

Artturi Ojala

CAD-TYÖKALUJEN VAIKUTUKSET VALUKAPPALEEN SUUNNITTELUSSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Mikko Vanhatalo
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Artturi Ojala: CAD-työkalujen vaikutukset valukappaleen suunnittelussa
Effects of CAD tools on casting design
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan kandidaatintutkinto
Toukokuu 2021

Kandidaatintyön aiheena on tutustua tietokoneavusteisen suunnittelun (CAD) käyttöön valukappaleen suunnittelussa. Tutkimuskysymyksenä on, että miten CADiä käytetään ja mitä hyötyä siitä on valuteollisuudessa. Pääpaino pidetään hiekkavalussa työn rajaamiseksi. Aluksi perehdytään valukappaleen muotin, mallin, keernojen, sulan jähmettymisen ja syöttöjärjestelmän suunnittelussa huomioitaviin asioihin. Tämän jälkeen tarkastellaan CADin käyttöä äskeisissä kohdissa. Lopuksi tarkastellaan mitä hyötyä CADin käytöstä valukappaleen suunnittelussa on, mitä uusia piirteitä tai ominaisuuksia se on tuonut valuteknologiaan, ja tehdään johtopäätökset. Asian tutkiminen on suoritettu kirjallisuustutkimuksena perehtymällä aiheeseen liittyviin kirjoihin, tieteellisiin artikkeleihin, standardeihin, diplomitoihin ja ValuAtlas-nimiseen valuteollisuus-aiheiseen tietopankkiin.

Valaminen on valmistusmenetelmä, jolla sulasta materiaalista voidaan muotin avulla valmistaa hyvin monimutkaisia muotoja sisältäviä kappaleita. CAD on nykyään olennainen osa monen teollisuudenalan tuotesuunnittelua ja sama pätee valuteollisuuteen. Tietokoneavusteisella suunnittelulla kyetään mallintamaan valukappaleiden muotoja, simuloimaan valutapahtumaa ja käyttötilannetta ja tuottamaan valupiirustukset. Tarkastelemalla ja simuloimalla mallia, tietokoneella voidaan nopeuttaa suunnitteluprosessia, vähentää valmistettävien prototyyppien määrää ja vähentää ihmisestä johtuvien virheiden määrää.

Nopeamman suunnitteluprosessin ansiosta kulut vähenevät ja asiakkaiden muuttuviin tarpeisiin kyetään reagoimaan nopeammin. Tietokoneella mallinnettu kappale ja merkinnät on myös selkeä muillekin kuin suunnittelijalle itselleen ja sitä on nopea muokata. Tämä selkeyttää ja nopeuttaa tiedon kulkua suunnittelun ja muiden tahojen välillä. CADin käyttökohteita ja todenmukaisuutta on tutkittu laajasti, ja sen avulla kyetään tehostamaan nykyistä valuteollisuutta ja tuomaan siihen muiden valmistusmenetelmien vahvuuksia.

Avainsanat: Valukappaleen suunnittelu, valumuotti, tietokoneavusteinen suunnittelu, CAD, valukappaleen simulointi.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VALUKAPPALEEN SUUNNITTELU.....	2
2.1 Muotin muoto ja jakopinta	3
2.2 Valukappaleen geometriset yksityiskohdat.....	5
2.2.1 Hellitykset	6
2.2.2 Pyöristykset	7
2.2.3 Syöttöjärjestelmä	8
2.2.4 Toleranssit	9
2.2.5 Suunnattu jähmettyminen	10
2.2.6 Vastahellitysten huomioiminen.....	11
3. CAD YLEISESTI VALUSUUNNITTELUSSA	13
3.1 CADin käyttö geometrinen yksityiskohtien suunnittelussa	13
3.2 Toleranssit ja jatkotyöstön tarpeen suunnittelu CADillä	14
3.3 Sulan liike, lämpötilat ja jähmettyminen.....	14
3.4 Valupiirustusten laatiminen	15
3.5 Mekaanisen käyttäytymisen simulointi.....	16
4. CAD-SUUNNITTELUUN HYÖDYT	17
4.1 3D-mallin hyödyt suunnittelussa.....	17
4.2 Simuloinnin hyödyt suunnittelussa	17
4.3 Valumuotin 3D-tulostus ja koneistaminen.....	18
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	20
LÄHTEET.....	21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CAD CAD, eli tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer-aided Design) on tietokoneen käyttöä suunnittelu- ja mallinnusapuvälineenä. Teollisuudessa etenkin insinöörit ja arkkitehdit käyttävät CADiä.

Hellitykset Hellitykset ovat määrätyille valumallin tai keernalaatikon pinnoille tehty kallistuskulma, joiden tarkoituksena on helpottaa mallin irrotusta muotista tai keernan irroitusta keernalaatikosta (SFS-EN 12890). Hellityksistä käytetään myös nimitystä päästöt.

Kaavaus Hiekkavalussa kaavaus on työvaihe, jossa muottihiekasta muotoillaan muottipuoliskot valumallien ja keernojen avulla. Kaavaus suoritetaan kaavauskehiin, joihin valumallin puolikas sijoitetaan ja ympäröidään hiekkalla. Kehien välistä pintaa kutsutaan jakopinnaksi. (Höök & Meskanen 2016, s. 31)

Kaavaushiekka

Hiekkamuoteissa käytetty muottimateriaali.

Kaavauskehä

Kaavauskehä on hiekkavalussa käytetty astia, joka täytetään muottihiekkalla, ja toimii hiekkamuotin runkona.

Keerna Keernat ovat muusta muotista erillisiä osia ja ne lisätään muottiin sen kokoamisvaiheessa. Niillä saadaan valukappaleeseen aikaan sellaisia muotoja, jotka eivät kaavaamalla olisi mahdollisia. (Keskinen, Niemi 2015a, Keernat, s. 2) Keernalla saadaan valukappaleeseen muun muassa sen sisämuodot.

Keernakanta

Valumalliin liittyvä uloke, jonka tarkoitus on muodostaa muottiin syvennys, tai keernan pidennys kohdissa, missä keernat tuetaan muottiin (SFS-EN 12890).

Keernalaatikko

Rakenne, jolla muodostetaan keerna tai keernakokoonpano (SFS-EN 12890). Keernalaatikko on käytännössä muotti, jolla keerna valmistetaan.

Muotti Valumuotti täytetään halutun materiaalin sulalla, joka täyttää muottiin mallilla tehdyn tilan. Sulan jähmettyessä saadaan mallin muotoja jäljittelevä kappale.

Pyöristykset Terävät kulmat pyöristetään ja muodosta tehdään yleisesti jouheva.

Syöttöjärjestelmä

Sulan täyttämä tila muotissa valun aikana. Tilaan kuuluu itse kappaleen muodon lisäksi myös muita muotoja, kuten jakokanavia, syöttökanavia, syöttökupuja ja ilmanpoistoaukkoja.

Syöttökupu Valumateriaalin varasto, joka kompensoi muotissa olevan materiaalin tilavuuskutistuman jähmettymisen aikana. Syöttökuvut sijaitsevat tavallisesti viimeksi jähmettyvän kohdan, eli paksuimman kohdan päällä, ks. kuva 4. (SFS-EN ISO 8062-1 2007)

Valuaihio Valamalla tuotettu kappale, jota ei ole jatkotyöstetty.

Vällys Valumallien ja keernalaatikoiden määrättyihin pintoihin tarkoituksellisesti tehty tyhjä tila helpottamaan muottien ja/tai keernojen asennusta (SFS-EN 12890 2000).

1. JOHDANTO

Nykyajan insinööri työ hyödyntää paljon erilaisia matemaattisia simulaatioita ja malleja, joiden avulla voidaan ennakoida prosessien kulkua tai valmiin tuotteen toimintaa. Koska insinööri työ on kallista ja lopullista tuotetta tarkasti jäljittelevien mallien rakentaminen vie aikaa, on loogista tutkia muita menetelmiä lopullisen tuotteen ominaisuuksien tarkasteluun. Tietokoneavusteisella suunnittelulla pystytään simuloimaan monia tuotteeseen liittyviä ominaisuuksia ja prosesseja ilman että käytetään aikaa ja resursseja esimerkiksi prototyypin rakentamiseen. Suunnittelun alkuvaiheilla käyttäen CADiä ja karkeita malleja saadaan nopeasti selville miten vaadittuihin tuoteominaisuuksiin päästään ja voidaan valmistaa prototyyppi paremmilla ennakkotiedoilla.

Tämän kandidaatintyön tarkoitus on selvittää tietokoneavusteisen suunnittelun ominaisuuksia ja hyötyjä valukappaleiden suunnittelussa. Tutkimuskysymyksenä on, että miten CADiä käytetään ja mitä hyötyä siitä on valuteollisuudessa. Työssä perehdytään ensin pintapuolisesti valukappaleen suunnittelun eri vaiheisiin ja sen jälkeen tarkastellaan CAD-suunnittelun osaa niissä. Työn perustana on käytetty erilaisia tutkimuksia, diplomitoita, kirjoja ja artikkeleita sekä ValuAtlas-nimistä tietopankkia, jotka käsittelevät tai hyödyntävät valamista ja CAD-suunnittelua. Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä tutustumalla kyseisiin lähteisiin. Työssä ei keskitytä eri valumenetelmien, valumateriaalien tai muottimateriaalien vertailuun CADiä hyödyntäen. Työ tarkastelee selkeyden takia aihetta pääosin hiekkavalun näkökulmasta.

2. VALUKAPPALEEN SUUNNITTELU

Valaminen on valmistusmenetelmä, jolla voidaan valmistaa erittäin monimutkaisia kappaleita. Sillä on pitkät perinteet aina muinaisista sivilisaatioista nykypäivän valimoteollisuuteen. Jotta voitaisiin käsitellä CAD-ohjelmien hyödyntämistä valukappaleen suunnittelussa, on ensin tutustuttava itse suunnitteluun.

Valukappale syntyy, kun muotti täytetään halutun materiaalin sulalla. Sulan jähmettyessä se saa muotin muodon. Muotin muoto saadaan aikaan mallilla ja mahdollisesti keernoilla, jos niitä käytetään. Valumuotteja on erilaisia, ja ne voivat olla kertakäyttöisiä (kertamuotit), kuten hiekkamuotit (hiekkavalu), kipsimuotit (kipsivalu) tai keraamiset muotit (esim. tarkkuusvalu) tai uudelleen käytettäviä (kestomuotit). Kertamuottimenetelmissä muotti rikotaan valukappaleen ympäriltä sen jähmettyttyä. Hiekkavaluissa käytetty hiekka muodostaa mallin avulla muotin puoliskojen kaavauskehiin tilat, jotka yhdistämällä saadaan aikaan mallin muoto. Muotin hiekka kovetetaan ennen valua. Muottimateriaalin valinta on tärkeä osa valun suunnittelua, ja siihen vaikuttavat monet asiat, kuten valumateriaali, valumenetelmä ja valmistettavan kappaleen koko. Myös vaadittu laatu vaikuttaa muottimateriaalin valintaan (Honkavaara 2014, s. 12; Keskinen & Niemi 2011, Hiekoista aiheutuvat virheet, s. 2). Muottimateriaalin pitää luonnollisesti olla tulenkestävää.

Lisää muotoja, erityisesti kappaleen sisäpintaan, saadaan esimerkiksi keernalla. Yleensä keernan on oltava tulenkestävämpää kuin tavallinen kaavaushiekka, koska se joutuu usein enemmän sulan ympäröimäksi (Niemi 2010b, Muotti- ja keernatekniikka, s. 1). Keerna valmistetaan keernalaatikossa ja asennetaan muottiin tukien se keernakannoilla paikalleen.

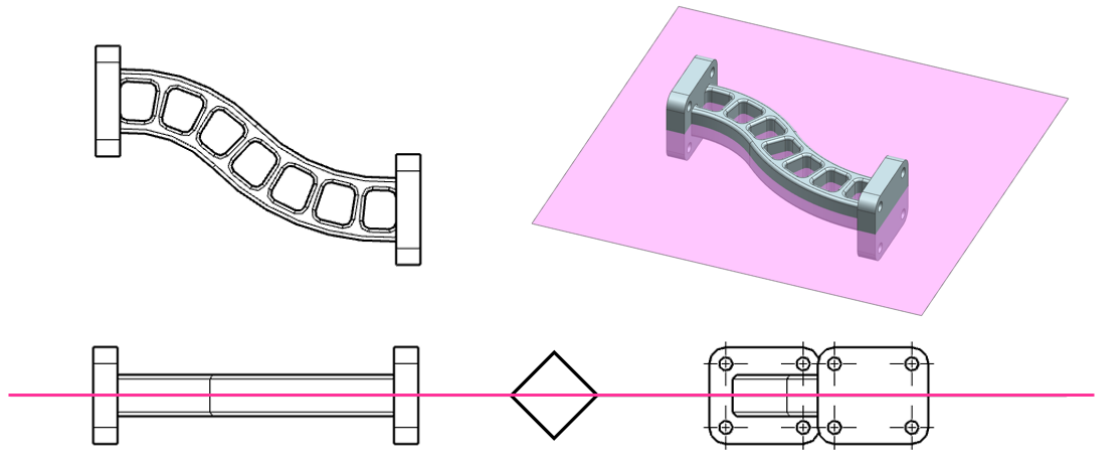
Valutuotteiden suunnittelun erityispiirteet liittyvät lopputuotteelta vaadittuihin ominaisuuksiin, tuotteen toimintaympäristöön, valittuun valumateriaaliin ja valumenetelmään. Lisäksi siihen vaikuttavat myös kappaleen valmistavan valimon toimintatavat. Valukappaleen suunnittelu on monen asian vuorovaikutuksen alainen. Parhaaseen lopputulokseen päästään, kun ollaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa yhteydessä valimoon ja suunnitellaan tuote yhteistyössä valmistajan kanssa. (Honkavaara 2014, s. 34)

2.1 Muotin muoto ja jakopinta

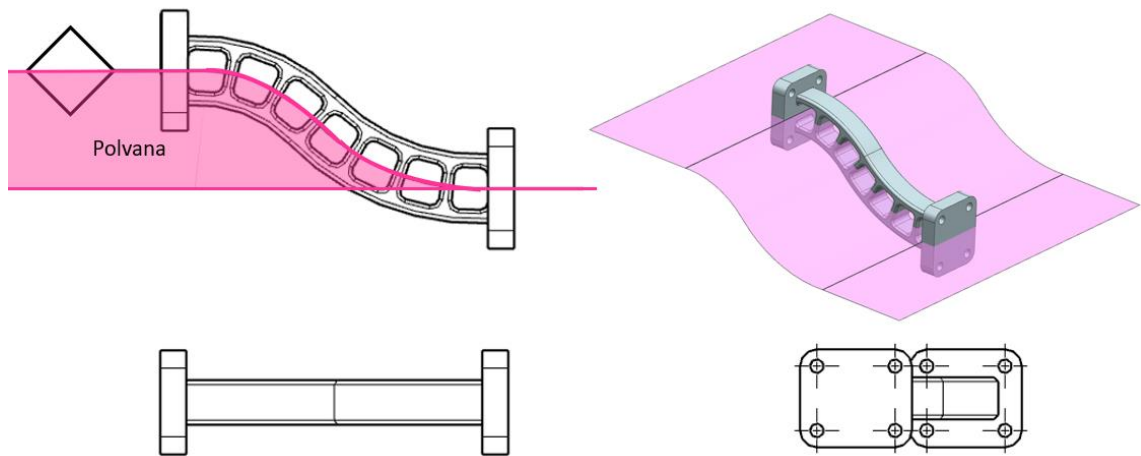
Muotin muodon hahmottelu ja jakopinnan valitseminen ovat suunnitteluprosessin alussa tärkeitä vaiheita. Jokaisella valutuotteella on jakopinta, ja se määrittää muotin asennon valun aikana. Oikeanlaisen valuasennon valitseminen vähentää suunniteltavien muotojen määrää, helpottaa muotin ja keernojen käyttöä, sekä vähentää keernojen ja mallin irtopalojen määrää. ValuAtlaksen Valusuunnitteluoppaassa (Honkavaara 2014, s. 36) on esitetty, että muodon hahmottelussa olisi kiinnitettävä huomiota ainakin seuraaviin asioihin:

- päämitat
- koneistettavat pinnat
- jakopinta = valuasento
- hellitykset ja vastahellitykselliset muodot = keernojen tarve
- koordinaatiston paikoitus
- aputasojen paikat
- piirteiden mallinnusjärjestys
- piirteiden nimeäminen.

Jokaisessa valutuotteessa on jakopinta (jakotaso), joka on valussa käytetyn kahden muotinosan välinen kosketuspinta. Jakopinta on valutuotteiden suunnittelun perusta. Jakopinta voi olla joko suora tai epäsuora, kuten kuvissa 1 ja 2 on esitetty. Kustannusten ja valmistettavuuden kannalta suora jakopinta olisi ihanteellinen. Aina suoran jakopinnan käyttö ei kuitenkaan ole mahdollista, jolloin on käytettävä epäsuoraa jakopintaa eli murtojakopintaa. Murtojakopinta muodostaa muotteihin polvanamuodon, joka lisää valmistuskustannuksia. Jakopinnan sijoittelussa on huomioitava, että lopputuotteen pinnassa on näkyvä muoto jakopinnan eli muotin puoliskojen kosketuksen kohdalla. (Honkavaara 2014, s. 38)

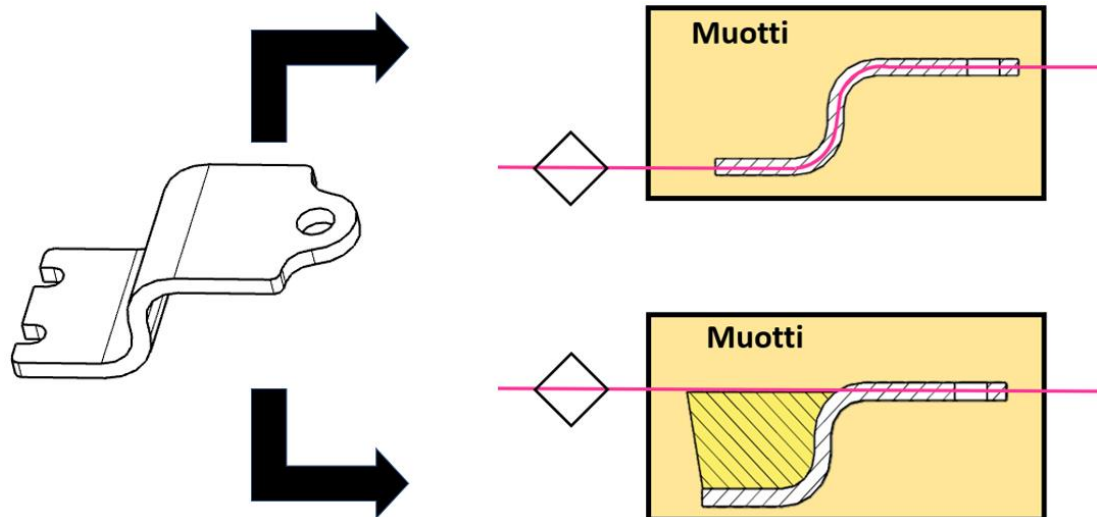


Kuva 1. Suora jakopinta (Honkavaara 2014, s. 38).



Kuva 2. Murtojakopinta (Honkavaara 2014, s. 38).

Kuvassa 3 on kuvattu kuinka keernan avulla voidaan siirtyä murtojakopinnasta suoraan jakopintaan. Kustannukset alenevat jakopinnan osalta ja muotin puoliskojen käsittely helpottuu, mutta keernan käyttö toisaalta nostaa kustannuksia. Lisäksi valintaan vaikuttaa valukappaleen valmistava valimo, koska edullisin muoto riippuu paljolti valimon varusteista. (Asanti 1962, s. 78)



Kuva 3. Valukappaleen muodon kaavaus murtojakopinnalla ja suoralla jakopinnalla käyttäen keernaa. (Asanti 1962, s. 79)

Kirjallisuudessa (Niemi 2010c, Valuasento, s. 1) on esitetty näkökohtia, jotka on otettava huomioon valuasentoa määriteltäessä ja samalla jakopintaa päätettäessä:

- koneistettavat pinnat alaspäin
- laajat pinnat mieluummin pystyasentoon
- syötettävät kohdat niin, että niihin voidaan syöttää sulaa helposti poistettavilla syöttökuvuilla
- toleroidut mitat yhteen muotinosaan.

Valuasentoa valittaessa on varmistettava mahdollisimman helppo keernojen asennus muottiin ja kaasujen poisto keernoista sekä muottionteloista. Useimmiten on mahdollista valita valuasento usealla eri tavalla. Eri asennoista kannattaa valita se, jossa tarvitaan mahdollisimman vähän keernoja ja muotin irtopaloja, mitkä lisäävät kaavauksen kustannuksia. Valuasennon valinnalla voidaan myös hyödyntää kappaleessa luonnostaan esiintyviä hellityksiä, jolloin niitä ei tarvitse lisätä ja mitoittaa. Lisäksi mallin asento vaikuttaa muotin korkeuteen. Muotti kannattaa suunnitella siten että siitä tulee mahdollisimman matala ja pieni, jolloin sen käsittely helpottuu. (Niemi 2010c, Valukappaleiden suunnittelu kaavauksen kannalta, s. 2)

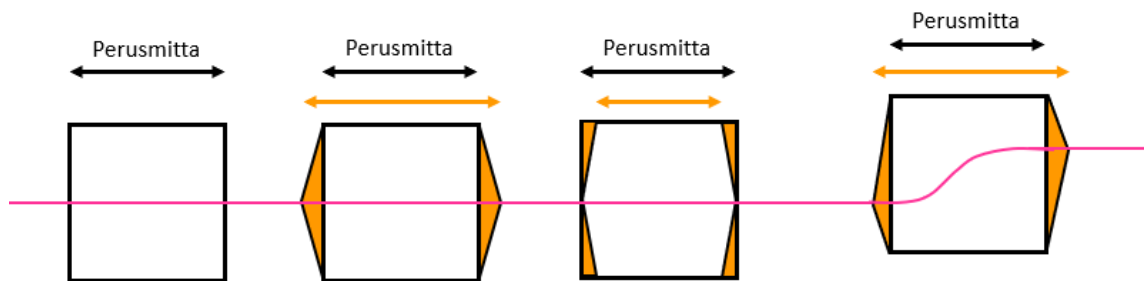
2.2 Valukappaleen geometriset yksityiskohdat

Kappaleen hahmottelun jälkeen siirrytään äskeisten muotojen ja niihin tehtävien lisäysten tarkempaan suunnitteluun. Tässä kohtaa kappaleen muotoon lisätään valua

helpottavia ratkaisuja, kappaleeseen muodostuvia jännityksiä ehkäiseviä piirteitä ja otetaan huomioon sulan jähmettymisen tuomat vaatimukset. Muotojen mitat suunnitellaan samalla.

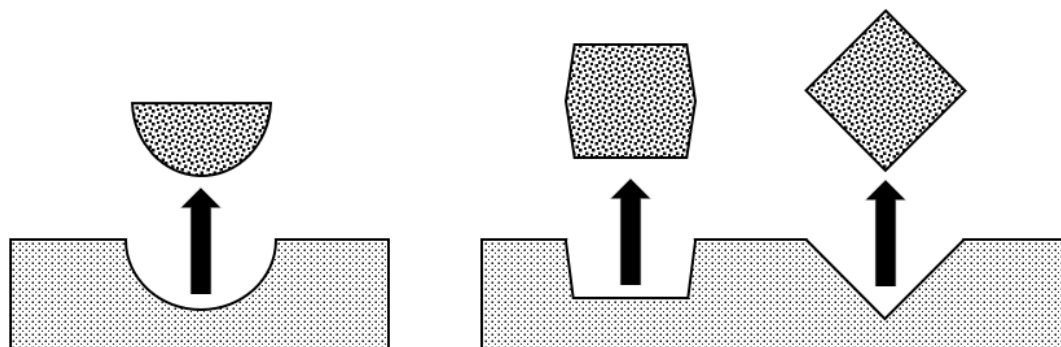
2.2.1 Hellitykset

Hellitykset (päästöt) ovat jakotasoon nähden pystysuorien seinämien viistoumia, jotka mahdollistavat mallityökalun irtoamisen muotista tai kappaleen irtoamisen muottityökalusta. Tuotteessa esiintyvien hellitysten määrää voidaan vähentää keernojen avulla, mutta on muistettava, että useimmiten myös keernoissa on oltava vastaavasti omat hellitykset. Kuvassa 4 on kuvattu esimerkillä eri vaihtoehtoja, miten hellitykset muuttavat valukappaleen mittoja. (Asanti 1962, s. 81; Honkavaara 2014, s. 43)



Kuva 4. Eri hellitystyypppejä esitettynä kappaleen ja jakopinnan avulla (Honkavaara 2014, s. 43).

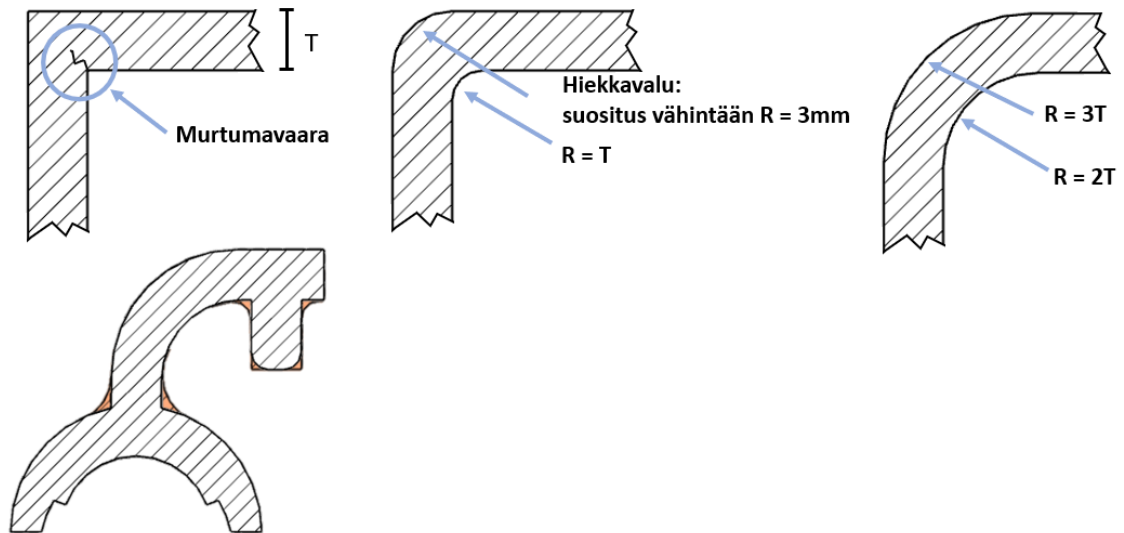
Hellityksiä mitoitettaessa kannattaa hyödyntää kappaleessa luonnostaan esiintyviä hellityksiä, jolloin alkuperäisen kappaleen perusmitta ei muutu. Kuvassa 5 on esitetty perusajatus luonnollisesta hellityksestä. (Keskinen & Niemi 2015a, Valumallit, s. 3) Hellitysten lisäksi muottiin tehdään tarvittaessa välykset. Valumuotin välykset ovat muottiin ja keernalaatikkoon tehtyjä tyhjiä tiloja, joiden tarkoitus on helpottaa keernojen ja muotin osien asennusta (SFS-EN 12890 2000).



Kuva 5. Kappaleessa suoraan esiintyvä luonnollinen hellitys ja sen aikaansaaminen valuasentoa muuttamalla (Keskinen & Niemi 2015, Valumallit, s. 3).

2.2.2 Pyöristykset

Valukappaleissa tulisi käyttää pyöristyksiä nurkissa, jotta siihen saadaan aikaiseksi jouheva muoto ja se jähmettyisi mahdollisimman tasaisesti. Terävät kulmat tulisi pyöristää, jolloin ehkäistään niihin syntyviä suurten rasitusten aiheuttamia jännityshuippuja. Jännitysten keskittyminen tiettyyn kohtaan kappaletta voi johtaa halkeamiin, murtumiin ja materiaaliominaisuuksien vaihteluihin. (Honkavaara 2014, s. 46) Teräviin kulmiin kohdistuu jännityksiä paitsi lopullisen tuotteen käyttötilanteissa, myös jo valumateriaalin jähmettymisen aikana. Kuvassa 6 esitetään pyöristysten pääperiaatteet.



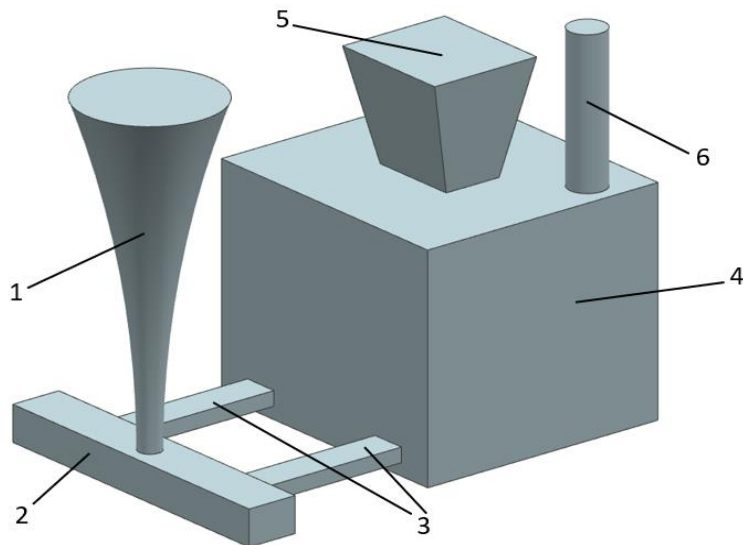
Kuva 6. Pyöristysten pääperiaate (Honkavaara 2014, s. 46)

Pyöristetyt nurkat ovat muotissa huomattavasti kestävämpiä valutapahtuman aiheuttamaa lämpökuormaa vastaan kuin pyöristämättömät (Asanti 1962, s. 95). Nurkkien pyöristykset voidaan mitoittaa täsmällisin mittaluvuin joko yksittäin tai useamman nurkan ryhmänä. Pyöristykset voidaan mitoittaa myös toleranssina. Toleranssin määrittelyssä tulisi huomioida sekä kappaleen toiminnallisuuteen että muotin kestävyteen ja työkalujen valmistukseen liittyvät näkökohdat. Valumuotin kestävyden kannalta olisi tärkeää mitoittaa pyöristykset mahdollisimman suuriksi. Suuret pyöristykset mahdollistavat kaavaus- ja muottityökalujen helpon valmistuksen. Jos laajoja pyöristyksiä ei voida kappaleen toiminnallisuuden vuoksi sallia, tulee suunnittelussa vähintään huomioida työstötekniikoiden kautta muodostuvat rajoitteet. (Höök 2015, Valukappaleiden geometrinen tuotemäärittely, s. 6) Monimutkaisessa

valukappaleessa kulmia on paljon ja niiden pyöristämiseen kannattaa käyttää mahdollisuuksien mukaan samoja mittoja, eli niputtaa useita kulmia samaan pyöristyssäteeseen. Tällä helpotetaan monia vaiheita suunnittelussa ja valmistuksessa.

2.2.3 Syöttöjärjestelmä

Syöttöjärjestelmän suunnittelussa määritellään sulan kulkema reitti ja valuvirheitä ehkäiseviä piirteitä. Valussa sula kaadetaan kaatokanavaan, mistä se jatkaa valukanavaan ja valukappaleelle varattuun muotoon. Mikäli valukanavia on useampia, jaetaan kaatokanavasta reitit kuhunkin valukanavaan jakokanavalla. Sulan täytettyä valukappaleen muodon, se täyttää syöttökuvun. Syöttökuvun tehtävänä on syöttää valukappaleeseen sulaa jähmettymisen aikana, kompensoiden kutistumia. Syöttökuvun pitää tällöin jähmettyä viimeisenä ja olla riittävän iso. Syöttökupu on sijoitettava massakeskipisteeseen, se on voitava kaavata ja sen poistaminen jähmettyneestä kappaleesta pitää olla helppoa. (Niemi 2010c, Syöttöjärjestelmän suunnittelu, s. 3; SFS-EN ISO 8062-1 2007; Alavudeen et al. 2021) Muotissa ollut ilma poistuu ilmapoistoaukosta. Kuvassa 7 on esitetty yksinkertainen esimerkki syöttöjärjestelmän eri osista. Syöttöjärjestelmää suunniteltaessa on otettava huomioon sulan virtauksesta aiheutuva turbulenssi ja sulan edetessä kohtaama ilman ja samalla hapen määrä. Jos syöttöjärjestelmä aiheuttaa sulaan paljon turbulenssia, siihen muodostuu jähmettymisen aikana halkeamia, jotka huonontavat sen mekaanisia ominaisuuksia (Campbell 2015, s. 17). Turbulenssi syntyy monen tekijän summana ja esimerkiksi pyöristykset niin valukappaleessa kuin syöttöjärjestelmän muissa osissa vähentävät turbulenssia (Balasubramani et al. 2021). Sulan syöttö tulee suunnitella siten että sulan ja ilman välinen pinta-ala on mahdollisimman pieni, koska sulan pintaan muodostuu epäpuhtauksia, esimerkiksi oksideja, sen reagoiessa hapen ja ilman kosteuden kanssa (Campbell 2015, s. 25).



Kuva 7. Mallinnus esimerkkinä toimivasta syöttöjärjestelmästä. 1 - Kaatokanava, 2 - jakokanava, 3 - valukanava, 4 - valukappale, 5 - syöttökupu ja 6 - ilmanpoistoaukko. (SFS-EN ISO 8062-1 2007)

2.2.4 Toleranssit

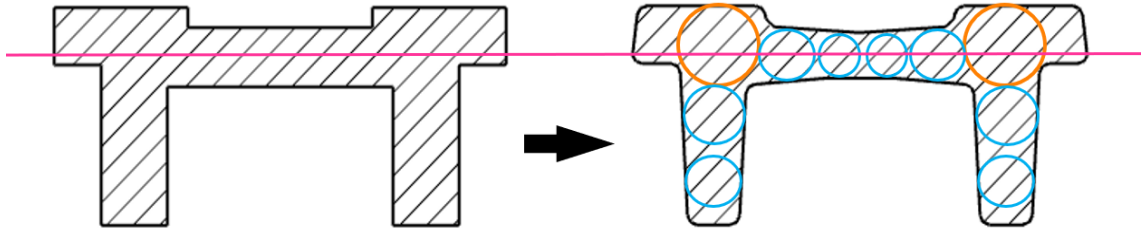
Hiekkavalulla harvemmin pystytään tuottamaan kappaleiden niitä kohtia, joissa ovat tarkimmat toleranssit. Tämän takia jälkityöstö on yleisesti käytössä valuteollisuudessa. (Campbell 2015, s. 898; Kabnure et al. 2020) Lopullinen tuote syntyykin useimmiten koneistamalla se valetusta aihioista (Honkavaara 2014, s. 47). Jotkut muodot valukappaleessa voidaan tuottaa sekä valamalla esimerkiksi keernojen avulla, tai koneistamalla jälkikäteen. Suunnittelijan tulee ottaa huomioon kumpi menetelmä sopii kuhunkin tilanteeseen kulujen, kaavauksen helppouden ja vaadittujen pinnanlaatuojen näkökulmasta. (Asanti 1962, s. 109) Valun tarkkuuteen vaikuttavat esimerkiksi valumenetelmä, valukappaleen rakenteen monimutkaisuus, valuasento, valumallin laatu, valumateriaali ja valimon työmenetelmät (Niemi 2010c, Valukappaleen toleranssit s. 1). Jotta valettua kappaletta voidaan esimerkiksi koneistaa, on koneistettaville pinnoille varattava työstövaraa. Valukappale tällöin mitoitetään työstettävältä pinnalta hieman hieman liian isoksi. Työstövarojen sijoittelu vaikuttaa myös muotinvalmistuksen helppouteen ja tarvittavien keernojen määrään. (Honkavaara 2014, s. 41, 49)

Työstövarojen lisäksi valukappaleen toleransseihin vaikuttaa jähmettymisen aikana tapahtuva kutistuminen. Kutistuessaan valukappaleen mitat muuttuvat, mutta myös sen sisältämät kulmat saattavat vääristyä (Campbell 2015 s. 168; Kabnure et al. 2020). Kutistuman vaikutusta on vaikea ennustaa, koska siihen vaikuttavat monet asiat, kuten materiaalin kiteytymis- ja kutistumisominaisuudet, jäähtymisaika, kappaleen muoto ja muotin aiheuttamat mitta- ja muotopoikkeamat. (Annicchiarico & Alcock 2014, s. 662;

Honkavaara 2014, s. 41) Mitä tarkemmin kutistumaa ennustetaan toleranssien tarkentamiseksi, sitä kalliimpaa suunnittelutyöstä ja samalla kappaleesta tulee. Toleranssien mitoittamisessa tulee lisäksi huomioida pyöristysten ja hellitysten vaikutus muihin mittoihin (Honkavaara 2014, s. 42).

2.2.5 Suunnattu jähmettyminen

Kutistuman lisäksi sulan jähmettymiseen suunnittelijan on kiinnitettävä huomiota suunnattuun jähmettymiseen ja kappaleen mekaanisten ominaisuuksien muotoiluun jäähtymisnopeudella. Suunnatulla jähmettymisellä tarkoitetaan sitä, että valukappale jähmettyy ensin ohuimmista osistaan ja jähmettyminen jatkuu kohti paksumpia osia ja viimeiseksi massakeskittymään asti (Honkavaara 2014, s. 44). Käytännössä jähmettyminen alkaa syöttökuvuista kauimpana olevista kohdista ja päättyy syöttökupuihin, jotka on sijoitettu massakeskittymiin. Äskeisen lisäksi tulisi välttää tarpeettomia seinämäpaksuuden muutoksia. Seinämäpaksuuden muutoksia voidaan vähentää esimerkiksi sopivilla pyöristyksillä (Honkavaara 2014, s. 53). Jähmettymisen etenemismatkan varrella oleviin tarpeettoman paksuihin kohtiin voi muodostua imuvirheitä. (Niemi 2010c, Suunnattu jähmettyminen, s. 1) Kuvassa 8 on esitetty esimerkki suunnattua jähmettymistä noudattavasta muotoilusta, jossa samalla saadaan kappaleeseen useita hellityksiä. Seinämäpaksuus ei saisi myöskään olla liian pieni, koska se voi johtaa sulan jähmettymiseen ennen kuin se kattaa koko valukappaleen muodon (Honkavaara 2014, s. 52). Suunnattua jähmettymistä suunniteltaessa voidaan hyödyntää Heuwerin ympyrämenetelmää, jossa kappaleen piirroksiin piirretään ympyröitä. Ympyrät ovat pienimmillään niissä osissa, jotka ovat kauimpana massakeskittymästä ja kasvavat massakeskittymää kohti mentäessä (Monroe & Warriner 2018). Muottiin saatetaan myös kaavata syöttötäytteet, jotka ovat ylimääräistä tilaa tietyissä kohdissa muottia. Syöttötäytteiden tarkoituksena on parantaa kappaleen suunnattua jähmettymistä tekemällä kappaleesta tarkoituksella perusmittaa paksumpi, tai tehdä syöttökuvulle parempi sijoituspaikka. Syöttötäytteillä voidaan myös yhdistää useampia massakeskittymiä. Syöttötäytteet voidaan koneistaa pois jälkityöstössä tai ne voivat olla osa lopullista tuotetta. (Honkavaara 2014, s. 45.)

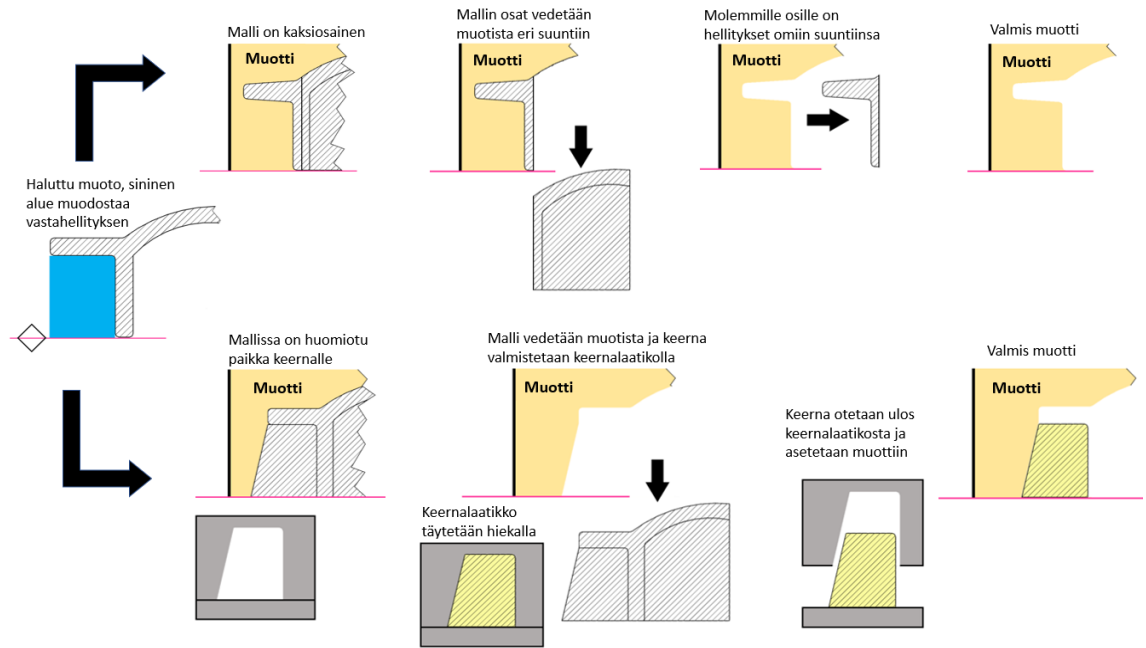


Kuva 8. Perusmuotoon on lisätty suunnattua jähmettymistä tehostavia piirteitä ja pyöristykset. Jakopinta merkitty vaaleanpunaisella, Heuverin ympyrämenetelmää mallintavat ympyrät sinisellä ja massakeskittymät oranssilla. (Honkavaara 2014, s. 44)

Valukappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa esimerkiksi jäähtymisnopeutta muuttamalla. Jäähtymisnopeus muuttaa kappaleeseen muodostuvien metallikiteitten kokoa. Jäähtymisnopeutta voidaan hallita myös paikallisesti asettamalla muottiin nopeampaa jäähtymistä vaativien kohtien lähelle jäähdytyskappaleita ja hitaampaa jäähtymistä tarvitsevien lähelle lämpöeristeitä. (Alexandersen et al. 2018; Niemi 2010c, Syöttöjärjestelmän suunnittelu, s. 9; SFS-EN ISO 8062-1 2007)

2.2.6 Vastahellitysten huomioiminen

Jotkut piirteet kappaleessa saattavat aiheuttaa vastahellityksiä, eli kappale on leveämpi syvemmällä muotissa, jolloin mallin irrottaminen muotista ei onnistu. Tällaiset piirteet voidaan poistaa muuttamalla kappaleen muotoja, mutta jos kyseiset piirteet ovat haluttuja, voidaan ongelma ratkaista keernoilla tai erillisillä muotin osilla. Kuvassa 9 on esitetty esimerkkitalanne ja kaksi eri ratkaisua ongelmaan.



Kuva 9. Vastahellitysten huomioiminen käyttämällä moniosaista mallia (ylhällä) tai keernan avulla (alhaalla) (Honkavaara 2014, s. 24).

3. CAD YLEISESTI VALUSUUNNITTELUSSA

CAD-ohjelmassa kappaleesta luodaan todellisuutta jäljittelevä matemaattinen malli ja sitä käytetään apuna tietokoneavustetussa suunnittelussa. Tietokoneavusteisella suunnittelulla voidaan mallintaa ja analysoida melkein minkä tyyppisiä kappaleita tahansa monella eri tavalla ja se on nykyään osa tuotesuunnittelua lähes kaikilla aloilla. 3D-mallinnukseen on lukuisia CAD-ohjelmia, esimerkkeinä SolidWorks ja Siemens NX.

Valamalla voidaan valmistaa erittäin monimutkaisia kappaleita, joten on luonnollista, että nykyään hyödynnettäisiin tietokoneita suunnittelussa. Tietokoneavusteista suunnittelua on jo pitkään käytetty valukappaleiden suunnittelussa ja sillä voidaankin simuloida sekä valmiin kappaleen ominaisuuksia, että sen valmistusprosessin aikana huomioon otettavia asioita. Ennen kuin lähdetään mallintamaan, on hyvä hahmotella muotoa ja tärkeimpiä piirteitä paperille, jolloin kokonaisuus pysyy paremmin hallussa ja mallintaminen on hahmotelmasta jatkava tekninen suorite. (Honkavaara 2014, s. 36, 51). Valamisen simulointiin erikoistuneita ohjelmia on paljon, joista esimerkkejä ovat muun muassa: Procast, Click2Cast, Auto CAST, FLOW 3D ADSTEFAN ja MAGMASOFT (Alavudeen et al. 2021; Jagannadha & Sunanda 2021).

Luvussa 2.1 todettiin, että valukappaleen muodon hahmottelussa huomioita vaativia asioita. Nuo samat kohdat liittyvät myös CAD-malliin, eli hahmottelussa siis jo mietitään etukäteen myös tietokoneella tehtävään malliin liittyviä asioita. Hahmottelussa mittojen ei tarvitse olla tarkkoja vaan suuntaa antavia, jolloin kokonaiskuva hahmottuu. Luvussa 2.2 käsitellyt tarkemmat geometriset yksityiskohdat voidaan myös toteuttaa CADin avulla, kun päämuodot on selvillä.

3.1 CADin käyttö geometristen yksityiskohtien suunnittelussa

Luvuissa 2.2.1 ja 2.2.2 käsitellyt hellitykset ja pyöristykset voidaan mallintaa valukappaleeseen. Hellitysten määrittämiseen on olemassa SFS-EN 12890-standardi, josta selviää kullekin seinämän korkeudelle ja valumenetelmälle sopiva hellityskulma, joka voidaan syöttää CAD-malliin. Pyöristykset määräytyvät seinämänpaksuuden mukaan ja ne voidaan myös syöttää CAD-malliin. Nurkkiin syntyviä jännityksiä, lämpökuormia ja pyöristysten vaikutusta niihin voidaan simuloida. Simuloinnin tuloksilla löydetään sopivat pyöristykset jokaiseen nurkkaan. Mittojen yksinkertaistamiseksi

kannattaa useammassa nurkassa käyttää samoja pyöristyksiä mahdollisuuksien mukaan (Höök 2015, Valukappaleiden geometrinen tuotemäärittely, s. 6).

3.2 Toleranssit ja jatkoystön tarpeen suunnittelu CADillä

Kappaleessa 2.2.4 käsiteltiin valukappaleen toleranssien suunnitteluun liittyviä asioita ja huomattiin että toleransseihin vaikuttavat monet tekijät. CAD-ohjelmat helpottavat toleranssien sijoittelua, koska sillä mallinnettu kappale on selkeä, visuaalinen ja helposti muokattavissa. Malliin voidaan esimerkiksi merkitä työstövarat ja koneistettavat pinnat ja muodot eri väreillä (Honkavaara 2014, s. 49). Jotta koneistus voidaan toteuttaa, on valettu kappale pystyttävä kiinnittämään paikoilleen työstökoneeseen koneistuksen ajaksi. Tämän takia kappaleessa on oltava sopivia ulokkeita joista se voidaan kiinnittää. Ulokkeet voivat olla osa lopullista tuotetta tai ne voidaan koneistaa lopuksi pois. CAD-ohjelmalla luotu tiedosto syötetään koneistuksen suorittavaan työstökoneeseen, joka suorittaa työn tiedoston pohjalta. (Honkavaara 2014, s. 48)

Päätettäessä jälkityöstöä vaativia pintoja voidaan osaa tarkastella kokoonpanossa. Tarkastelu voidaan suorittaa esimerkiksi paperille hahmottelemalla, prototyypillä tai CAD-mallilla. Prototyypin uudelleen muotoilu on kuitenkin hidasta ja paperille hahmoteltu malli on kaksiulotteinen. Artikkelissa (Bernard et al. 2013) on todettu että moni tuotannon ongelma johtui kokoonpanoon liittyvistä asioista, joita voitiin vähentää CAD-mallien käytöllä. CAD-malli on modulaarinen ja sen käyttäytymistä osana kokoonpanoa ja kokoamisvaiheessa voidaan simuloida. Kokoonpanoa voidaan simuloida muuttuvissa olosuhteissa ja kuormituksissa vähäisin kustannuksin (Armilotta 2013). Simulointien tuloksia ja kokoonpanoa tarkastelemalla voidaan pintojen toleranssit ja jälkityöstöä vaativat pinnat ja muodot määrittää. Samalla voidaan miettiä että mitkä muodot kannattaisi luoda keernoilla. Valimoon kannattaa lähettää sekä valuaihion, että koneistetun kappaleen CAD-malli (Honkavaara 2014, s. 47).

3.3 Sulan liike, lämpötilat ja jähmettyminen

Mallinnus ja simulointi voidaan toteuttaa yhdellä, tai useammalla ohjelmalla. Jos simulointi toteutetaan kahdella CAD-ohjelmalla, luodaan kappaleen tai syöttöjärjestelmän geometria yhdellä ohjelmalla, joka tuodaan toiseen CAD-ohjelmaan simulointia varten. Geometriasta luodaan "verkko", eli verkkomainen pinta (eng. mesh), jota simuloinnissa käytetään. Lisäksi CAD-ohjelmaan syötetään muita valamiseen liittyviä tekijöitä, kuten syöttöaika, reunaehdot, sulan lämpötila, valumateriaali, muotin materiaali ja valumenetelmä. (Jagannadha & Sunanda 2021; Honkavaara 2014, s. 51)

Valutapahtuman simuloinnissa voidaan tarkastella muun muassa sulan liikettä ja siinä esiintyvän turbulenssin määrää ja sulan lämpötilajakaumia ja jäähtymisnopeuksia. Luvussa 2.2.3 todettiin että sulaan aiheutuvaa turbulenssia on hyvä minimoida. Simuloinnin tuloksia voidaan käyttää syöttöjärjestelmän ja syöttönopeuden muuttamiseen turbulenssin minimoimiseksi. Luvussa 2.2.5 todettiin että jäähtymisnopeus vaikuttaa valukappaleissa sekä mekaanisiin osiin että syntyviin virheisiin. Simuloinnilla voidaan ennustaa minne jäähdytyslementtejä tai eristeitä kannattaa sijoittaa ja miten mekaaniset ominaisuudet muuttuvat esimerkiksi kiderakenteen mukaan. (Alexandersen 2018) Sulan jähmettymistä simuloiva CAD-ohjelma ottaa myös huomioon muutokset sulan käytöksessä, sillä valumateriaali käyttäytyy eri tavalla sulan jäähtyessä, sulan kiinteytyessä ja lopuksi kiinteän materiaalin jäähtyessä. Vastaavasti kutistumat tapahtuvat kolmessa osassa: sulakutistuma tapahtuu sulan jäähtyessä jähmettymislämpötilaan, kiteytymiskutistuma tapahtuu metallin muuttuessa sulasta kiinteäksi eli kiteytymisen aikana ja valukutistuma tapahtuu kiinteän metallin jäähtyessä. (Asanti 1962, s. 6; Jagannadha & Sunanda 2021)

Luvussa 2.2.4 todettiin että jähmettyessään ja jäähtyessään valuun käytetty materiaali kutistuu. Kutistumia voidaan simuloida CAD-ohjelmilla ja niiden vaikutukset voidaan ottaa huomioon (Jagannadha & Sunanda 2021). Simuloinnin tuottamasta mallista nähdään myös mitkä osat kappaleesta jähmettyvät ja jäähtyvät viimeisenä. Samasta tuloksesta nähdään kutistumat ja niistä aiheutuvat virheet. Näiden tietojen pohjalta voidaan vähentää virheitä esimerkiksi syöttötäytteidensä sijoittamisella, muodolla ja mitoilla tai syöttökupujen sijainnilla, koolla ja määrällä (Alavudeen et al. 2021; Lin et al. 2011). Materiaalikohtaisten kutistumien lineaariset ohjearvot löytyvät SFS-EN 12890-standardista.

3.4 Valupiirustusten laatiminen

CAD-ohjelmilla kyetään tuottamaan 3D-mallin lisäksi 2D-piirustukset kappaleesta ja kokoonpanosta. Piirustuksiin voidaan helposti ja selkeästi merkitä kuvien lisäksi mittoja, toleransseja ja pinnanlaatuja ja tuottaa poikkileikkaus- ja räjäytyskuvia. Yksi suurimmista piirustusten tekoa helpottavista tekijöistä on että CAD tuottaa kuvat suoraan 3D-mallista ja se tulostaa suoraan valitun muodon mitat. Jatkotyöstöllä aikaansaatavat muodot voidaan myös merkitä piirustuksiin. (Armillotta 2013). Piirteitä voidaan myös jaotella useampiin piirustuksiin, jolloin niiden tarkastelu on selkeämpää ja valimon työ helpottuu. Piirustusten tulee luonnollisesti olla selkeitä ja merkintöjen loogisissa paikoissa (Asanti 1962, s. 70).

3.5 Mekaanisen käyttäytymisen simulointi

Simulointiohjelmilla voidaan ennustaa valukappaleen monia mekaanisia ominaisuuksia ja käyttäytymistä, kuten väsymistä, jännityskeskittymät, myötymät, leikkausjännitykset, käyttäytyminen eri lämpötiloissa ja värähtelyjen eteneminen. Kirjassa – (Kumar et al. 2002) on käyty läpi monia CAD-simulointikohteita. Lisäksi esimerkiksi tutkimuksessa (Groza et al. 2018) on simuloitu pallografiittiraudasta valmistetun valukappaleen väsymistä ja verrattu simuloinnin tuloksia toisen artikkelin (Bezine et al. 2004) koetuloksiin. Simuloinnin tarkoituksena oli tarkastella miten erikokoiset ja -muotoiset särömäiset virheet vaikuttavat väsymiskäyttäytymiseen. Simulointi ja koetulokset olivat pääpiirteittäin yhtenevät. Simuloinnin tuloksia verrattaessa kappaleelta vaadittuihin mekaanisiin- ja kustannuskriteereihin voi suunnittelija ottaa ne huomioon esimerkiksi materiaalivalinnoissa, kappaleen muotoilua hienosäätäessä (esimerkiksi seinämänpaksuus, nurkkien pyöristykset ja seinämien asento kuormitus-suuntaan nähden) ja mahdollista lämpökäsittelyä valittaessa.

4. CAD-SUUNNITTELUN HYÖDYT

Tietokoneavusteinen suunnittelu on osa useaa valukappaleen suunnittelun vaihetta. Kuten luvussa 3. käsiteltiin voidaan CADiä soveltaa moniin eri käyttökohteisiin ja se toimii suunnittelijan työkaluna. Seuraavaksi tarkastellaan mitä hyötyä CADistä on suunnittelussa.

4.1 3D-mallin hyödyt suunnittelussa

Kuten aiemmin todettu CAD-ohjelmilla toteutetut simuloinnit kykenevät ennustamaan monia valutuotteisiin syntyviä virheitä. Valuteknologiaa pystytään optimoimaan simuloinnin tulosten pohjalta, jolloin virheiden määrä vähenee. Itse simuloinnin lisäksi suunnittelija myös analysoi tulosten paikkansa pitävyyttä ja tekee muutoksia esimerkiksi syöttöjärjestelmään, hellityksiin, pyörityksiin, valumateriaaliin, tai muuhun valmistukseen liittyvään tekijään, kunnes virheet häviävät. (Jagannadha & Sunanda 2021)

Tietokoneella tehty malli voi myös toimia hyvänä kommunikointivälineenä, kun ollaan yhteydessä kappaleen valmistavaan valimoon. CAD on valusuunniteluissa käytetyistä työkaluista yksi muiden joukossa eikä se pysty korvaamaan ammattitaitoa ja muita suunnittelutyökaluja kokonaan. CAD-mallissa 3D-muoto havainnollistaa mittoja ja tarkat mitat ovat havainnollisesti esillä. Tällöin suunnittelijan lisäksi myös muut hahmottavat kappaleen muodon.

Valukappaleessa, esimerkiksi moottorin sylinterilohkossa voi olla päämittojen ja muiden perustietojen lisäksi suurikin määrä esimerkiksi hellityksiä, pyörityksiä, toleransseja, pinnanlaatuja ja syöttöjärjestelmän osia, jolloin piirustukset ovat jo merkintöjen määrän takia raskaita (Armilotta 2013). Tietokoneella mallinnetussa mallissa kussakin vaiheessa tarpeellisen tiedon saa helposti tarkastelun alle ja niihin on helppo tehdä muutoksia. CADillä tehdystä mallista voidaan myös tarkastella jo etukäteen kaavaukseen, mallinsoiin, keernoihin, syöttöön ja jähmettymiseen liittyviä asioita.

4.2 Simuloinnin hyödyt suunnittelussa

Valuteollisuuden yleisimpiä heikkouksia ympäri maailman ovat pitkät läpäisyajat, kalliit työkalut, tuotannon joustavuuden puutos ja muotojen aikaansaavan menetelmien valintojen vaikeudet. Nämä tekijät laskevat tuotantomääriä ja kappaleiden laatua. Pelkästään jo syöttöjärjestelmän kaatokanavan sijainnilla ja muodolla on suuret

vaikutukset lopullisessa kappaleessa esiintyviin virheisiin. Syöttöjärjestelmää simuloimalla voidaan vähentää yrityksen ja erehdyksen kautta tapahtuvaa suunnittelua. (Alavudeen et al. 2021; Kabnure et al. 2020) Simuloinnissa voidaan esimerkiksi tarkastella millä syöttöjärjestelmään tehtävillä muutoksilla kappaleeseen saadaan jouhevampi ja tasaisempi täyttö, virheiden vähentämiksi (Kang et al. 2019; Lin et al. 2011). Artikkelissa ”Numerical simulation of metal flow and solidification in the multi-cavity casting moulds of automotive components” (Hajipour et al. 2008) on simuloitu vauhtipyörän ja jarrulevyn valmistuksessa tehtävän valun aikana tapahtuvaa sulan liikettä ja jähmettymiskäyttäytymistä. Tutkimuksessa käytettiin FLOW 3D simulointiohjelmaa ja sen tuloksia verrattiin koetuloksiin. Simuloinnilla huomattiin muun muassa kutistumien tuottamia virheitä, jotka olivat vastaavissa paikoissa myös koekappaleissa. Myös artikkelissa ”Quality and yield improvement of ductile iron casting by simulation technique” (Kabnure et al. 2020) tehtiin samankaltaista vertailua pallografiittiraudasta valmistetun laipan kannalta. Laipan 3D-mallilla on simuloitu valuvirheet ja sen jälkeen valu on toetetettu saman mallin pohjalta. Kokeessa huomattiin että simulonnilla pystyttiin ennustamaan valuviat. Monissa tutkimuksissa on todettu, että jopa 90 % kaikista valuvirheistä johtuvat jako- ja valukanavien huonosta suunnittelusta. Simulointiohjelman hyödyntämisellä on vähennetty vastaavat virheet 30 %:iin. (Alavudeen et al. 2021) Lisäksi esimerkiksi Toyota tehosti tuotannon läpäisyajoja, vähensi suunnittelussa tapahtuvaa vaihtelua ja vähensi tuotesuunnittelun kuluja CAD-ohjelmia hyödyntäen (Bernard et al. 2013).

Kuten luvussa 3.2 todettiin voidaan valukappaleita simuloida osana kokoonpanoa. Tällöin varmistetaan sen sopivuudesta lopputuotteeseen, ja voidaan tarvittaessa tehdä muutoksia. Simuloinnilla saadaan selville millaisia mekaanisia ominaisuuksia valukappaleelta vaaditaan ja mitkä pinnat vaativat jatkotyöstöä. Simuloimalla käyttötilanteita vähennetään virheettömän kappaleen aikaansaamiseksi vaadittujen yrityskertojen ja valmistettavien prototyyppien määrää, mikä nopeuttaa tuotekehittelyä (Kabnure et al. 2020).

4.3 Valumuotin 3D-tulostus ja koneistaminen

Valamiseen on myös sovellettu modernimpia valmistusmenetelmiä. Muotit voidaan kaavauksen lisäksi 3D-tulostaa jauhepetimenetelmää hyödyntäen. CAD-ohjelmat ovat olennainen osa 3D-tulostusta, koska muotti tuotetaan suoraan 3D-mallin pohjalta. Kaavauskehää vastaavaan astiaan levitetään hiekkaa ohut kerros, josta kovetetaan haluttu osa esimerkiksi sintraamalla hiekkarakeet laserilla tai liittämällä ne sideaineella. Käsitellyn kerroksen päälle levitetään uusi kerros ja prosessi toistuu, kunnes koko muotti

on tulostettu. Lopuksi ylimääräinen hiekka poistetaan ja laitetaan jatkokäyttöön. Muotti on valmis käytettäväksi. Menetelmässä ei tarvita fyysistä mallia, jolloin muottiin ei tarvitse tehdä sen vaatimia muotoja, kuten hellityksiä ja välyksiä. Kustannukset alenevat myös, koska mallia ei tarvitse valmistaa. Menetelmä ei kuitenkaan eliminoi keernojen tarvetta tai valutapahtuman takia tarvittavia muotoja, esimerkiksi suunnattua jähmettymistä parantavia muotoja tai nurkkapyörityksiä. Muotin pinnanlaatu on sitä parempi mitä ohuempia hiekkakerrokset ovat, mutta samalla muotin valmistusaika pitenee. Pinnanlaatuun vaikuttavat myös monet muut asiat, kuten hiekan raekoko, sideaineen viskositeetti ja sintraavan laserin tai sideainetta levittävän työkalun tarkkuus. Itse muotin lisäksi myös keernat voidaan valmistaa jauhepetimenetelmällä. 3D-tulostaminen soveltuu parhaiten monimutkaisia muotoja sisältävien valukappaleiden valmistukseen. Yksi 3D-tulostamisen vahvuus on että, muotin ei tarvitse olla kaksiosainen, vaan muotti voidaan tulostaa osissa ja kasata yhteen. Tämä lisää valukappaleeseen suunniteltavien muotojen vapautta, mikä tekee tuotannosta joustavampaa. Toinen vahvuus on valmistusaika ja käytetty työvoima. Monimutkaisia muotoja sisältävä muotti voidaan tulostaa nopeammin ja vähemmällä henkilöstöllä, kuin perinteisellä kaavauksella, koska mallia ei tarvitse valmistaa. Suurissa tuotantomäärissä perinteinen kaavaus on kuitenkin nopeampaa. Tämä kuitenkin vaihtelee ja riippuu monesta tekijästä. 3D-tulostuksen hyödyntäminen sopii hyvin prototyyppien valmistukseen. 3D-tulostettujen muottien heikkous on keskimäärin huonompi pinnanlaatu ja -tiheys verrattuna perinteisellä kaavauksella valmistettuun muottiin. Tarkkoja syitä pinnan huonoille ominaisuuksille ei ole tutkittu juurikaan. (Balasubramani et al. 2021; El Mansori et al. 2017; Gao et al. 2018)

Jauhepetitulostuksen lisäksi valumuotti voidaan valmistaa koneistamalla se kiinteästä palasta hiekkaa. Tässäkin menetelmässä valumallia ei tarvita vaan valukappaleen muoto koneistetaan hiekkaan CAD-mallin pohjalta. Koneistusta voidaan myös käyttää joidenkin muotojen aikaansaamiseen 3D-tulostettuihin muotteihin, jolloin muotti syntyisi sekä ainetta lisäävällä että ainetta poistavalla valmistusmenetelmällä. (Balasubramani et al. 2021) Molempia menetelmiä voidaan myös käyttää osana perinteistä kaavausta. (El Mansori et al. 2017)

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tietokoneavusteinen suunnittelu on suosittua monella teollisuuden alalla, mutta CAD-ohjelmien käyttö ei kumoa luvussa 2 käytyjä valukappaleen suunnittelussa huomioitavia asioita, vaan ne pitää huomioida mallinnusta ja simulointia tehdessä. CAD kuitenkin avustaa esimerkiksi jakopinnan määrittelyssä ja nurkkien pyöristyksien ja hellityksien suunnittelussa, ja tallentaa ne suoraan. Tällöin ihmisen ei tarvitse muistaa, laskea ja prosessoida yhtä paljon informaatiota geometriaan liittyen. Samalla ihmisestä johtuvat virheet vähenevät, ilman että luovuutta riistetään suunnittelijalta. Hahmottelu ja muut suunnitteluprosessin osat ovat edelleen oleellisia, tietokone vain toimii visualisoinnin ja simuloinnin työkaluna. CAD esittää mallinnuksella monimutkaisetkin muodot selkeästi ja sellaisessa muodossa että suunnittelijan lisäksi myös muut ymmärtävät kappaleen muodon ja niiden kokoonpanon. Mallinnus toimiikin hyvänä kommunikointivälineenä oltaessa yhteydessä esimerkiksi muihin suunnittelijoihin ja valimon eri osastoihin. Selkeä yhteisymmärrys takaa paremman lopputuotteen. CAD-mallin yksityiskohtia ja mittoja on helppo ja edullinen muokata suunnittelun edetessä.

Kuten kappaleen muotoa käsitellessä myös sen mekaanisten ominaisuuksien simuloinnissa CAD toimii työkaluna, joka simuloi esimerkiksi kappaleen jännityksiä, lämpötilajakaumia, käytöstä osana kokoonpanoa ja sulan liikettä. Tällöin ihmisen ei tarvitse laskea ja prosessoida kaikkea tietoa valutapahtumaan ja kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin liittyen. Suunnittelija voi tällöin keskittyä enemmän analysoimaan simulointien tuloksia ja tekemään niiden pohjalta muutoksia suunnitteluun. CAD-ohjelmien tuottamat simuloinnit ovat monien lähteiden mukaan todenmukaisia jolloin tarvittavien prototyyppien ja testikierrosten määrä vähenee. Samalla tuotekehittelyyn kuluva aika lyhenee. Myös valuvirheet vähenevät, jolloin valmistuvien kappaleiden hylkyprosentti pienenee.

CAD helpottaa suunnittelua, vähentää virheitä ja nopeuttaa tuotekehittelyä. Tuotekehittelyyn kuluvan ajan vähentäminen itsessään vähentää kuluja, mutta nopeamman tuotekehittelyn ansiosta muuttuviin tarpeisiin pystytään vastaamaan tehokkaammin. CAD myös mahdollistaa uusien valmistusmenetelmien hyödyntämistä valuteollisuudessa esimerkiksi 3D-tulostettavia tai koneistettavia muotteja hyödyntäen, joilla voidaan eliminoida osa perinteisen kaavauksen rajoitteista.

LÄHTEET

- Alavudeen, A., Al-Lohedan, H., Ismail, S., Mohammad, F., Rajini, N., Rajkumar, I. & Ram Prabhu, T. (2021) Experimental and simulation analysis on multi-gate variants in sand casting process. Elsevier Ltd.
- Alexandersen, J., De Angelis, S., Engelbrecht, K., Haertel, J., Lazarov, B., Lei, T., Sanna, S., Sigmund, O. & Wang, F. (2018) Investment casting and experimental testing of heat sinks designed by topology optimization. Elsevier Ltd.
- Annicchiarico, D. Alcock, J., R. (2014) Review of Factors that Affect Shrinkage of Molded Part in Injection Molding. Taylor & Francis Group.
- Armillotta, A. (2013). A method for computer-aided specification of geometric tolerances. Elsevier Ltd.
- Asanti, P. (1962). Valukappaleen suunnittelu. Hki: WSOY
- Balasubramani, N., Dargusch, M., El Mansori, M., Jolly, M., Nagarajan, D., Salonitis, K., Saxena, P. & Sivarupan, T. (2021) A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting. Elsevier B.V.
- Bernard, A., ElMaraghy, H., Lanzetta, M., Leu, M., Nee, A., Ong, S., Putz, M. & Zhu, W. (2013). CAD model based virtual assembly simulation, planning and training. Elsevier Ltd.
- Campbell, J. (2015). Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Amsterdam, Netherlands:
- Bezine, G., Billaudeau, T. & Nadot, Y. (2004). Multiaxial fatigue limit for defective materials: mechanisms and experiments. Oxford: Elsevier Ltd.
- El Mansori, M., Sivarupan, T. & Upadhyay, M. (2017) 3D printing for rapid sand casting—A review. Elsevier Ltd.
- Gao, F., Guo, W., Zhang, B. & Zhao, D. (2018). 3D sand mould printing: a review and a new approach. Emerald Publishing Limited.
- Groza, M., Nadot, Y. & Varadi, K. (2018). Defect size map for nodular cast iron components with ellipsoidal surface defects based on the defect stress gradient approach. Elsevier Ltd.

Hajjipour, A., Kermanpur, A. & Mahmoudi, S. (2008). Numerical simulation of metal flow and solidification in the multi-cavity casting moulds of automotive components. Elsevier B.V.

Honkavaara, T. (2014). Valutuotteiden suunnitteluopas. ValuAtlas. Saatavissa: <https://www.valuatlas.fi/node/263>

Höök, T. (2015). Suunnittelijan perusopas. Valuatlas. Saatavissa: <https://www.valuatlas.fi/node/363>

Höök, T. & Meskanen, S. (2016). Hiekkavalimon valimoprosessi. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Saatavissa: https://www.valuatlas.fi/sites/default/files/docs/valimoprosessi_16.pdf

Jagannadha, R. & Sunanda, A. (2021) Simulation for prediction analysis of defects in pulley casted using sand casting process. Elsevier Ltd.

Kabnure, B., Patil, D. & Shinde, V. (2020) Quality and yield improvement of ductile iron casting by simulation technique. Elsevier Ltd.

Kang, C., Seo, H. & Seo, P. (2019). A study on the S/W application for a riser design process for fabricating axisymmetric large offshore structures by using a sand casting process. Elsevier B.V.

Keskinen, R. (1995). MuotINVALMISTUSTEKNIikka. Tampere: Hervannan ammattiopilaitos.

Monroe, C. & Warriner, W. (2018) Locating Solidification Hot Spots and Feeder Positions in Casting Geometries by Image Analysis. Springer International Publishing.

Kumar, K., Lee, H. P., International Conference on Scientific and Engineering Computation (IC-SEC) Corporate Author, International Conference on Scientific and Engineering Computation (IC-SEC), Institute of High Performance Computing (Singapore), National University of Singapore. (2002). Recent advances in computational science & engineering proceedings of the International Conference on Scientific and Engineering Computation (IC-SEC) 2002 ; 3-5 December 2002, Raffles City Convention Centre, Singapore. London : Imperial College Press.

Lin, X., Luo, J., Mi, G. & Sun, Y. (2011). Numerical simulation and defect elimination in the casting of truck rear axle using a nodular cast iron. Elsevier Ltd.

Niemi, P. (2010a). Jälkikäsittelytekniikka. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Saatavissa: <https://www.valuatlas.fi/node/7>

Niemi, P. (2010b). Muotti- ja valutekniikka. Valuatlas & Tampereen ammattiopisto. Saatavissa: <https://www.valuatlas.fi/node/241>

Niemi, P. (2010c). Valun suunnittelutekniikka. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Saatavissa: <https://www.valuatlas.fi/node/264>

Keskinen, R. & Niemi, P. (2011). Kaavausaineet. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Saatavissa: [Kaavausaineet | ValuAtlas](#)

Keskinen, R. & Niemi, P. (2015a). Hiekkamuotin valmistustekniikka. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Saatavissa: <https://www.valuatlas.fi/node/186>

Keskinen, R. & Niemi, P. (2015b). Valumallin valmistuksessa huomioon otettavia seikkoja. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Saatavissa: <https://www.valuatlas.fi/node/219>

SFS-EN ISO 8062-1. (2007). Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Muotilla valmistettujen kappaleiden mittatoleranssit ja geometriset toleranssit. Osa 1: Sanasto. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

SFS-EN 12890. (2000). Valut. Valumallit, mallivarusteet ja keernalaatikot hiekkamuottien ja keernojen valmistamista varten. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.