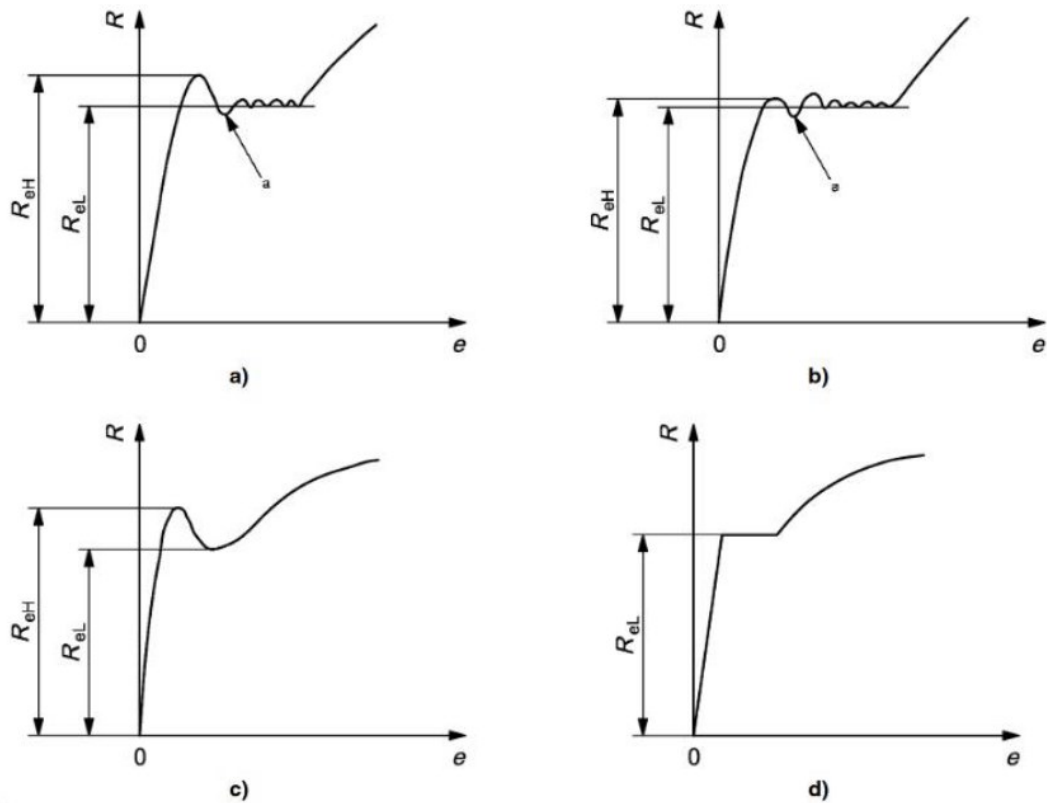


Selite

- A murtovenymä [määritettynä venymämittarin signaalista tai suoraan koesauvasta
- A_g plastinen tasavenymä suurimmalla voimalla
- A_{gt} kokonaistasavenymä suurimmalla voimalla
- A_t kokonaisvenymä murtohetkellä
- e venymä
- m_E jännitys-venymäkäyrän kimmoisen osan kulmakerroin
- R jännitys
- R_m murtolujuus
- Δe ylätasanteen koko

Alempi myötöraja (R_{eH}) saadaan voima- pitenemäkäyrän avulla ja se on pienin jännitys myötörajavaiheen aikana. Alempi myötöraja lasketaan jakamalla tämä voima koesauvan poikkipinta- alalla (S_0). Ylempi myötöraja (R_{eH}) määritellään voima- pitenemäkäyrän avulla tai suurinta kuormitusta osoittavalla mittalaitteella. Ylempi myötöraja on jännityksen suurin arvo ennen voiman pienenemistä. Ylempi myötöraja lasketaan jakamalla tämä voima koesauvan poikkipinta- alalla (S_0). (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 20). Teräksillä, joilla myötöraja esiintyy selkeästi, voidaan määrittää alempi, sekä ylempi myötöraja (kuva 8). Lujilla teräksillä ja ei- rautametalleilla sen sijaan määritetään voima, jolla koesauvaan jää 0,2 %: n venymä ja tätä kutsutaan 0,2-rajaksi ($R_{p0,2}$) (Kutilainen, H. & Rantanen, M., 1981, s. 12).

Kuva 8. Myötörajojen määrittäminen (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 27).

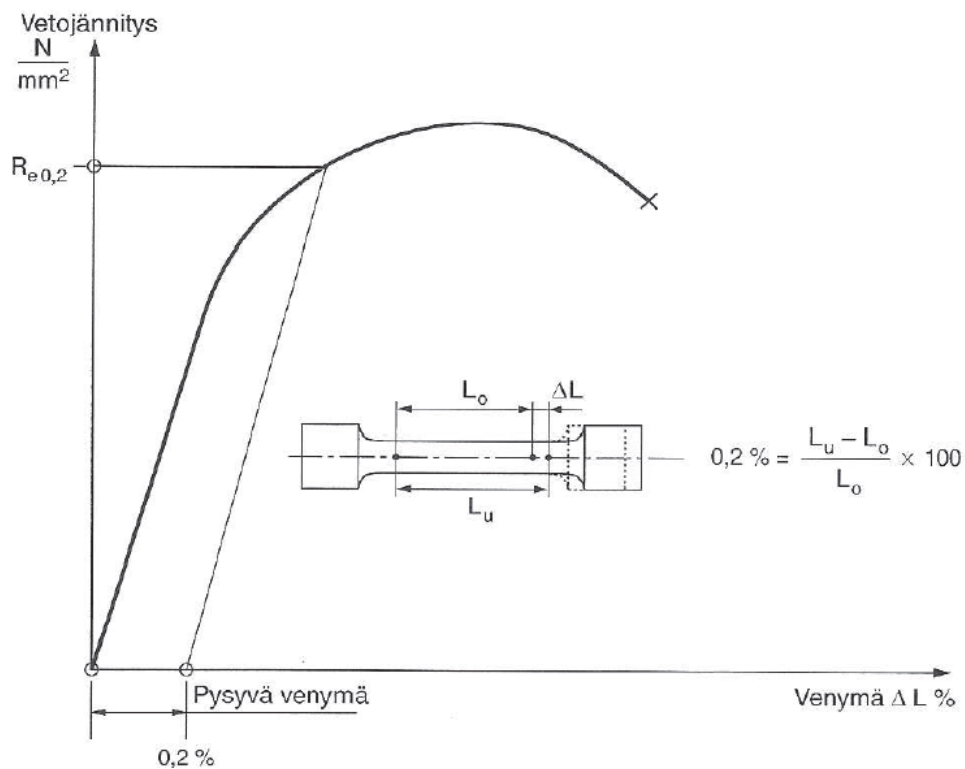


Selite

- e venymä
- R jännitys
- R_{eH} ylempi myötöraja
- R_{eL} alempi myötöraja
- a alkuvaiheen hetkellinen yliheilahdus.

Plastiseen pitenemiseen perustuva venymisraja (R_P) saadaan voima- pitenemiskäyrästä tekemällä käyrän suoran alkuosuuden kanssa yhdensuuntainen suora. Piirretty suora on haluttua plastista venymää vastaavalla etäisyydellä venymää kuvaavan akselin suunnassa, esimerkiksi 0,2 %. Suoran ja käyrän leikkauspiste kertoo voiman suuruuden halutulla venymisrajalla. Venymisraja lasketaan jakamalla saatu voima koesauvan poikkipinta- alalla (S_0). (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 21)

Kuva 9. 0,2-venymärajan määrittäminen vetokokeella seokselle, jolla ei ilmene selvää myötörajaa (Lepola, P. & Makkonen, M., 2000, s. 47).



Murtolujuus voidaan määrittää kaavalla 4.

Kaava 4. Murtolujuus (Kotilainen, H. & Rantanen, M., 1981, s. 14).

$$R_m = \frac{F}{S_0}$$

jossa F on vetokokeessa käytetty suurin voima ja S_0 sauvan poikkipinta-ala (mm^2) ennen vetokoetta. (Kotilainen & Rantanen, 1981, s. 14)

Murtovenymä voidaan laskea kaavalla 5, jossa

Kaava 5. Murtovenymä (Kotilainen, H. & Rantanen, M., 1981, s. 14).

$$A := \frac{(L_u - L_o)}{L_o} \cdot 100\%$$

L_o on alkuperäinen mittapituus ja L_u katkenneen sauvan pituus (mm). Murtovenymää voidaan pitää sitkeyden mittana. Materiaalin haurasmurtumaominaisuuksista murtovenymä ei anna kuvaa. (Kotilainen, H. & Rantanen, M., 1981, s. 14)

Tasavenymä (A_g) on tärkein materiaalin sitkeyttä kuvaava suure. Tasavenymä tarkoittaa pysyvää venymää, joka vetokoesauvassa on tapahtunut ennen kuroutumisen alkamista. Mitä suurempi tasavenymä on, niin sitä parempi on materiaalin muovattavuus. Tasavenymä lasketaan kaavalla 6.

Kaava 6. Tasavenymä (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 22).

$$A_g = \left(\frac{\Delta L_m}{L_e} - \frac{R_m}{m_E} \right) \cdot 100 \%$$

jossa L_e on venymämittarin mittauspituus, m_E on jännitysvenymäkäyrän kimmoisan alueen kulmakerroin, R_m on murtolujuus ja ΔL_m on suurimmalla voimalla tapahtuva pitenemä. (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 22)

Kokonaispitenemiseen perustuva venymisraja (R_T) saadaan piirtämällä y-akselin (voima-akselin) kanssa yhdensuuntainen suora. Suora tulee piirtää sellaiselle etäisyydelle, että se vastaa vaadittua kokonaisvenymää. Voima vastaa haluttua venymisrajaa siinä pisteessä, jossa suora leikkaa käyrän. Venymisraja lasketaan jakamalla saatu voima koesauvan poikkipinta- alalla (S_o). Jos vetokoneessa on automaattisia laskinlaitteita, saadaan venymisraja määritettyä ilman edellä kuvattua menetelmää. (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 21)

Myötövenymän määrittäminen tapahtuu niille materiaaleille, joilla on epäjatkuva myötöraja siten, että vähennetään ylemmän myötörajan kohdalla olevasta pitenemästä tasaisen muokkauslujittumisen alkamiskohdassa oleva pitenemä. Myötövenymän määrittäminen

tehdään voima-pitenemiskäyrästä. (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 22). Seuraavassa suora lainaus standardista.

Tasaisen muokkauslujittumisen alkamiskohdassa oleva pitenemä saadaan ennen tasaisen muokkauslujittumisen alkamista olevaa vähimmäisarvoa risteävän vaakasuoran viivan tai myötöalueen kautta kulkevan regressioviivan ja tasaisen muokkauslujittumisen alkaessa suurimman kulmakertoimen omaavan viivan leikkauskohdasta. Myötövenymä ilmaistaan prosentteina venymämittarin mittapituudesta (L_e). (SFS-EN ISO 6892-1, 2019, s. 22)

6 Käsitteet

Tässä luvussa on avattu opinnäytetyön testiosiossa käytettyjä käsitteitä.

6.1 Lujuus käsitteenä

Lujuus on kykyä kestää kuormitusten aikaansaamia veto- tai puristusjännityksiä. Dynaaminen kuormitus, jossa esiintyy vaihtelevalla sykllillä veto- ja puristusjännityksiä edellyttää materiaalilta väsymislujuutta. Lujuutta voidaan tutkia veto- sekä väsytykokeiden avulla. Lujuusominaisuuksia ovat esimerkiksi murtolujuus (R_m), myötöraja (R_e), 0,2-raja ($R_{p0,2}$), sekä väsymislujuus. Vetokoetta on käsitelty tarkemmin tämän opinnäytetyön luvussa 5.0 (Lepola, P. & Makkonen, M., 2000, s. 44)

Väsymismurtuma vaatii syntyäkseen toistuvia jännitysvaihteluja ja se voi syntyä pienilläkin jännitystasoilla. Staattisen kuormituksen aiheuttama murtuma voidaan tavallisesti havaita kappaleen muodonmuutoksia tarkkailemalla. Kun särö syntyy ja etenee vaihe kerrallaan kappaleen sisäosiin, voidaan puhua väsymismurtumasta. Särön edettyä tarpeeksi rakenne murtuu usein äkillisesti. Karkenemattomilla seoksilla on parempi murtolujuuden ja väsymislujuuden suhde, kuin karkenevilla seoksilla. Tämä tarkoittaa siis, että karkenemattomilla seoksilla on suhteessa murtolujuuteen parempi väsymislujuus. Esimerkiksi karkenevan seoksen tilojen T6 ja T4 välillä murtolujuuksissa on iso ero ja väsymislujuudet ovat samansuuruiset. Väsymissärö vaatii edetäkseen pintavirheen, särön ydintymiskohdan, mekaanista työstöä, syövyttävän ympäristön tai jonkin näiden

yhdistelmän. Pinnoitus tai kuulapuhallus saattavat nostaa väsymislujuutta. (Huhtaniemi ym., 2002, s. 81)

6.2 Kovuus käsitteenä, sekä Brinellin kovuus (HBW)

Kovuus tarkoittaa kykyä kestää pistemäistä kuormitusta ilman, että syntyy muodonmuutoksia. Kovuus on lisäksi kykyä kestää hankaavaa rasitusta ilman, että pinta kuluu. Kovuutta voidaan tutkia erilaisilla kovuuskokeilla, joissa tutkittavan materiaalin pintaan painetaan jonkinlainen painin halutulla voimalla. Kappaleen pintaan jäävän painuman perusteella saadaan määriteltyä tutkittavan materiaalin kovuus. Kovuuskokeita on monenlaisia, kuten Brinell-kovuus (HB), Rockwell C kovuus (HRC), sekä Vickers-kovuus (HV). Brinell-kovuuskokeessa käytetään pallon muotoista paininta ja menetelmänä se sopii pehmeän teräksen, sekä valurautojen kovuuden mittauksiin. Rockwell C-kovuuskokeessa käytetään ympyräkartion muotoista timanttia painimena ja menetelmänä se soveltuu kovien terästen kovuuden mittaukseen. Vickers-kovuuskokeessa käytetään pyramidin muotoista timanttia painimena ja menetelmänä se soveltuu kaikkien metallisten aineiden kovuuden mittaukseen. (Lepola, P. & Makkonen, M., 2000, s. 52—53). Kovuuskoe kuuluu rikkoviin aineenkoetusmenetelmiin (Kivivuori, S., 2016, s. 235).

Eri menetelmillä mitattujen kovuuksien kesken ei ole mitään teoreettista yhteyttä.

Kovuusarvojen kasvaminen parantaa tavallisesti materiaalin kulumiskestävyyttä.

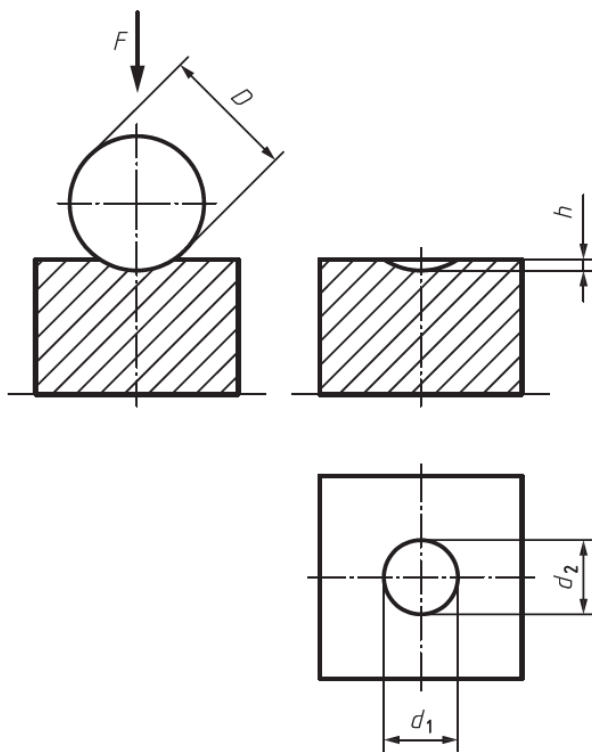
Murtolujuus, sekä materiaalin kovuus riippuvat suurena toisistaan metalleilla. (Björk ym., 2014, s. 80)

Brinellin kovuus (HB) saadaan painamalla kovametalli tai karkaistu teräspallo tunnetulla voimalla materiaalin pintaan. Kuormitusvoima on yleisesti 29 420N (3000kp) pallon halkaisijan ollessa 10 mm. Kuormitusaika vaihtelee välillä 10...15 s. Kuormitus poistetaan, jonka jälkeen voidaan mitata pintaan syntyneen painuman halkaisijat. Mitattavat halkaisijat ovat 90-asteen kulmassa toisiinsa nähden (kuva 10). Mitattujen halkaisijoiden keskiarvon avulla voidaan laskea painuman pinta-ala (mm^2). Brinellin kovuus (HB) lasketaan jakamalla kuormitusvoima (N) painuman pinta-alalla (mm^2). Saatu kovuusluku merkitään lukuna, esimerkiksi 200 HB. Kokeessa voidaan käyttää muitakin kuormitusarvoja ja pallon halkaisijakokoja, tällöin HB tunnuksen jälkeen lisätään halkaisija (mm), kuormituksen

suuruus (kp), sekä kuormituksen kesto (s). Esimerkiksi 380 HB 5/750/20 = 380 HB (brinellkovuus), 5 mm pallon halkaisija, kuormitusvoima 750 kp (7355 N), sekä kuormitusaika 20 s. (Lepola, P. & Makkonen, M., 2000, s. 52).

Kun testauksessa käytetään kovametallikuulaa, lisätään kovuustunnuksen loppuun W-kirjain (HBW). Kun mittaus tehdään teräskuulalla, on merkintä kovuustunnuksen lopussa S-kirjain (HBS). (Kivivuori, S., 2016, s. 218). Kuvassa 10 on esitetty Brinellin kovuuskokeen suoritusperiaate. Taulukossa 6 on tarvittavat tunnukset, lyhenteet, sekä laskentakaava.

Kuva 10. Brinellin kovuuskokeen suoritusperiaate (SFS-EN ISO 6506-1, 2014, s. 7).



Taulukko 6. Tunnukset ja lyhenteet (SFS-EN ISO 6506-1, 2014, s. 5–6).

Tunnus/lyhenne	Käsite	Yksikkö
D	Kuulan halkaisija	mm
F	Koevoima	N
d	Painuman halkaisijoiden keskiarvo $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$	mm
d_1, d_2	Toisiaan vastaan kohtisuoraan mitatut painumien halkaisijat	mm
h	Painuman syvyys $h = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \right)$	mm

Taulukko (jatkuu)

Tunnus/lyhenne	Käsite
HBW	Brinellin kovuus $HBW = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}} \right)}$

6.3 Sitkeys käsitteenä

Sitkeys on kykyä kestää ilman säröilyä, sekä repeytymistä vaikka materiaalia muovattaisiinkin. Sitkeyttä voidaan tutkia iskusitkeys-kokeella, jossa koesauva isketään heilurivasaralla poikki. Iskusitkeys-kokeessa koesauvan repeytymiseen tarvittava energiamäärä voidaan laskea. Koesauvat tulee olla määrättyssä lämpötilassa, sillä metallien sitkeysominaisuudet heikkenevät lämpötilan laskiessa. (Lepola, P. & Makkonen, M., 2000, s. 55)

Sitkeys kuvaa lisäksi tutkittavan materiaalin käyttäytymistä, kun sitä rasitetaan murtumiseen asti. Sitkeyttä voidaan arvioida murtumaan johtaneen jännityksen avulla tai murtumahetkellä vallinneen venymän avulla. Murtumissitkeys tarkoittaa kykyä vastustaa särön laajenemista. Haurasmurtuma tarkoittaa, että murtuma ilmenee ilman edeltävää plastista muodonmuutosta. Haurasmurtuma voi johtaa rakenteen äkilliseen murtumiseen ja se voi syntyä melko pienilläkin jännityksillä. Sitkeää murtumaa edeltää aina pysyvä muodonmuutos, jolloin se voidaan havaita ajoissa. Lujilla alumiiniseoksilla voi tapahtua

epävakaa leikkausmurtuma, jota voidaan myös kutsua lohkomurtumaksi. Lohkomurtuma on nopeasta kehityksestä huolimatta sitkeä murtuma. Kappaleeseen syntyneet iskut tai pintakäsittely voivat vaikuttaa niin, että muuten sitkeästi käyttäytyvä materiaali käyttäytyykin hauraasti. Tavallisesti materiaalin lujuutta parantavat seikat alentavat sitkeysominaisuuksia. Materiaalin raekoon pienentäminen on keino, jolla saadaan parannettua sekä lujuutta, että sitkeyttä. (Björk ym., 2014, s. 79)

7 Mikroskopia ja hien valmistus

Mikroskopia on rikkova aineenkoetusmenetelmä, sillä näytepala on tavallisesti irrotettava tutkittavasta kappaleesta. Lämpökäsittelypanokseen voidaan myös lisätä kappale, josta saadaan halutut näytepalat. Samaa näytettä voidaan hyödyntää kovuusmittauksessa, sekä mikroskopiassa. (Kivivuori, S., 2016, s. 229)

Tutkimusta tehdessä ensin näyte valmistetaan hiomalla vesihiomalaikalla, sekä timanttilaikalla. Tavoitteena on saada näyte peilikirkkaaksi. Hionnan jälkeen näyte syövytetään, jotta eri tavoin syöpyvät rakenteet saadaan esille. Teräksiä syövytettäessä voidaan hyödyntää nital-syövytettä, joka koostuu puhtaasta etanoliaikoholista, johon on lisätty 2...4% typpihappoa. (Kivivuori, S., 2016, s. 230). Alumiinin syövytys voidaan toteuttaa Keller-syövytteellä (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen, Metlab haastattelu 14.10.2022).

Normaalin optisen mikroskoopin käyttö perustuu näkyvään valoon. Valon aaltomaisuus rajaa sitä, kuinka pieniä asioita optisella laitteella kyetään havaitsemaan. Optista mikroskooppia käytettäessä valoalto siroaa aukkojen ja esteiden ansiosta. 200 nanometriä pienempiä asioita ei voida havaita, sillä sitä pienemmät kohteet ovat valon aallonpituudesta vähintään puolet pienempiä. Metalleja tutkittaessa käytetään tavallisesti käänteistä heijastusmikroskooppia. Valonsäde kulkee peilikirkkaaksi tehtyyn pintaan, jonka jälkeen se heijastuu linssien kautta tarkasteltavaksi. Suurennos voi olla 50...1200-kertainen. Mikroskooppiin voidaan liittää analysointia varten näyttölaitteita ja kuvannus ohjelmia. Optisen mikroskopian avulla saadaan tietoa näytteen mikrorakenteesta. Saatujen kuvien tulkinta edellyttää ammattitaitoa, sekä kokemusta. (Kivivuori, S., 2016, s. 230)

8 Lämpötilan mittaus, sekä säätö

Lämpötilaa säätämällä halutaan saavuttaa hallittu lämpötila uunitilaan. Tarkka lämpötilansäätö auttaa pääsemään lämpökäsittelyissä toivottuihin tuloksiin. Yleisuunille sallittu lämpötilapoikkeama on +/- 10-astetta. Ennen lämpötilan mittausta tulee varmistua siitä, että vastaavatko anturin lukemat uunin lämpötilaa. Anturi tulee sijoittaa oikeaan kohtaan uunia. Termoelementtiä käytettäessä tulee tarkastaa, että johdot on kytketty oikein. Uunissa olevan lämpökäsiteltävän tuotteen lämpötilan tulee vastata uunitilan lämpötilaa ja lämpötilan tulee jakautua uunitilassa tasaisesti. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 242—243).

Termoelementtien käyttö perustuu siihen, että kahden metallijohtimen liitoskohtaan syntyy lämpötilan vaikutuksesta jännite-ero. Mitattava lämpötila saadaan mittaamalla syntynyt elektromotorinen voima millivolttimittareilla. Saatuun lukemaan summataan referenssikohdan, sekä kyseisen termoelementtityypin emv-lämpötilataulukon nollakohta (lämpötila, jolla elektromotorinen voima on nolla) välinen jännite-ero. Summan avulla saadaan tietoon mitattu lämpötila ja emv-lämpötilataulukoiden nollakohtana käytetään tavallisesti 0-celsiusastetta. Lämpötilaa mittaavaan anturiin voidaan sijoittaa yksi, kaksi tai jopa kolme termoparia. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 243)

Käytetyin termoelementti on K-tyyppin cromel-alumel-elementti, joka toimii suurissakin lämpötiloissa (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 244—245).

Termopari eristetään keraamisella eristeellä pois lukien mittauskohta. Termoelementti voidaan lisäksi suojata suojaputkella. Termoelementin napaisuus voidaan K-tyyppin elementissä määritellä jännitemittarin lisäksi siten, että negatiivinen alumel on magneettinen ja chromel on vihertävä. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 246—247)

Lämpötilan säädön tavoitteena on halutunlainen tasainen tai muuttuva lämpötila. Käytettävät mittauslaitteet ovat yleensä sähköisiä. Mittaus ja lämmönoitinlaitteiden rinnalla on tavallisesti säätäjä. Uunin lämpötilaa kasvatettaessa suurenevat myös lämpöhäviöt. Sähkövastusuunien vastukset kytketään anturin ohjamaan lämpötilasäätimeen. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 257)

Uunin vastuksiin voidaan syöttää tehoa on/ei-säädintä käyttämällä. Lämmitettäessä uunia uunin lämpötila nousee ja lopulta ylittää asetusarvon, jolloin on/ei-säätäjä avaa kontaktorin. Lämpötilan laskiessa on/ei-säätäjä laittaa lämmitystehon päälle, jolloin lämpötila alkaa jälleen nousta. On/ei-säätäjää käytettäessä lämpötila on aina asetusarvoa korkeampi. Asetusarvon ja todellisen lämpötilan erotus on säätöpoikkeama, joka johtuu uunin häviötä suuremmasta syöttötehosta. On/ei-säätöä käytetään pienissä uuneissa ja sen heikkoutena on lämpötilan vaihtelu, sekä pysyvä säätöpoikkeama. Lämpötilaa mitataan tavallisesti vaippatermoelementillä on/ei-säätöä käytettäessä, sillä se kykenee seuraamaan uunin lämpötilamuutoksia viiveettä. On/ei-säätäjää käytettäessä voidaan se varustaa joidenkin asteiden lämpötilan väliasteella, jolloin kontaktori ei toimi liian lyhytjaksoisesti. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 257).

9 Lämpökäsittelyn laatu, kunnossapito, sekä kustannukset

Yrityksien pyrkimyksenä on tarjota laadukkaita palveluja, sekä tuotteita. Yrityksillä on käytössään laaturjestelmä, joka huomioi asiakkaiden tarpeet. Laatu politiikan avulla yrityksen johto linjaa, miten laatuasioissa menetellään. Yritykselle tai sen yksikölle on laadittu laatukäsikirja, johon toiminnan suunnittelu, työpistekohtaiset ohjeet, sekä laadunvarmistus ja tarkastukset pohjaavat. Laatuasioita säädellään myös standardeilla, kuten ISO 9000. Käsitteenä sana laatu koostuu laatujohtamisesta, sen ohjauksesta, valvonnasta, sekä laadun tarkastuksista. (Kivivuori & Härkönen, 2004, s. 260)

Laadun johtamisen perusta on asiakastyytyväisyys. Laatujohtaminen edellyttää säännöllisiä tarkastuksia, sekä katselmuksia. Laadunvarmistuksen avulla taataan tuotteelle sen vaatimustenmukaisuus. Asiakkaan tekemän tilauksen yhteydessä luodaan kaikki toiminnot kattava laatusuunnitelma. Vaatimukset huomioidaan laadittaessa valmistus, sekä tarkastusohjeita. Koestus, sekä muut tarkastustulokset tarkastellaan, jonka perusteella tilaukselle voidaan antaa toimituslupa. Asiakkaan, sekä lämpökäsittelijän yhteistyö on tärkeää lämpökäsittelyä suunniteltaessa. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 260)

Lämpökäsittelyä tehdessä syntyy prosesseissa aina hajontaa. Pahimmillaan prosessi tuottaa epäkelvoo laatua. Laadunohjauksella prosesseja voidaan mitata, suhteuttaa vaatimustasoon ja tehdä tarvittavat muutokset. Prosessi toimii, kun vähäisin kustannuksin kyetään

täyttämään asiakkaan laatuvaatimukset. Kaikilla työntekijöillä on laatuvastuu tekemästään työstä. Laatua voidaan lisäksi valvoa esimerkiksi vetokokeilla, kovuuskokeilla, sekä muilla aineenkoetusmenetelmillä. Tarkastuksissa voidaan myös tutkia kappaleiden mittamuutoksia, sekä pinnanlaatua. Tarkastus ja koetulokset luovat perustan, jonka avulla asiakas saa todistuksen tilaamansa tuotteen laadusta. Hyvä laatu edellyttää lisäksi hyvää palvelua, toimitusvarmuutta, asiakastyytyvääisyyttä, sekä yrityksen kilpailukykyä. Laadunvarmistus koostuu prosessiolosuhteiden valvonnasta, sekä näytteenotolla hankittujen näytteiden tutkimisesta. (Kivivuori, S. & Härkönen, S., 2004, s. 261)

Ennen näytteenottoa tuotteet tarkastetaan silmämääräisesti, jolloin voidaan havaita pinnassa olevia vikoja. Tarkastuksen apuna voidaan käyttää suurennuslasia tai endoskooppia. (Kivivuori, S., 2016, s. 256)

Uunien kunnossapito on osa yrityksen tekemää laatutyötä. Pyrkimys on tuotteen laadun, tuotannon tehokkuuden ja kustannusten valvonta ja kehitystyö. Kunnossapidon toteuttamiseksi tarvitaan kunnossapitosuunnitelma. Suunnitelma kattaa kulutusosien, rikki menneiden osien, sekä käyttöhäiriöiden ehkäisyn. Suunnitelma sisältää tarvittavat toiminnot uunien käyttökunnon ylläpitämiseen. (Kivivuori, S., 2016, s. 149)

Lämpökäsittelyjä tekevän henkilökunnan kouluttaminen on tärkeää kunnossapidon onnistumiseksi. Henkilökunnan osallistuminen on suurin haaste hyvän kunnossapitotyön onnistumiseksi. Säännöllinen tarkistustyö ja käyttöpäiväkirja auttavat havaintojen ja korjausten seuraamisessa. Ennakoivuus huoltotöissä tuottaa taloudellista hyötyä, sillä huoltotoimenpiteet kyetään ajoittamaan tuotannon kannalta rauhallisempiin hetkiin. Ennakoiva huolto toteutetaan seurantalaitteiden avulla. Uunin kuntoa voidaan arvioida esimerkiksi lämpötilaa, vaadittavaa tehoa, värähtelyä tai uuniatmosfääriin koostumusta tutkimalla. (Kivivuori, S., 2016, s. 150)

Laitekustannukset, sekä lämpökäsittelykustannukset muodostavat lämpökäsittelyyn liittyvät kokonaiskustannukset. Kustannuksia laskiessa tulee ottaa myös huomioon valmistusketjun kustannukset. (Kivivuori, S., 2016, s. 270)

Mitä monimuotoisempi tuote on, niin sitä kalliimmaksi sen valmistus tulee. Muotoilu voidaan toteuttaa valamalla, jonka osuus voi olla 10...25 % tuotteen kokonaiskustannuksista.

Koska lastuavan työstön osuus tuotannon kokonaiskustannuksista voi olla 20...45 %, niin valaminen valmistusmenetelmänä voi olla edullisempi. Lämpökäsittelyn osuus tuotteen kokonaiskustannuksista on vain 5...10 %. Lämpökäsittely tuotannon loppuvaiheessa luo kuitenkin tuotteelle sille asetetut mekaaniset ominaisuudet. (Kivivuori, S., 2016, s. 271)

10 Lämpökäsittelyiden ympäristövaikutukset

Päästöjen vähentäminen, sekä materiaalien ja energian tehokas käyttö ovat osa ympäristönsuojelua. Raaka-aineen, sekä energian käytön minimointi ja kestävien, sekä kierrätettävien tuotteiden valmistus ovat tärkeässä roolissa. Ympäristövaikutuksiin vaikutetaan tehokkaalla materiaalin, sekä energian käytöllä. (Kivivuori, S., 2016, s. 282)

Tietokoneavusteinen suunnittelu auttaa suunnittelemaan asiakkaalle materiaalitehokkaasti tuotteita, joiden lujuusominaisuudet ja muut ominaisuudet vastaavat käyttäjän toiveita. Tavoitteena on toteuttaa hyvällä toimitusajalla, hyvässä yhteistyössä hinnaltaan kilpailukykyinen tuote materiaalitehokkaasti. Nopea saatavuus tai tuotantokustannukset vaikuttavat valmistusmenetelmän valintaan. Tuotettava sarjakoko vaikuttaa myös valmistusmenetelmän kustannuksiin. (Kivivuori, S., 2016, s. 282)

Valittavana on paljon erilaisia valmistusmenetelmiä, joiden kustannustehokkuus soveltuu erilaisille sarjasuuruuksille aina protosarjoista suurempaan sarjatuotantoon asti. Pienien sarjojen tuotannon rinnalle on syntynyt lisääntynyt tarve suurempienkin sarjojen tuottamiseen. Suuret sarjakoot voidaan toteuttaa automaation, sekä robotisoinnin avustuksella. Tulevaisuudessa suuret sarjakoot voivat edellyttää tuotantokoneiden, sekä tuotantojärjestelmien modernisointia. (Kivivuori, S., 2016, s. 283)

Suomessa sovelletaan paljon lastuavaa työstöä pienillä ja keskisuurilla sarjoilla joustavuuden vuoksi. Usein materiaalitehokkuus kuitenkin unohtuu ja valittu valmistusmenetelmä kasvattaa tuotteen kokonaiskustannuksia materiaalin hukkakäytön takia. (Kivivuori, S., 2016, s. 283)

Lämpökäsittely on tavallisesti tuotannon vaiheista viimeinen, jolla vaikutetaan tuotteen ominaisuuksiin. Lämpökäsittely nostaa materiaalitehokkuutta, sillä hyvät

materiaaliominaisuudet vähentävät raaka-aineena tarvittavan materiaalin määrää. Materiaalin lujuus, sitkeys, muovattavuus, sekä muut mekaaniset ominaisuudet saadaan lämpökäsittämällä halutulle tasolle. Laadukas lämpökäsittely, joka takaa tuotteelle sen lopulliset ominaisuudet on tärkeä työvaihe. (Kivivuori, S., 2016, s. 283)

Energiatehokkuus tarkoittaa tuotteen elinkaaren aikana kulutetun energian käyttöä tehokkaasti. Tuote voi esimerkiksi kevytensä ansiosta säästää energiaa käytettäessä tuotetta. Laskelmien mukaan Suomessa oleva lämpökäsittelyteollisuus kykenisi säästämään miljoonia euroja tehostamalla tuotantolaitteiden energian käyttöä. Laiteryhmänä uunit ovat yksi eniten energiaa kuluttavista teollisuuden sovelluksista. Uunien energiatehokkuudessa on parantamisen varaa. Lämpökäsittelijät kehittävät omaa energiatehokkuuttaan, mutta uunien energiatehokkuus jää helposti pienemmälle huomiolle. Yritykset pelkäävät kokeilla uunien säätöjä, sekä käyttötapoja tuotantohäiriöiden pelossa. Uuneja saatetaan pitää kuumana, vaikka tuotannossa ei olisikaan lämpökäsiteltäviä tuotteita. Tulevaisuudessa tuotannonsuunnittelun kehittyessä ongelma voi korjaantua, kun uunien käyttöastetta voidaan parantaa ja käyttöaikaa tiivistää. (Kivivuori, S., 2016, s. 284)

Päästöt tuotantoketjun, sekä tuotteen käytön ajalta sisältyvät ympäristötehokkuuteen. Energiapäästöt, ilmansaasteet, päästöt vesistöihin, sekä kiinteät jätteet muodostavat kokonaispäästöt. EU:n tavoitteissa on vähentää 40 % kasvihuonekaasuja vuoteen 2030 mennessä. Uudistuvan energian osuus halutaan 27 % tasolle ja energiatehokkuutta halutaan kehittää 27 %. Vuonna 2014 Suomen kasvihuonepäästöt olivat 60 miljoonaa tonnia hiilidioksidia. Perusmetalliteollisuuden osuus kaikista päästöistä on vain 6 %, mutta energian tuotannon osuus kaikista päästöistä on sen sijaan 76 %. Tuotannossa syntyvien päästöjen lisäksi nykyisin on tärkeää tuotannonsuunnittelun, sekä kierrätyksen rooli päästöjen vähentämisessä. (Kivivuori, S., 2016, s. 288)

Hiukkaspäästöt ovat tehtaissa yhteinen haaste. Kaasujen mukana siirtyy hienojakoista pölyä. Ilman puhdistuslaitteita pöly leviää. Päästöt ilmaan on saatu kuriin tällä vuosituhanella, mutta tehtaissa voi edelleen olla päästölähteitä ja niiden poistamiseen tulee yhä panostaa. Hiilidioksidi ja typen oksidit ovat ilmaan siirtyvistä päästöistä merkittävimmät. Energian käyttöä tehostamalla voidaan pienentää hiilidioksidipäästöjä. (Kivivuori, S., 2016, s. 288—289)

11 Erkautuskarkaisun lähtötilanne

Valmistuspäällikkö Jyrki Lehtisen (haastattelu 28.06.2021) kertoman mukaan Lopen alumiinivalimolla lämpökäsittelyyn käytetyt sähkövastusuunit on varustettu on/ei-säädöllä. Uuneissa käytetään K-tyyppin termoelementtejä ja uuniatmosfäärinä toimii ilma. Laatuja valvotaan vetosauva analyysillä, sekä kovuusmittauksilla. Lämpökäsittelyuunit kalibroidaan 12 kk välein ja uuneissa on myös lämpötilakäyrää piirtävä tallentava laitteisto. Jälkikäsittelyn esimies hallinnoi lämpökäsittelyjä. Tehdaspäällikkö Sami Oksanen (haastattelu 28.06.2021) täsmentää, että Lopen alumiinivalimolla on käytössä sähkövastuksilla toimivat kiertoilmauunit.

11.1 Liutushehkutus

Liutushehkutuksen toteutustavasta, sekä sen vaikutuksista alumiinin mikrorakenteeseen on kuvattu luvussa 4.4. Kuvassa 3 on myös kuvattu lämpökäsittelyn vaikutuksia mikrorakenteeseen. Kuvassa 4 on kuvattu erkautuskarkaisua ja sen eri vaiheita.

Oikoja Matti Vesan (haastattelu 04.06.2021) kertoman mukaan Lopen alumiinivalimolla on käytössään kaksi liutushehkutusuunia. Jos liutushehkutuksessa käytettävää lämpötilaa voitaisiin laskea, niin voitaisiin parantaa energiatehokkuutta, lisäksi kappaleiden oikomisen tarve voisi vähentyä. Kappaleiden oikominen tehdään liutushehkutuksen jälkeen ennen keinovanhentamista. Keinovanhentamisen jälkeen kappaleiden oikaisu tulee huomattavasti hankalammaksi.

Lämpökäsittelijä Marko Seppäsen (haastattelu 04.06.2021) kertoman mukaan Lämpökäsittelyiden aikana alumiinikappaleet kootaan härkeihin. Häkkejä on kahta erilaista tyyppiä, joista toiseen kappaleet kootaan kerroksittain (kuva 11) ja toiseen samaan tasoon häkin pohjalle (kuva 12). Jos lämpökäsittelään vetokoesauvoja, niin ne sidotaan rautalangalla häkkiin kiinni (kuva 12). Liutushehkutusaika liutushehkutusuunissa on 8-tuntia ja erittäin ohuilla kappaleilla se voi olla 6-tuntia. Liutushehkutuksessa uunin 1 asetustemperatuurina on 540 °C ja uunissa 2 asetustemperatuurina on 560 °C. Liutushehkutuksessa lämpökäsittelijällä tulee olla asianmukaiset suojarusteet korkean lämpötilan takia.

Käytettävä liuotushehkuslämpötila on huomattavasti korkeampi, kuin kuvassa 4 (510...535 °C). Liuotushehkusuuuni on esitetty kuvassa 13.

Kuva 11. Kerroksittain panostettu häkki.



Kuva 12. Pohjalle panostettu häkki.



Kuva 13. Liutushehkutusuuni 1.



11.2 Sammutus

Sammutus tehdään liuotushehkutuksen jälkeen (kuva 4). Sammutuksen vaikutuksista alumiinin mikrorakenteeseen on kuvattu luvussa 4.4. Kuvassa 3 on myös kuvattu lämpökäsittelyn vaikutuksia mikrorakenteeseen.

Oikoja Matti Vesan (haastattelu 04.06.2021) kertoman mukaan Lopen alumiinivalimolla on käytössään kaksi sammutusallasta, jolloin molemmille liuotushehkutusuuneille on oma sammutusaltaansa.

Lämpökäsittelijä Marko Seppäsen (haastattelu 04.06.2021) kertoman mukaan sammutuksessa häkki, jossa alumiinikappaleet ovat lasketaan vesialtaaseen. Jos kappaleet ovat kerroksittain häkissä niin sammutus ei välttämättä ole täysin tasalaatuinen. Liuotushehkutusuunin 1 sammutusallas on kuvassa 14.

Kuva 14. Sammutusallas nro.1.



11.3 Keinovanhentaminen

Keinovanhentaminen tehdään liuotushehkutuksen ja sammutuksen jälkeen (kuva 4). Keinovanhentamisessa tapahtuvan erkaumalujittumisen vaikutuksista alumiinin mikrorakenteeseen on kuvattu luvussa 4.4. Kuvassa 3 on myös kuvattu lämpökäsittelyn vaikutuksia mikrorakenteeseen.

Oikoja Matti Vesan (haastattelu 04.06.2021) kertoman mukaan Lopen alumiinivalimolla on käytössään yksi keinovanhennusuuni (kuva 15).

Lämpökäsittelijä Marko Seppäsen (haastattelu 04.06.2021) kertoman mukaan keinovanhentaminen tapahtuu 150°C asetustilassa ja käytetty aika on liuotushehkutuksen tavoin 8-tuntia. Keinovanhentamisen jälkeen kappale saa jäähtyä huoneenlämpötilassa.

Käytettävä keinovanhennuslämpötila on huomattavasti matalampi, kuin kuvassa 4 (170...250 °C).

Kuva 15. Keinovanhennusuuni.



12 Testit, mikrorakenne, sekä tulokset

Testit suunniteltiin yhteistyössä Alteams Oy:n henkilökunnan kanssa. Testien suunnitteluun osallistuivat valimotoimintojen johtaja Eero Pellikka, tehdaspäällikkö Sami Oksanen, sekä valmistuspäällikkö Jyrki Lehtinen. Testeissä tutkittiin käytettävää liuotushehkuslämpötilaa, sekä keinovanhennuslämpötilaa. Lisäksi tutkittiin käytettäviä lämpökäsittelyaikoja ohuemmille kappaleille (materiaalipaksuus alle 15 mm). Työn lopuksi haluttiin vielä tutkia erkautuskarkaisun eri vaiheiden vaikutusta tutkitun alumiinilaadun mikrorakenteeseen. Testien käytännön toteuttamista ohjasi valmistuspäällikkö Jyrki Lehtinen ja vetokoesauvojen valmistus ja lämpökäsittelyt tehtiin yhteistyössä Lopen alumiinivalimon henkilöstön kanssa. Valimotoimintojen johtaja Eero Pellikka avusti mikroskopiakuvien tulkinnessa.

Testeissä käytetyt vetokoesauvat valmistettiin täysin Alteams:in Lopen alumiinivalimolla. Vetokoesauvojen valmistusta varten valimolla oli tätä tarkoitusta varten valmistettu puinen malli (kuva 16), jonka avulla voitiin valmistaa hiekasta valua varten muotteja (kuva 17).

Yhdessä muotissa valmistui neljä vetokoesauvaa kerralla (kuva 18). Vetokoesauvat merkittiin stanssaamalla ja ne singottiin ennen leikkausta. Sinko ampuu kappaleen pintaan teräshiukkasia ja parantaa vetokoesauvan pinnanlaatua. Vetokoesauvojen lämpökäsittelyt tehtiin myös Lopen alumiinivalimolla. Lopuksi vetokoesauvoihin koneistettiin M20 kokoiset kierteet, joiden avulla vetokoesauvat voitiin kiinnittää vetokoneeseen. Vetokokeet (kuva 20) ja kovuuskokeet (kuva 21) teetettiin Metlab nimisessä yrityksessä, josta saadut testauselosteet ovat tämän opinnäytetyön liitteissä (Liite 1—Liite 3). Valmiit vetokoesauvat (kuva 19) olivat 200 mm pitkiä, paksuimman kohdan halkaisija ennen kierrettä oli 21 mm ja vetokoesauvan ohuimman kohdan paksuus oli 15 mm. Vetokoesauvan 15 mm halkaisijaltaan olevan ohuemman kohdan suoran osuuden pituus on 80 mm. 15 mm halkaisijaltaan olevan osan ja 21 mm halkaisijaltaan olevien osien yhtyminen oli loiva. Suhdesauvan kaavalla (kaava 1) laskettu alkumittapituus tutkimuksissa käytetyille vetokoesauvoille on 75 mm. Mikroskopiatutkimusten testauseloste on liitteessä nro: 4.

Kuva 16: Vetokoesauvojen muotin valmistukseen käytetty puinen malli.



Kuva 17: Valetut hiekkamuotit.



Kuva 18: Valetut vetokoesauvat muotista purettuna.



Kuva 19: Valmis vetokoesauva.



Kuva 20: Galdabini Q200-vetokone (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen (Metlab), henkilökohtainen tiedonanto, 14.10.2022).



Kuva 21: Brinellin kovuuskone, Metlab.



12.1 Testi 1: Liotushehkutuslämpötilan optimointi

Tässä testissä pyrittiin optimoimaan tutkitulle materiaalille käytettävää liotushehkutuslämpötilaa. Testin odotusarvona on uunien energiatehokkuuden optimointi ja kappaleiden oikaisun tarpeen minimointi liotushehkutuksen jälkeen.

12.1.1 Koemenetelmät

Testissä valettiin 16 kpl vetokoesauvoja primäärialumiinista. Kierrätysromua emme päätyneet käyttämään, vaikka sen käyttö tuotannossa muuten on tavallista. Vetokoesauvojen annettiin jäähtyä kunnolla ennen muotin purkamista vääntymisen välttämiseksi. Vetokoesauvat merkittiin stanssaamalla ja valutapahtumista johtuvien poikkeamien eliminoinniseksi kuhunkin lämpökäsittelyyn valitut sarjat valittiin eri valumuoteista. Toisin sanoen siis saman sarjan lämpökäsittelyyn valittiin kaikki neljä vetokoesauvaa eri muoteista. Liotushehkutuksen ja keinovanhennuksen välinen aika oli kaikilla vetokoesauvoilla sama.

Vetokoesauvat liuotushehkutettiin käyttäen asetuslämpötiloja 520 °C...550°C ja liuotushehkutusaika oli kaikilla sauvoilla 8 h. Liuotushehkutuslämpötilaa valvottiin uunin oman mittarin lisäksi termoelementillä. Liuotushehkutuksen jälkeen vetokoesauvoille tehtiin sammutus.

Heti sammutuksen jälkeen vetokoesauvoille tehtiin keinovanhennus käyttäen 150 °C asetuslämpötilaa ja vanhennukseen käytetty aika oli 8 h. Keinovanhennukseen liittyen mittasimme termoelementillä tavallisen keittiöuunin ja vanhennukseen tarkoitettun teollisuusuunin käyttäytymistä testilämpötilassa ja vertailimme niiden käyttäytymistä. Tavallinen keittiöuuni ja tarkoitukseen valmistettu teollisuusuuni käyttäytyivät niin eri tavoin, että hylkäsimme keittiöuunin käytön testien keinovanhennuksissa. Keinovanhennuksen jälkeen vetokoesauvojen annettiin jäähtyä huoneen lämpötilassa.

Lämpökäsittelyiden jälkeen vetokoesauvoille teetettiin veto- ja kovuuskokeet (Brinellin kovuus). Jokaiselle sauvalle tehtiin kolme kovuusmittausta ja tutkitun sauvan kovuus muodostui niiden keskiarvosta. Saadun testauselosteen perusteella saadut tulokset taulukoitiin. Tuloksissa tutkittiin, että mitkä koesauvat täyttivät standardin SFS-EN 1706 asettamat minimirajat materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin (taulukko 5).

12.1.2 Tulokset

Liuotushehkutuslämpötiloja mitattiin termoelementillä tunnin välein ja tulokset kirjattiin ylös (taulukko 7). Taulukossa ylärivillä on uunin asetuslämpötila ja alla on kyseisen sauvan tunnin välein mitatut lämpötilat. Keskiarvolämpötila on laskettu alimmalle riville. Liuotushehkutus osoittautui 550 °C asetuslämpötilaa korkeammissa lämpötiloissa haastavaksi, koska uunissa on lämpötilanrajoitin. Vetokoesauvojen 1.1—1.4 liuotushehkutuslämpötilojen keskiarvo oli 538,12 °C ja hehkutuksen loppuvaiheessa lämpötila nousi kuitenkin lähelle 550 °C lämpötilaa. Taulukosta on havaittavissa, että uunin lämpeneminen lähelle asetuslämpötilaa kestää huomattavan pitkään.

Taulukko 7: Liuotushehkutuslämpötilan mittauspöytäkirja.

	Sauvojen nro.			
Lämpötila °C	1.1 (550°C)	2.1 (540°C)	3.1 (530°C)	4.1 (520°C)
1h	481	498	507	397
2h	536	534	523	466
3h	544	542	529	497
4h	549	544	530	506
5h	548	545	531	513
6h	551	546	531	514
7h	549	545	530	516
8h	548	544	530	516
Keskiarvolämpötila	538,25	537,25	526,375	490,625

Testin nro: 1 tulokset taulukoitiin (taulukko 8). Murtolujuuden, Venymisraja $R_{p0,2}$, murtovenymän, sekä kovuuden tulokset merkittiin vihreällä ja punaisella värillä. Vihreällä värillä merkittiin ne tulokset, jotka täyttävät standardin kriteerit. Punaisella värillä merkityt arvot ovat standardin minimiarvojen alapuolella. Ruksilla merkityt vetokoesauvat täyttivät standardin minimiarvot.

Taulukko 8: Testi 1: Testipöytäkirja.

Koesauvan nro.	Liuotushehkutuslämpötila °C	Murtolujuus Rm (MPa)	Venymisraja $R_{p0,2}$ (MPa)	Murtovenymä %	Brinellin kovuus HBW	Täyttää kriteerit (X)
Sauva 1.1	550/538,25	259	217	2,50	86/99/102 Avg: 96	X
Sauva 1.2	550/538,25	254	216	2	97/98/100 Avg: 98	X
Sauva 1.3	550/538,25	258	220	2	93/90/96 Avg: 93	X
Sauva 1.4	550/538,25	247	210	1,5	105/103/100 Avg: 103	
Sauva 2.1	540/537,25	238	196	2,5	91/102/100 Avg: 98	X
Sauva 2.2	540/537,26	234	198	1,5	87/105/95 Avg: 95	
Sauva 2.3	540/537,27	232	191	2	92/91/95 Avg: 93	X
Sauva 2.4	540/537,28	234	198	1,5	87/102/92 Avg: 94	
Sauva 3.1	530/526,375	246	211	1,5	94/100/97 Avg: 97	
Sauva 3.2	530/526,376	242	205	1,5	97/97/91 Avg: 95	
Sauva 3.3	530/526,377	239	208	1,5	97/92/97 Avg: 96	
Sauva 3.4	530/526,378	249	214	1,5	86/92/98 Avg: 92	
Sauva 4.1	520/490,625	241	213	1	92/95/97 Avg: 95	
Sauva 4.2	520/490,626	241	211	1	99/103/95 Avg: 99	
Sauva 4.3	520/490,627	236	205	1	103/98/102 Avg: 101	
Sauva 4.4	520/490,628	237	209	1	103/102/99 Avg: 101	

Lopuksi laskettiin vielä jokaiselle sauvaryhmälle tutkittujen mekaanisten ominaisuuksien keskiarvot (Taulukko 9). Taulukossa käytettiin värejä samoin periaattein, kuin taulukossa 8. Kriteerit täyttävä sauvaryhmä merkittiin myöskin ruksilla.

Taulukko 9: Testi 1: Keskiarvotaulukko.

Koesauvojen nro.	Murtolujuus R _m (MPa)	Venymisraja R _{p0,2} (MPa)	Murtovenymä %	Brinellin kovuus (HBW)	Täyttää kriteerit (X)
Sauvat 1	254.5 (+4.5/-7.5)	215.75 (+4.25/-5.75)	2 (+0.5/-0.5)	97,5 (+5.5/-4.5)	X
Sauvat 2	234.5 (+3.5/-2.5)	195.75 (+2.25/-4.75)	1,875 (+0.625/-0.375)	95 (+3/-2)	
Sauvat 3	244 (+5/-5)	209.5 (+4.5/-4.5)	1,5 (+0/-0)	95 (+2/-3)	
Sauvat 4	238.75 (+2.25/-2.75)	209.5 (+3.5/-4.5)	1 (+0/-0)	99 (+2/-4)	

Lämpötilan laskeminen liuotushehkuksessa vaikuttaa kaikkiin tutkittuihin ominaisuuksiin jossain määrin, mutta kovuusmittausten tuloksiin lämpötilan vaihtelu ei juurikaan vaikuta. Murtolujuuden, venymisrajan R_{p0,2}, sekä kovuuden osalta kaikki testitulokset täyttivät standardin asettamat minimiarvot. Kriittiseksi mitattavaksi suureeksi muodostui murtovenymä, jonka minimiarvo (2 %) toteutui vain viidellä vetokoesauvoista. Testin perusteella voidaan todeta, että liuotushehkuksessa laskettaessa murtovenymä pienenee. Lisäksi voidaan todeta, että liuotushehkuksessa tutkittavan materiaalin osalta tulee jatkossa käyttää 550 °C asetustilaa, jolloin termoelementillä tunnin välein mitattujen lämpötilojen keskiarvo liuotushehkuksessa on lähellä 540 °C lämpötilaa.

12.2 Testi 2: Keinovanhennuslämpötilan optimointi

Tässä testissä pyrittiin optimoimaan tutkitulle materiaalille käytettävää keinovanhennuslämpötilaa. Testin odotusarvona on uunien energiatehokkuuden optimointi.

12.2.1 Koemenetelmät

Testissä valettiin 6 kpl vetokoesauvoja primäärialumiinista. Kierrätysromua emme päätyneet käyttämään, vaikka sen käyttö tuotannossa muuten on tavallista. Vetokoesauvojen annettiin jäähtyä kunnolla ennen muotin purkamista vääntymisen välttämiseksi. Vetokoesauvat merkittiin stanssaamalla ja valutapahtumista johtuvien poikkeamien eliminoimiseksi kuhunkin lämpökäsittelyyn valitut sarjat valittiin eri valumuoteista. Toisin sanoen siis saman sarjan lämpökäsittelyyn valittiin kaikki neljä vetokoesauvaa eri muoteista.

Liuotushehkuksen ja keinovanhennuksen välinen aika oli kaikilla vetokoesauvoilla sama. Keinovanhennuslämpötila 150 °C on tutkittu jo testissä nro: 1.

Vetokoesauvat liuotushehkutettiin käyttäen asetustilaa 550°C (testi 1) ja liuotushehkuksaika oli kaikilla sauvoilla 8 h. Liuotushehkuksen jälkeen vetokoesauvoille tehtiin sammutus.

Heti sammutuksen jälkeen vetokoesauvoille tehtiin keinovanhennus käyttäen 140 °C ja 160 °C asetustemperatuureja. Keinovanhennuksen aikana uunin lämpötilaa mitattiin tunnin välein ja tulokset kirjattiin muistiin. Vanhennukseen käytetty aika oli 8 h. Keinovanhennuksen jälkeen vetokoesauvojen annettiin jäähtyä huoneen lämpötilassa.

Lämpökäsittelyiden jälkeen vetokoesauvoille teetettiin veto- ja kovuuskokeet (Brinellin kovuus). Jokaiselle sauvalle tehtiin neljä kovuusmittausta ja tutkitun sauvan kovuus muodostui niiden keskiarvosta. Saadun testauselosteen perusteella saadut tulokset taulukoitiin. Tuloksissa tutkittiin, että mitkä koesauvat täyttivät standardin SFS-EN 1706 asettamat minimirajat materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin (taulukko 5).

12.2.2 Tulokset

Keinovanhennustemperatuureja mitattiin termoelementillä tunnin välein ja tulokset kirjattiin ylös (taulukko 10). Taulukossa ylärivillä on uunin asetustemperatura ja alla on kyseisen sauvan tunnin välein mitatut lämpötilat. Keskiarvolämpötila on laskettu alimmalle riville. Olisimme halunneet testata keinovanhennuksessa lämpötiloja 170 °C ja 180 °C nähdäksemme, että miten ylivanhenneminen vaikuttaa materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Testien aikana kuitenkin paljastui, että uunissa oleva lämpötilanrajoitin estää keinovanhennuksen 160 °C lämpötilaa korkeammilla lämpötiloilla. Taulukosta on havaittavissa, että uunin lämpeneminen lähelle asetustemperatuureja on huomattavasti liuotushehkusuuja nopeampaa ja lämpötilan hallinta on tarkempi. Edellä mainittu voi olla seurausta siitä, että keinovanhennuksessa käytetyt lämpötilat ovat huomattavasti liuotushehkusuuja pienemmät.

Taulukko 10: Keinovanhennuslämpötilan mittauspöytäkirja.

	Sauvojen nro.		
Lämpötila °C	1.1 - 1.3 (140°C)	2.1 - 2.4 (150°C)	3.1 - 3.3 (160°C)
1h	142	149	153
2h	140	153	160
3h	141	157	164
4h	139	153	163
5h	140	157	163
6h	142	153	162
7h	147	153	163
8h	141	149	163
Keskiarvolämpötila	141,5	153	161,375

Testin nro: 2 tulokset taulukoitiin (taulukko 11). Murtolujuuden, Venymisraja $R_{p0,2}$, murtovenymän, sekä kovuuden tulokset merkittiin vihreällä ja punaisella värillä. Vihreällä värillä merkittiin ne tulokset, jotka täyttävät standardin kriteerit. Punaisella värillä merkityt arvot ovat standardin minimiarvojen alapuolella. Ruksilla merkityt vetokoesauvat täyttivät standardin minimiarvot.

Taulukko 11: Testi 2: Testipöytäkirja.

Koesauvan nro.	Keinovanhennuslämpötila °C	Murtolujuus R_m (MPa)	Venymisraja $R_{p0,2}$ (MPa)	Murtovenymä %	Brinellin kovuus HBW	Täyttää kriteerit (X)
Sauva 1.1	140/141,5	230	182	2,5	94/97/91/87 Avg: 92	
Sauva 1.2	140/141,5	233	188	2	91/90/91/91 Avg: 91	
Sauva 1.3	140/141,5	233	187	2,5	89/87/96/91 Avg: 91	
Sauva 2.1	150/153	259	217	2,50	86/99/102 Avg: 96	X
Sauva 2.2	150/153	254	216	2	97/98/100 Avg: 98	X
Sauva 2.3	150/153	258	220	2	93/90/96 Avg: 93	X
Sauva 2.4	150/153	247	210	1,5	105/103/100 Avg: 103	
Sauva 3.1	160/161,375	261	224	1,5	101/102/98/104 Avg: 101	
Sauva 3.2	160/161,375	261	227	1,5	104/98/105/102 Avg: 102	
Sauva 3.3	160/161,375	261	229	2	105/103/99/103 Avg: 102	X

Lopuksi laskettiin vielä jokaiselle sauvaryhmälle tutkittujen mekaanisten ominaisuuksien keskiarvot (Taulukko 12). Taulukossa käytettiin värejä samoin periaattein, kuin taulukossa 11. Kriteerit täyttävä sauvaryhmä merkittiin myöskin ruksilla.

Taulukko 12: Testi 2: Keskiarvotaulukko.

Koesauvojen nro.	Murtolujuus R_m (MPa)	Venymisraja $R_{p0,2}$ (MPa)	Murtovenymä %	Brinellin kovuus (HBW)	Täyttää kriteerit (X)
Sauvat 1	232 (+1.0/-2.0)	185,67 (+2,33/-3,67)	2,33 (+0,17/-0,33)	91,33 (+0,67/-0,33)	
Sauvat 2	254.5 (+4.5/-7.5)	215.75 (+4.25/-5.75)	2 (+0.5/-0.5)	97.5 (+5.5/-4.5)	X
Sauvat 3	261 (+0,0/-0,0)	226,67 (+2,33/-2,67)	1,67 (+0,33/-0,17)	101,67 (+0,33/-0,67)	

Tuloksista voidaan päätellä, että murtolujuus, venymisraja $R_{p0,2}$, sekä kovuus kasvavat keinovanhennuslämpötilaa nostettaessa. Murtovenymä sen sijaan pienenee lämpötilaa

nostettaessa, joten käytettävä keinovanhennuslämpötila on lujuuden ja kovuuden, sekä murtovenymän kompromissi. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että jo aiemmin käytetty keinovanhennuslämpötila (150 °C) tuottaa riittävän lujuuden, kovuuden, sekä venymän. 140 °C asetustilalla ei saavutettu riittävää $R_{p0,2}$ -venymisrajaa ja 160 °C asetustilalla ei saavutettu riittävää murtovenymää.

12.3 Testi 3: Lämpökäsittelyaikojen optimointi

Tässä testissä haluttiin tutkia, voitaisiinko ohuemmillä materiaalipaksuuksilla (alle 15 mm) siirtyä käyttämään pienempiä lämpökäsittelyaikoja liuotushehkutusta ja keinovanhennusta tehtäessä. Testin tavoitteena oli myös tuotannon tehostaminen.

Tuotteen läpimenoaika tulisi lämpökäsittelyissä olla mahdollisimman lyhyt. Lyhyt läpimenoaika hyödyttää sekä lämpökäsittelijää, että tilaajaa. (Kivivuori & Härkönen, 2004, s. 85)

12.3.1 Koemenetelmät

Testissä valettiin 9 kpl vetokoesauvoja primäärialumiinista. Kierrätysromua emme päätyneet käyttämään, vaikka sen käyttö tuotannossa muuten on tavallista. Vetokoesauvojen annettiin jäähtyä kunnolla ennen muotin purkamista vääntymisen välttämiseksi. Vetokoesauvat merkittiin stanssaamalla ja valutapahtumista johtuvien poikkeamien eliminoimiseksi kuhunkin lämpökäsittelyyn valitut sarjat valittiin eri valumuoteista. Toisin sanoen siis saman sarjan lämpökäsittelyyn valittiin kaikki neljä vetokoesauvaa eri muoteista.

Liuotushehkutukset tehtiin yhden aamuvuoron aikana ja keinovanhennus tehtiin tätä seuranneessa iltavuorossa.

Vetokoesauvat liuotushehkutettiin lämpötilassa, joka oli testin nro: 1 tulosten mukainen. Sauvat 1.1–1.3 olivat liuotushehkutuksessa neljä tuntia, sauvat 2.1–2.3 kuusi tuntia ja sauvat 3.1–3.3 neljä tuntia. Liuotushehkutuksen jälkeen vetokoesauvoille tehtiin sammutus veteen.

Heti sammutuksen jälkeen vetokoesauvoille tehtiin seuraavassa vuorossa keinovanhennus testi nro: 2 tulosten mukaisessa lämpötilassa. Vanhennukseen käytetty aika sauvoilla 1.1–1.3

oli neljä tuntia, sauvoilla 2.1–2,3 kuusi tuntia ja sauvoilla 3.1–3.3 kahdeksan tuntia. Keinovanhennuksen jälkeen vetokoesauvojen annettiin jäähtyä huoneen lämpötilassa.

Lämpökäsittelyiden jälkeen vetokoesauvoille teetettiin veto- ja kovuuskokeet (Brinellin kovuus). Jokaiselle sauvalle tehtiin neljä kovuusmittausta ja tutkitun sauvan kovuus muodostui niiden keskiarvosta. Saadun testauselosteen perusteella saadut tulokset taulukoitiin. Tuloksissa tutkittiin, että mitkä koesauvat täyttivät standardin SFS-EN 1706 asettamat minimirajat materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin (taulukko 5).

12.3.2 Tulokset

Testin nro: 3 tulokset taulukoitiin (taulukko 13). Murtolujuuden, Venymisraja $R_{p0,2}$, murtovenymän, sekä kovuuden tulokset merkittiin vihreällä ja punaisella värillä. Vihreällä värillä merkittiin ne tulokset, jotka täyttävät standardin kriteerit. Punaisella värillä merkityt arvot ovat standardin minimiarvojen alapuolella. Ruksilla merkityt vetokoesauvat täyttivät standardin minimiarvot.

Taulukko 13: Testi 3: Testipöytäkirja.

Koesauvan nro.	Murtolujuus R_m (MPa)	Venymisraja $R_{p0,2}$ (MPa)	Murtovenymä %	Brinellin kovuus HBW	Täyttää kriteerit (X)
Sauva 1.1 (4h/4h)	224	160	4	77/87/78/80 Avg: 81	
Sauva 1.2 (4h/4h)	225	156	4	85/83/84/82 Avg: 84	
Sauva 1.3 (4h/4h)	233	162	4,5	85/88/84/86 Avg: 86	
Sauva 2.1 (6h/6h)	253	201	3	90/94/89/97 Avg: 93	x
Sauva 2.2 (6h/6h)	249	197	3,5	92/88/88/90 Avg: 90	x
Sauva 2.3 (6h/6h)	253	193	3,5	93/93/92/87 Avg: 91	x
Sauva 3.1 (4h/8h)	250	189	3,5	91/88/94/94 Avg: 92	
Sauva 3.2 (4h/8h)	236	190	2,5	89/84/87/93 Avg: 88	x
Sauva 3.3 (4h/8h)	255	197	3,5	91/90/84/86 Avg: 88	x

Lopuksi laskettiin vielä jokaiselle sauvaryhmälle tutkittujen mekaanisten ominaisuuksien keskiarvot (Taulukko 14). Taulukossa käytettiin värejä samoin periaattein, kuin taulukossa 13. Kriteerit täyttävä sauvaryhmä merkittiin myöskin ruksilla.

Taulukko 14: Testi 3: Keskiarvotaulukko.

Koesauvojen nro.	Murtolujuus R_m (MPa)	Venymisraja $R_{p0,2}$ (MPa)	Murtovenymä %	Brinellin kovuus HBW	Täyttää kriteerit (X)
Sauvat 1 (4h/4h)	227,3 (+5,7/-3,3)	159,3 (+2,7/-3,3)	4,2 (+0,3/-0,2)	83,7 (+2,3/-2,7)	
Sauvat 2 (6h/6h)	251,7 (+1,3/-2,7)	197 (+4/-4)	3,3 (+0,2/-0,3)	91 (+2,0/-1,0)	x
Sauvat 3 (4h/8h)	247 (+8,0/-11,0)	192 (+5,0/-3,0)	3,2 (+0,3/-0,7)	89,3 (+2,7/-1,3)	x

Tuloksista voidaan huomata, että murtovenymä oli tässä testissä kaikilla sauvaryhmillä aiempia testejä parempi. Vetokoesauvat 2.1–2.3 täyttivät kaikki standardin asettamat kriteerit. Näin ollen voidaan todeta, että ohuemmillä ainevahvuuksilla (alle 15 mm) voidaan huoletta siirtyä käyttämään kuuden tunnin lämpökäsittelyaikoja liuotushehkuksessa, sekä keinovanhennuksessa. Kuuden tunnin lämpökäsittelyajat tuovat säästöä silloin, kun lämpökäsittely toimii kolmessa vuorossa. Sauva 3.1 alitti niukasti standardin asettaman minimirajan venymisraja $R_{P0,2}$ tapauksessa. Sauvojen 3.1–3.3 tapauksessa kuitenkin niidenkin keskiarvot olivat standardin minimirajan yläpuolella. Pienellä riskillä voidaan siis siirtyä käyttämään hieman yli neljän tunnin liuotushehkutusaikaa, jota seuraa kahdeksan tunnin keinovanhennus. Hieman yli neljän tunnin liuotushehkutusaika ohuemmillä kappaleilla nopeuttaisi liuotushehkutusta lähes neljä tuntia ja toisi selkeästi säästöjä silloinkin, kun lämpökäsittely toimisi kahdessa vuorossa.

12.4 Erkautuskarkaisun vaikutus AlSi7Mg EN AC-42100 mikrorakenteeseen

Tässä luvussa haluttiin tutkia erkautuskarkaisun eri vaiheiden vaikutuksia tutkittavan materiaalin mikrorakenteeseen. Näytepalat valmistettiin ja lämpökäsiteltiin Alteams Oy:n Lopen metallivalimolla. Mikroskopiaturkimukset teetettiin yrityksessä nimeltään Metlab, joka toimii Tampereella.

12.4.1 Tutkimusmenetelmät

Aluksi valettiin kolme vetokoesauvaa, jotka merkittiin stanssaamalla. Sauva nro:1 jätettiin valutilaiseksi, sauva nro:2 liuotushehkutettiin ja sauva nro:3 liuotushehkutettiin, sekä keinovanhennettiin. Liuotushehkuksessa uunin asetustemperatuurina oli 560 °C ja keinovanhennuksessa 150 °C. Liuotushehkutusaika, sekä keinovanhennukseen käytettävä aika olivat molemmat kahdeksan tuntia.

Vetokoesauvoista leikattiin vannesahalla (kuva 22) noin 15 mm paksu pala näytteen valmistusta varten. Näytteet hiottiin käsin hiontana ilman nappia SiC- papereilla P1000 karkeuteen saakka (kuva 23). Kiillotus tehtiin MD-Floc-kankaalla ja 3 µm timanttisuspensiolla sekä 1 µm Alumina (alumiinioksidi) -suspensiolla. (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen, Metlab, haastattelu 14.10.2022)

Kuva 22: Vannesaha, Metlab.



Kuva 23: Hiomakoneet, Metlab.

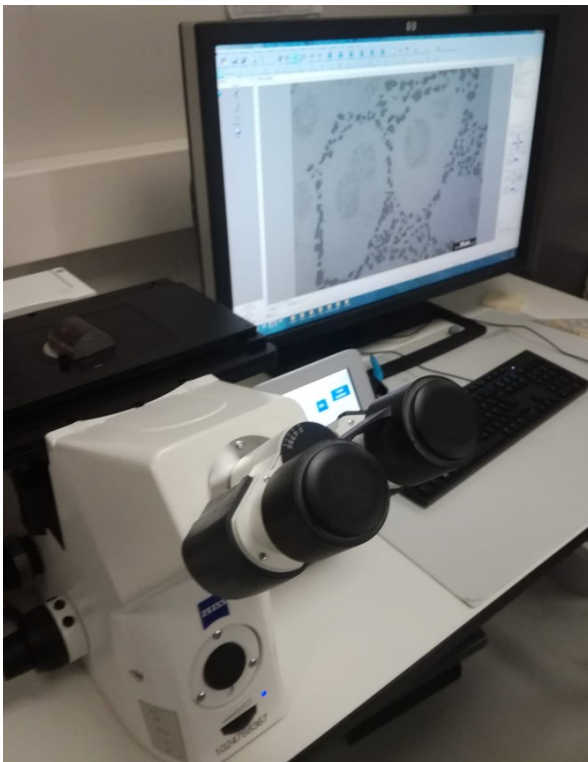


Syövytys toteutettiin kastosyövytyksenä (noin 20 sekuntia) Keller-syövytteellä. Metlabin laboratoriotyöskentelyn tavanomaiset työturvallisuusohjeet huomioitiin eli kemikaalien turvallinen ja huolellinen käsittely sekä asianmukaiset turvavarusteet eli suojahanskat, suojalasit, laboratoriotakki ja kemikaaleja kestävä turvakengät olivat puettuina. Syövytys

suoritettiin vetokaapissa. (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen, Metlab, haastattelu 14.10.2022)

Optinen mikroskoopi Zeiss Axio Observer Z1m (kuva 24). Mittajanat kuvissa (kuvien nimissä myös käytetyt linssit: 2,5, 5, 10 ja 50x, mutta nämä ovat laitekohtaisia, eikä siten relevantteja opinnäytetyöjulkaisussa). Jokaisesta näytteestä on samat suurennokset, yhteensä 4 eri suurennoksella. Näytteissä oli huokosia, joita pyrittiin välttämään kuvia otettaessa, jotta nähtäisiin mikrorakenne. AxioVision-ohjelman avulla mikroskoopin kuvat voitiin tallentaa .jpg-muodossa ja lähettää asiakkaalle linkki kuviin, josta ne voidaan ladata. (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen, Metlab, haastattelu 14.10.2022)

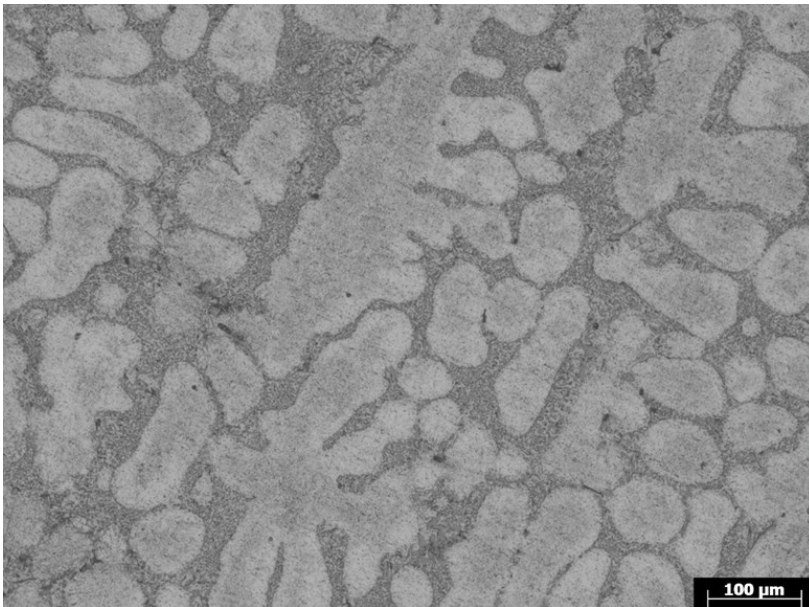
Kuva 24: Optinen mikroskoopi Zeiss Axio Observer Z1m, Metlab.



12.4.2 Tulokset

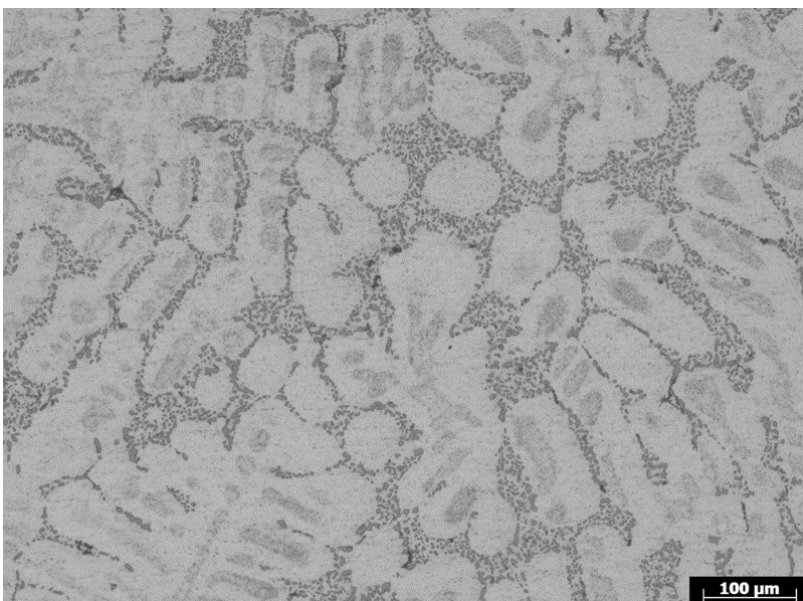
Mikrorakennekuvissa vaaleat alueet ovat jähmettymisessä syntyneitä primäärialumiinikiteitä ja tummat alueet Al-Si eutektikumia. Alumiinin rakenne kaikissa kuvissa on dentriittinen. (Valimotointojen johtaja Eero Pellikka, haastattelu 31.10.2022). Valutilainen mikrorakenne on esitetty kuvassa 25.

Kuva 25: EN AC-42100 Valutilainen mikrorakenne (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen (Metlab), henkilökohtainen tiedonanto, 19.10.2022).



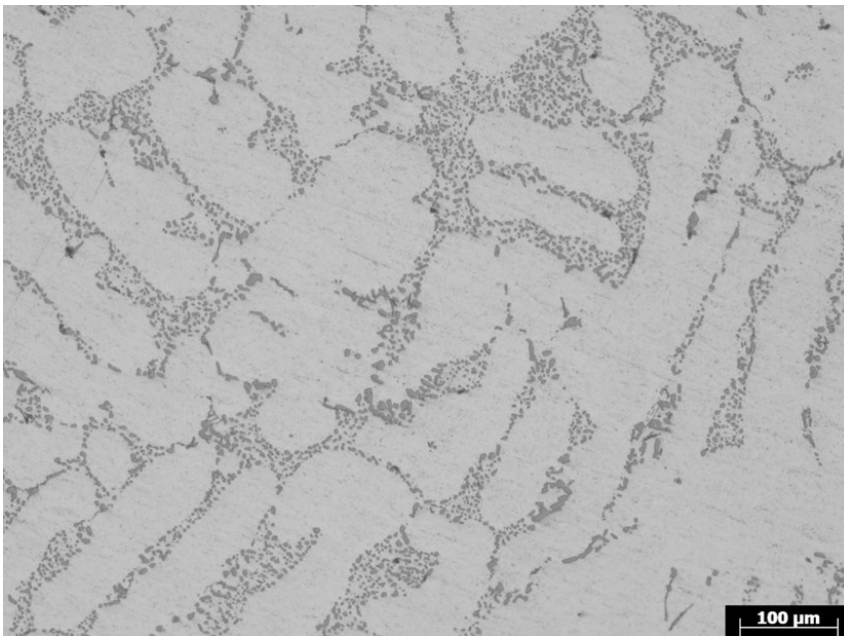
Alumiinidentriiteissä näkyvät seosaine-erkaumat ovat osittain lienneet alumiinirakenteeseen, sekä piikiteet eutektikumissa ovat karkeutuneet (Valimotoimintojen johtaja Eero Pellikka, haastattelu 31.10.2022). Liuotushehkutettu mikrorakenne on esitetty kuvassa 26.

Kuva 26: EN AC-42100 Liuotushehkutettu mikrorakenne (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen (Metlab), henkilökohtainen tiedonanto, 19.10.2022).



Kuvassa 27 on esitetty täysin erkautuskarkaistu mikrorakenne. Eutektisen piin rakenne ei ole keinovanhennuksen aikana muuttunut. Alumiinikiteessä ei ole havaittavissa suuria epäkoherentteja erkaumia. (Valimotoimintojen johtaja Eero Pellikka, haastattelu 31.10.2022).

Kuva 27: EN AC-42100 Erkautuskarkaistu mikrorakenne (Kehityspäällikkö Minna Kotilainen (Metlab), henkilökohtainen tiedonanto, 19.10.2022).



12.5 Tulosten tarkastelu, pohdinta ja johtopäätökset

Testin nro: 1 tulos on se, että todellinen mitattu lämpötilojen keskiarvo liuotushehkutuksessa tulisi olla lähellä 540 °C lämpötilaa. Käytännössä edellä mainittuun keskilämpötilaan voidaan päästä hieman korkeammillakin asetustemperatuurien arvoilla. Testin nro: 2 perusteella todellinen mitattu lämpötilojen keskiarvo keinovanhennuksessa tulisi olla lähellä 153 °C lämpötilaa. Keinovanhennuksessa uunin todellinen mitattu lämpötila vastaa liuotushehkutusta paremmin uunin asetustemperatuurilla. Jos verrataan saatuja tuloksia tutkittuun teoriaan peilaten, niin voidaan huomata yhtäläisyyttä niiden välillä. Taulukossa 4 liuotushehkutuslämpötilaksi on annettu 540 °C ja keinovanhennuslämpötilaksi 150 °C. Testin nro: 3 perusteella voidaan todeta, että alle 15 mm ainevahvuuksilla voidaan siirtyä käyttämään kuuden tunnin lämpökäsittelyaikoja liuotushehkutusta, sekä keinovanhennusta tehtäessä. Alle 15 mm ainevahvuuksilla voidaan myös tehdä liuotushehkutus hieman yli

neljässä tunnissa, jota seuraa kahdeksan tunnin keinovanhennus. Ohuempien kappaleiden lämpökäsittelyihin on aiemmin käytetty kahdeksan tuntia sekä liuotusvehkutuksessa, että keinovanhennuksessa.

Testit 1–3 kustansivat Alteams Oy:n Lopen alumiinivalimolle 2985 €, lisäksi mikroskopiaturkimukset maksoivat 900 €. Kustannuksia syntyi jonkin verran myös vetokoesauvojen valmistuksesta, sekä lämpökäsittelyistä. (Valmistuspäällikkö Jyrki Lehtinen, haastattelu 24.10.2022)

Tutkimuskysymyksenä on: ”Voidaanko lämpökäsittelyä optimoimalla saada aikaan säästöjä”? Tutkimustyön tuloksena saatiin tärkeää tietoa ja varmistus siitä, että prosessit toimivat lämpötilojen osalta ja tuottavat laatua jo nyt. Tulevaisuudessa säästöt syntyvät ohuempien kappaleiden lämpökäsittelyiden nopeutumisesta, joten vastaus tutkimuskysymykseen on, että optimointi tuottaa säästöjä pitkällä aikavälillä. Tulevaisuudessa tuotannon ohjaus voi laittaa tuotteen työohjeeseen lämpökäsittelyihin pienemmän ajan, jos kappaleen seinämävahvuus on alle 15 mm.

Saadut tulokset ovat melko hyvin linjassa aiemman tiedon kanssa. Testeissä käytettiin primäärialumiinia, mutta olisi mukavaa saada tietää miten romun käyttäminen vaikuttaisi tuloksiin.

Tutkimuksen luotettavuus on melko hyvällä tasolla, sillä käytännön testit suunniteltiin hyvin ja jokaista tutkittavaa lämpötilaa kohden oli useita vetokoesauvoja. Kovuuskokeiden luotettavuutta paransi huomattavasti myös se, että jokaiselle vetokoesauvalle tehtiin useampi kovuusmittaus. Valutapahtumista johtuvien poikkeamien eliminoimiseksi kuhunkin sarjaan valittiin vetokoesauva eri muotista. Työn tulosten luotettavuuteen vaikutti parantavasti myös merkittävästi se seikka, että vetokokeet, kovuuskokeet, sekä mikroskopiaturkimukset teetettiin asiaan perehtyneessä yrityksessä.

Opinnäytetyöprosessi oli erittäin antoisa ja opettavainen. Prosessi opetti tiedon hakua, kriittistä lähdemateriaalin käsittelyä, suunnitelmallisuutta, sekä yhteistyötaitoja. Itse koin saaneeni prosessin aikana runsaasti tukea, neuvoja, sekä lähdemateriaaliksi kelpaavaa tietoa vaikkapa haastattelujen muodossa. Tulini myös oppineeksi raportin tekemiseen liittyviä asioita kuten: lähdemerkintöjen, rakenteen, kuvien, taulukoiden, sekä kaavojen käyttöä.

Työn lopuksi haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajaa Tapio Väisästä, sekä viestinnän opettajaa Lea Mustosta saamastani ohjauksesta ja tuesta. Haluan kiittää myös Alteams Oy:n henkilökuntaa ja erityisesti valimotoimintojen johtaja Eero Pellikkaa, tehdaspäällikkö Sami Oksasta, sekä valmistuspäällikkö Jyrki Lehtistä. Haluan kiittää myös Metlab:in kehityspäällikkö Minna Kotilaista avustaan testien ja mikroskopiakuvien toteuttamisesta.

Juuri ennen tämän opinnäytetyön julkaisua valmitoimenjohtaja Eero Pellikka valitettavasti menehtyi työmatkalla. Tämä opinnäytetyö kunnioittaa Eeron muistoa.

Lähteet

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J. & Salonen, P. (2014). *Koneenosien suunnittelu*. Sanoma Pro Oy.

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J. & Salonen, P. (2014). *Kimmomoduuli*. [Kaava]. *Koneenosien suunnittelu*. Sanoma Pro Oy.

EN 12258-1:2012. (2012). *Aluminium and aluminium alloys. Terms and definitions. Part 1: General terms*. SFS Online.

Haurasmurtuma (28.02.2016). Wikipedia-artikkeli.

<https://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Haurasmurtuma&oldid=15558697>

Huhtaniemi, K., Jerima, M., Pohjus, J., Puska, M., Vierimaa, T., Vartiainen, M. & Karppinen, A. (2002). *Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit*. Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Huhtaniemi, K., Jerima, M., Pohjus, J., Puska, M., Vierimaa, T., Vartiainen, M. & Karppinen, A. (2002). *Alumiinivaluseosten fysikaaliset ominaisuudet*. [taulukko]. *Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit*. Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Huhtaniemi, K., Jerima, M., Pohjus, J., Puska, M., Vierimaa, T., Vartiainen, M. & Karppinen, A. (2002). *Karkaisutiedot*. [taulukko]. *Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit*. Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Kivivuori, S. & Härkönen, S., (2004). *Lämpökäsittelyoppi*. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy.

Kivivuori, S. (2016). *Lämpökäsittelyoppi 2*. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy.

Kotilainen, H. & Rantanen, M., (1981). *Tekninen tiedotus 22/81. Materiaalinvalinta-Yleisohjeet*. Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

Kotilainen, H. & Rantanen, M., (1981). *Murtolujuus. [Kaava]. Tekninen tiedotus 22/81. Materiaalinvalinta- Yleisohjeet.* Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

Kotilainen, H. & Rantanen, M., (1981). *Murtovenymä. [Kaava]. Tekninen tiedotus 22/81. Materiaalinvalinta- Yleisohjeet.* Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

Lepola, P. & Makkonen, M., (2000). *Materiaalit ja niiden käyttö.* Porvoo: WSOY.

Lepola, P. & Makkonen, M., (2000). *Vetokoesauvan käyttäytyminen vetokokeen aikana. [kuva]. Materiaalit ja niiden käyttö.* Porvoo: WSOY.

Lepola, P. & Makkonen, M., (2000). *0,2-venymärajan määrittäminen vetokokeella seokselle, jolla ei ilmene selvää myötörajaa. [kuva].* Materiaalit ja niiden käyttö. Porvoo: WSOY.

SFS-EN 1706:2020. (2020). *Alumiini ja alumiiniseokset. Valut. Kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet.* SFS Online.

SFS-EN 1706:2020. (2020). *Valukappaleiden kemiallinen koostumus. [Taulukko]. Alumiini ja alumiiniseokset. Valut. Kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet.* SFS Online.

SFS-EN 1706:2020. (2020). *Hiekkavaluseosten erillään valettujen koesauvojen mekaaniset ominaisuudet. [taulukko]. Alumiini ja alumiiniseokset. Valut. Kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet.* SFS Online.

SFS-EN 515:2017. (2017). *Alumiini ja alumiiniseokset. Muokatut tuotteet. Tilojen tunnukset.* SFS Online.

SFS-EN ISO 6892-1:2019. (2019). *Metallien vetokoe. Osa1: Vetokoe huoneenlämpötilassa.* SFS Online.

SFS-EN ISO 6892-1. (2019). *Jännitysvenymäkäyrä. [kuva]. Metallien vetokoe. Osa1. Vetokoe huoneenlämpötilassa.* SFS Online.

SFS-EN ISO 6892-1. (2019). *Myötörajojen määrittäminen. [kuva]. Metallien vetokoe. Osa1. Vetokoe huoneenlämpötilassa.* SFS Online.

SFS-EN ISO 6892-1. (2019). *Suhdesauva. [kaava]. Metallien vetokoe. Osa1: Vetokoe huoneenlämpötilassa.* SFS Online.

SFS-EN ISO 6892-1. (2019). *Murtokurouma. [kaava]. Metallien vetokoe. Osa1: Vetokoe huoneenlämpötilassa.* SFS Online.

SFS-EN ISO 6892-1. (2019). *Kimmokerroin. [kaava]. Metallien vetokoe. Osa1: Vetokoe huoneenlämpötilassa.* SFS Online.

SFS-EN ISO 6892-1. (2019). *Tasavenymä. [kaava]. Metallien vetokoe. Osa1: Vetokoe huoneenlämpötilassa.* SFS Online.

SFS-EN ISO 6506-1. (2014). *Metallien Brinellin kovuuskoe. Osa1: Menetelmä.* SFS-Online.

SFS-EN ISO 6506-1. (2014). *Brinellin kovuuskokeen suoritusperiaate. [kuva]. Metallien Brinellin kovuuskoe. Osa1: Menetelmä.* SFS Online.

SFS-EN ISO 6506-1. (2014). *Tunnukset ja lyhenteet. [taulukko]. Metallien Brinellin kovuuskoe. Osa1: Menetelmä.* SFS-Online.

Solidus (faasimuutokset) (08.12.2013). Wikipedia-artikkeli.

[https://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Solidus_\(faasimuutokset\)&oldid=13714765](https://fi.wikipedia.org/w/index.php?title=Solidus_(faasimuutokset)&oldid=13714765)

Tensile testing (21.05.2022). Wikipedia-artikkeli.

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Tensile_testing&oldid=1088957605

Liite 1: Testi 1: Testausseleoste


TESTAUSSELOSTE - TEST REPORT
SFS-EN 10204-3.2
No. 220506
 Sivu - Page 1(2)

Tilaja - Purchaser:
 Alteams Finland Oy
 Valutie 2
 12700 Loppi

Tilajan tilaus n:o - Purchaser's order n:o
 02.02.2022 / Jyrki Lehtinen
 Order no. 1145874

Taustatiedot - Background information :

Tuote - Product : Materiaali - Material : Näytteiden merkinnät - Sample markings : Testit - Tests :	Liuotushehkutettu koesauva 16 kpl EN AC-AISI7Mg T6 : EN 1706 1.1 - 1.4; 2.1 - 2.4; 3.1 - 3.4; 4.1 - 4.4 - 16 kpl vetokokeita - 16 kpl Brinell kovuuskokeita
--	---

Koestusstandardi - Testing standard: Purchaser's instructions

Sivu - Page 2(2)

Vetokokeet - Tensile tests # (SFS-EN ISO 6892-1:2019 A):
Testilaitte - Test device : Galdabini Quasar 200, no. VCVD 01

Koe n:o Test n:o	Paksuus/Halkaisija Thickness/Diameter	Venyysraja Proof strength Rp0.2	Murtolujuus Tensile strength Rm	Murtovenymä Elongation A
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]
Sauva 1.1	14.85	217	269	2.5
Sauva 1.2	14.66	216	254	2.0
Sauva 1.3	14.80	220	258	2.0
Sauva 1.4	14.93	210	247	1.5
Sauva 2.1	14.92	196	239	2.5
Sauva 2.2	14.93	198	234	1.5
Sauva 2.3	14.90	191	232	2.0
Sauva 2.4	14.80	198	234	1.5
Sauva 3.1	15.05	211	246	1.5
Sauva 3.2	14.88	205	242	1.5
Sauva 3.3	14.97	208	239	1.5
Sauva 3.4	14.95	214	249	1.5
Sauva 4.1	14.75	213	241	1.0
Sauva 4.2	14.77	211	241	1.0
Sauva 4.3	14.93	205	236	1.0
Sauva 4.4	14.79	209	237	1.0
Vaatimukset - Requirements: SFS-EN 1706 : EN AC-AISI7Mg T6				
Min		180	220	1

Kovuuskokeet, Brinell - Hardness tests, Brinell (SFS-EN ISO 6506-1:2014):
Testilaitte - Test device : Struers Duramin 500 no. E5830034

Koe n:o Test n:o	Brinell [HBW 2.5/2.5]
Sauva 1.1	85 / 99 / 102 Avg. 95
Sauva 1.2	97 / 98 / 100 Avg. 98
Sauva 1.3	93 / 90 / 96 Avg. 93
Sauva 1.4	105 / 103 / 100 Avg. 103
Sauva 2.1	91 / 102 / 100 Avg. 98
Sauva 2.2	87 / 105 / 95 Avg. 95
Sauva 2.3	92 / 91 / 95 Avg. 93
Sauva 2.4	87 / 102 / 92 Avg. 94
Sauva 3.1	94 / 100 / 97 Avg. 97
Sauva 3.2	97 / 97 / 91 Avg. 95
Sauva 3.3	97 / 92 / 97 Avg. 96
Sauva 3.4	86 / 92 / 98 Avg. 92
Sauva 4.1	92 / 95 / 97 Avg. 95
Sauva 4.2	99 / 103 / 95 Avg. 99
Sauva 4.3	103 / 98 / 102 Avg. 101
Sauva 4.4	103 / 102 / 99 Avg. 101
Vaatimukset - Requirements: SFS-EN 1706 : EN AC-AISI7Mg T6	
Min	75

Huomautuksia - Remarks

- Erikseen muotoon valetut koesauvat
- Vaatimukset AISI7Mg / EN AC-42000 : SFS-EN 1706, tilan tunnus T6
- Sauvojen 1.1 - 1.4 liuotushehkutuslämpötila 550 °C
- Sauvojen 2.1 - 2.4 liuotushehkutuslämpötila 540/(530) °C 5h 47 min
- Sauvojen 3.1 - 3.4 liuotushehkutuslämpötila 530 °C
- Sauvojen 4.1 - 4.4 liuotushehkutuslämpötila 520 °C

Tulopvm - Date of arrival
 10.02.2022

Seloste pvm - Report date
 17.02.2022

Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Accredited method. Statement is not accredited. -
 Selosteen osittainen kopioiminen on kielletty ilman Metlab Oy:n lupaa. The report shall not be partially reproduced without
 permission of Metlab Oy.

Asiakkaan toimittamia tietoja, joiden oikeellisuudesta Metlab Oy ei ole vastuussa -
 Information provided by the customer, Metlab Oy is not responsible for the validity of this information.
 Metlab Oy ei ole vastuussa näytteenotosta. Tulokset pätevät vain asiakkaalta vastaanotetuille ja testatuille näytteille. -
 Metlab Oy is not responsible for the sampling stage. The test results relate only to as received and tested samples.
 Tulosten vaatimustenmukaisuus raportoidaan huomiotta tulosten mittausepävarmuutta.

The measurement uncertainty of the results is not taken into consideration in statements of conformity.

Mittausepävarmuus - Measurement uncertainty: 95% luotettavuustaso - 95% confidence level, k=2
 Kemiallinen analyysi - Mittausepävarmuustaulukko ja luettelo akkreditoinnin kattamista alkuelementeistä toimitetaan pyydettyäessä -
 Chemical analysis : Measurement uncertainty table and list of elements covered by accreditation are delivered upon request.
 Huoneenlämpötilan vetokoe - Room temperature tensile test : ReL, ReH±4.2%, Rp0.2±4.6%, Rm±1.6%, A±2.4%, Z±2.6%
 Korotetun lämpötilan vetokoe - Elevated temperature tensile test : ReL, ReH±6.3%, Rp0.2±6.9%, Rm±3.7%, A±3.9%, Z±2.6%
 Iskukoe, energiataso - Impact test, energy level: <=100 J ±5.0 J, >100 J ±15.0 J
 Kovuuskokeet - Hardness tests: Vickers HV0.3 ±9.0%, HV1 ±7.0%, HV5-HV10 ±3.9%, HV30 ±3.6%
 Brinell - HBW 2.5/187.5 ±3.9%, HBW 5/750 ±3.3%, HBW 10/3000 ±2.4%
 Rockwell : HRC±2.4 HRC, HRBW 10 - 45 HRBW ±4.9 HRBW, >45 - 80 HRBW ±3.6 HRBW, >80 - 100 HRBW ±2.9 HRBW

METLAB OY

 Laura Laukkanen
 Laboratoriosinööri - Laboratory engineer

 Metlab Oy
 Nuutisarankatu 17
 33900 TAMPERE
 FINLAND

 Puhelin - Phone
 03-3124 5800
 metlab@metlab.fi
 www.metlab.fi


Liite 2: Testi 2: Testausseoste


TESTAUSSEOSTE - TEST REPORT
SFS-EN 10204-3.2
No. 223492
 Sivu - Page 1(2)

Tilaja - Purchaser:

 Alteams Finland Oy
 Valutie 2
 12700 Loppi

Tilajan tilaus n:o - Purchaser's order n:o

06.09.2022 / Jyrki Lehtinen

Taustatiedot - Background information :

Tuote - Product :	Koesauva 6 kpl
Materiaali - Material :	EN AC-AISI7Mg : EN 1706
Näytteiden merkinnät - Sample markings :	1.1 - 1.3; 3.1 - 3.3
Testit - Tests :	- 6 kpl vetokokeita - 6 kpl Brinell kovuuskokeita

Koestusstandardi - Testing standard: Purchaser's instructions

Vetokokeet - Tensile tests # (SFS-EN ISO 6892-1:2019 A):
Testilaitte - Test device : Galdabini Quasar 200, no. VCVD 01

Koe n:o Test n:o	Paksuus/Halkaisija Thickness/Diameter	Venymisraja Proof strength Rp0.2	Murtolujuus Tensile strength Rm	Murtovenymä Elongation A
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]
Sauva 1.1	15.39	182	230	2.5
Sauva 1.2	15.49	188	233	2.0
Sauva 1.3	15.27	187	233	2.5
Sauva 3.1	15.12	224	261	1.5
Sauva 3.2	15.15	227	261	1.5
Sauva 3.3	15.05	229	261	2.0
Vaatimukset - Requirements: SFS-EN 1706 : EN AC-AISI7Mg T6				
Min		180	220	1

Kovuuskokeet, Brinell - Hardness tests, Brinell (SFS-EN ISO 6506-1:2014):
Testilaitte - Test device : Struers Duramin 500 no. E5830034

Koe n:o Test n:o	Brinell [HBW 2.5/62.5]
Sauva 1.1	94 / 97 / 91 / 87 Avg: 92
Sauva 1.2	91 / 90 / 91 / 91 Avg: 91
Sauva 1.3	89 / 87 / 96 / 91 Avg: 91
Sauva 3.1	101 / 102 / 98 / 104 Avg: 101
Sauva 3.2	104 / 98 / 105 / 102 Avg: 102
Sauva 3.3	105 / 103 / 99 / 103 Avg: 102
Vaatimukset - Requirements: SFS-EN 1706 : EN AC-AISI7Mg T6	
Min	75

Huomautuksia - Remarks

 - Erikseen muotoon valetut koesauvat
 - Vaatimukset AISI7Mg / EN AC-42000 : SFS-EN 1706, tilan tunnus T6

Sivu - Page 2(2)

 Tulopvm - Date of arrival
 07.09.2022

 Seloste pvm - Report date
 15.09.2022

Selosteen osittainen kopioiminen on kielletty ilman Metlab Oy:n lupaa. –
 The report shall not be partially reproduced without permission of Metlab Oy.
 # Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. – Accredited method. Statement is not accredited.
 □ Asiakkaan toimittamia tietoja, joiden oikeellisuudesta Metlab Oy ei ole vastuussa. –
 Information provided by the customer, Metlab Oy is not responsible for the validity of this information.
 Metlab Oy ei ole vastuussa näytteenotosta. Tulokset pätevät vain asiakkaalta vastaanotetuille ja testatuille näytteille. –
 Metlab Oy is not responsible for the sampling stage. The test results relate only to as received and tested samples.
 Tulosten vaatimustenmukaisuus raportoidaan huomioimatta tulosten mittausepävarmuutta. –
 The measurement uncertainty of the results is not taken into consideration in statements of conformity.
 Mittausepävarmuus - Measurement uncertainty: 95% luotettavuustaso - 95% confidence level, k=2
 Kemiallinen analyysi : Mittausepävarmuustaulukko ja luettelo akkreditoinnin kattamista alkuaineista toimitetaan pyydettyäessä. –
 Chemical analysis : Measurement uncertainty table and list of elements covered by accreditation are delivered upon request.
 Huoneenlämpötilan vetokoe - Room temperature tensile test : ReL, ReH:±4.2%, Rp0.2:±4.6%, Rm:±1.6%, A:±2.4%, Z:±2.6%
 Korotetun lämpötilan vetokoe - Elevated temperature tensile test : ReL, ReH:±6.3%, Rp0.2:±6.9%, Rm:±3.7%, A:±3.9%, Z:±2.6%
 Iskukoe, energiataso - Impact test, energy level: <=100 J ±5.0 J, >100 J ±15.0 J
 Kovuuskokeet - Hardness tests: Vickers HV0.3 ±9.0%, HV1 ±7.0%, HV5-HV10 ±3.9%, HV30 ±3.6%
 Brinell : HBW 2.5/187.5 ±3.9%, HBW 5/750 ±3.3%, HBW 10/3000 ±2.4%
 Rockwell : HRC±2.4 HRC, HRBW 10 - 45 HRBW ±4.9 HRBW, >45 - 80 HRBW ±3.6 HRBW, >80 - 100 HRBW ±2.9 HRBW

METLAB OY

 Laura Laukkanen
 Laboratorioinsinööri - Laboratory engineer

 Metlab Oy
 Nuutisarankatu 17
 33900 TAMPERE
 FINLAND

 Puhelin - Phone
 03-3124 5800
metlab@metlab.fi www.metlab.fi


Liite 3: Testi 3: Testausseoste



TESTAUSSELOSTE - TEST REPORT
SFS-EN 10204-3.2

No. 223949
Sivu - Page 1(2)

Tilaja - Purchaser:
Alteams Finland Oy
Valutie 2
12700 Loppi

Tilajan tilaus n:o - Purchaser's order n:o
06.10.2022 / Jyrki Lehtinen

Taustatiedot - Background information:

Tuote - Product:	Koesauva 9 kpl
Materiaali - Material:	EN AC-AISI7Mg : EN 1706
Näytteiden merkinnät - Sample markings:	1.1 - 1.3; 2.1 - 2.3; 3.1 - 3.3
Testit - Tests:	- 9 kpl vetokokeita - 9 kpl Brinell kovuuskokeita

Koestusstandardi - Testing standard: Purchaser's instructions

Vetokokeet - Tensile tests # (SFS-EN ISO 6892-1:2019 A):
Testilaitte - Test device : Galdabini Quasar 200, no. VCVD 01

Koe n:o Test n:o	Paksuus/Halkaisija Thickness/Diameter	Venyimisraja Proof strength Rp0.2	Murtolujuus Tensile strength Rm	Murtovenymä Elongation A
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]
Sauva 1.1	15.15	160*	224	4.0
Sauva 1.2	15.33	156*	225	4.0
Sauva 1.3	15.13	162*	233	4.5
Sauva 2.1	15.01	201	253	3.0
Sauva 2.2	15.08	197	249	3.5
Sauva 2.3	14.96	193	253	3.5
Sauva 3.1	15.10	189	250	3.5
Sauva 3.2	15.08	190	236	2.5
Sauva 3.3	14.94	197	255	3.5

Vaatimukset - Requirements: SFS-EN 1706 : EN AC-AISI7Mg T6

Min	180	220	1
-----	-----	-----	---

* tulos alle rajan / value under limit

Kovuuskokeet, Brinell - Hardness tests, Brinell (SFS-EN ISO 6506-1:2014):
Testilaitte - Test device : Struers Duramin 500 no. E5830034

Koe n:o Test n:o	Brinell [HBW 2.5/62.5]
Sauva 1.1	77 / 87 / 76 / 88 Avg. 81
Sauva 1.2	85 / 83 / 84 / 82 Avg. 84
Sauva 1.3	85 / 88 / 84 / 86 Avg. 86
Sauva 2.1	90 / 94 / 89 / 97 Avg. 93
Sauva 2.2	92 / 88 / 88 / 90 Avg. 90
Sauva 2.3	93 / 93 / 92 / 87 Avg. 91
Sauva 3.1	91 / 88 / 94 / 94 Avg. 92
Sauva 3.2	89 / 84 / 87 / 93 Avg. 88
Sauva 3.3	91 / 90 / 84 / 86 Avg. 88

Vaatimukset - Requirements: SFS-EN 1706 : EN AC-AISI7Mg T6

Min 75

Huomautuksia - Remarks

- Erikseen muotoon valetut koesauvat
- Vaatimukset AISI7Mg / EN AC-42000 : SFS-EN 1706, tilan tunnus T6

No. 223949

Sivu - Page 2(2)

Tulopvm - Date of arrival
07.10.2022

Seloste pvm - Report date
17.10.2022

Selosteen osittainen kopioiminen on kielletty ilman Metlab Oy:n lupaa. -
The report shall not be partially reproduced without permission of Metlab Oy.
Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. - Accredited method. Statement is not accredited.
Asiakkaan toimittamia tietoja, joiden oikeellisuudesta Metlab Oy ei ole vastuussa. -
Information provided by the customer, Metlab Oy is not responsible for the validity of this information.
Metlab Oy ei ole vastuussa näytteenotosta. Tulokset pätevät vain asiakkaalta vastaanotetuille ja testatuille näytteille. -
Metlab Oy is not responsible for the sampling stage. The test results relate only to as received and tested samples.
Tulosten vaatimustenmukaisuus raportoidaan huomioiden mittausepävarmuutta. -
The measurement uncertainty of the results is not taken into consideration in statements of conformity.
Mittausepävarmuus - Measurement uncertainty: 95% luotettavuustaso - 95% confidence level, k=2
Kemiallinen analyysi : Mittausepävarmuustaulukko ja luettelo akkreditoinnin kattamista alkuaineista toimitetaan pyydettyäessä. -
Chemical analysis : Measurement uncertainty table and list of elements covered by accreditation are delivered upon request.
Huoneenlämpötilan vetokoe - Room temperature tensile test : ReL, ReH:±4.2%, Rp0,2:±4.6%, Rm:±1.6%, A:±2.4%, Z:±2.6%
Korotetun lämpötilan vetokoe - Elevated temperature tensile test : ReL, ReH:±6.3%, Rp0,2:±6.9%, Rm:±3.7%, A:±3.9%, Z:±2.6%
Iskukoe, energiataso - Impact test, energy level: <=100 J ±5.0 J, >100 J ±15.0 J
Kovuuskokeet - Hardness tests: Vickers HV0.3 ±9.0%, HV1 ±7.0%, HV5-HV10 ±3.9%, HV30 ±3.6%
Brinell : HBW 2.5/187.5 ±3.9%, HBW 5/750 ±3.3%, HBW 10/3000 ±2.4%
Rockwell : HRC±2.4 HRC, HRBW 10 - 45 HRBW ±4.9 HRBW, >45 - 80 HRBW ±3.6 HRBW, >80 - 100 HRBW ±2.9 HRBW

METLAB OY

Laura Laukkanen

Laura Laukkanen
Laboratorionsinööri - Laboratory engineer

Metlab Oy
Nuutisarankatu 17
33900 TAMPERE
FINLAND

Puhelin - Phone
03-3124 5800
metlab@metlab.fi

www.metlab.fi



FINAS
Finnish Accreditation Service
T027 (EN ISO/IEC 17025)

Liite 4: Mikroskopiattutkimusten testausseleste



TESTAUSSELOSTE - TEST REPORT

No. 223969

Sivu - Page 1(1)

Tilaaaja - Purchaser:

Alteams Finland Oy
Valutie 2
12700 Loppi

Tilaaajan tilaus n:o - Purchaser's order n:o

06.10.2022 / Sami Oksanen

Taustatiedot - Background information

Tuote - Product :	Koesauva 3 kpl
Materiaali - Material :	AISi7Mg EN AC-42100
Näytteiden merkinnät - Sample markings :	118649 1.0 (valutilainen), 118649 2.0 (liuotushehkutettu), 118649 3.0 (erkautushehkutettu)
Testit - Tests :	- 3 kpl mikrorakennetutkimus

Koestusstandardi - Testing standard: Purchaser's instructions

Mikrorakennetutkimus - Micro examination:

Koe n:o Test n:o	Tarkastelukohta Examination location	Liitteet Enclosures
1	1 valutilainen	1
2	2 liuotushehkutettu	1
3	3 erkautushehkutettu	1

Huomautuksia - Remarks

Tulopvm - Date of arrival

10.10.2022

Seloste pvm - Report date

19.10.2022

Selosteen osittainen kopioiminen on kielletty ilman Metlab Oy:n lupaa. -
The report shall not be partially reproduced without permission of Metlab Oy.
Akkreditoitu menetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. - Accredited method. Statement is not accredited.
o Asiakkaan toimittamia tietoja, joiden oikeellisuudesta Metlab Oy ei ole vastuussa. -
Information provided by the customer, Metlab Oy is not responsible for the validity of this information.
Metlab Oy ei ole vastuussa näyteenotosta. Tulokset pätevät vain asiakkaalta vastaanotetuille ja testatuille näytteille. -
Metlab Oy is not responsible for the sampling stage. The test results relate only to as received and tested samples.
Tulosten vaatimustenmukaisuus raportoidaan huomioimatta tulosten mittausepävarmuutta. -
The measurement uncertainty of the results is not taken into consideration in statements of conformity.
Mittausepävarmuus - Measurement uncertainty: 95% luotettavuustaso - 95% confidence level, k=2
Kemiallinen analyysi : Mittausepävarmuustaulukko ja luettelo akkreditoinnin kattamista alkuaineista toimitetaan pyydettyäessä. -
Chemical analysis : Measurement uncertainty table and list of elements covered by accreditation are delivered upon request.
Huoneenlämpötilan vetokoe - Room temperature tensile test : ReL, ReH:±4.2%, Rp0.2:±4.6%, Rm:±1.6%, A:±2.4%, Z:±2.6%
Korotetun lämpötilan vetokoe - Elevated temperature tensile test : ReL, ReH:±6.3%, Rp0.2:±6.9%, Rm:±3.7%, A:±3.9%, Z:±2.6%
Iskukoe, energiataso - Impact test, energy level: <=100 J ±5.0 J, >100 J ±15.0 J
Kovuuskokeet - Hardness tests: Vickers HV0.3 ±9.0%, HV1 ±7.0%, HV5-HV10 ±3.9%, HV30 ±3.6%
Brinell : HBW 2.5/187.5 ±3.9%, HBW 5/750 ±3.3%, HBW 10/3000 ±2.4%
Rockwell : HRC±2.4 HRC, HRBW 10 - 45 HRBW ±4.9 HRBW, >45 - 80 HRBW ±3.6 HRBW, >80 - 100 HRBW ±2.9 HRBW

METLAB OY

Jouni Ahlstedt
Tutkimusinsinööri - Research engineer

Metlab Oy

Nuutisarankatu 17
33900 TAMPERE
FINLAND

Puhelin - Phone

03-3124 5800

metlab@metlab.fi
www.metlab.fi
