

Valukomponentin suunnittelun perusteita

Seija Meskanen, Teknillinen korkeakoulu

Koneiden ja niiden osien **suunnittelu, valmistus ja markkinointi** ovat koneinsinöörin keskeisiä tehtäviä koneenrakennusteollisuudessa. Suunnittelu on tehtävistä tärkein ja myös monimutkaisin. Sen onnistumisesta riippuu kaiken muun onnistuminen. Suunnittelu pyritään toteuttamaan johdonmukaisesti ja tehokkaasti. Siksi se on pyritty rationalisoimaan ja systematisoimaan vaikka siihen liittyy myös aina välttämättömänä osana runsaasti luovuutta ja innovatiivisuutta. **Systematisoitua tuotesuunnittelua** tukemassa käytetään **arvoanalyysia**. Arvoanalyysin avulla osan valmistuskustannukset ja muut ominaisuudet pystytään asettamaan vertailukelpoisiksi.

Suunnittelussa vertaillaan ja huomioidaan suurta määrää tarjolla olevia mahdollisuuksia ja reunaehtoja:

- **Mekaaninen kestävyys** - Koneenoson on kestävä ja hoidettava oma osuutensa koneen kokonaistoiminnasta koko arvioidun käyttöikänsä ajan. Siihen kohdistuva kuormitus ei saa aiheuttaa liian suuria kimmoisia tai jopa plastisia tai osan rikkoutumiseen johtavia muodonmuutoksia. Osan on kestävä tarpeen mukaan myös vaihtelevaa kuormitusta.
- **Ympäristövaikutukset** - Syövyttävyyden tai normaalia poikkeavat käyttölämpötilat.
- **Hinta** - Kone on tekijälleen tuloksen teon väline. Osien valmistuskustannukset täytyy saada painettua mahdollisimman alas. Suunnittelija määrää valtaosan komponentin valmistuskustannuksista jo "piirustuspöydällä". Kohtuullinen hankintahinta on myös ostajan näkökulmasta tärkeä. Samoin ovat edulliset käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Huomioon on otettava sekä materiaali-, työstö-, asennus-, apuaine- ym. kustannukset.
- **Massan minimointi** - Käytettävien materiaalien ominaisuuksien ja kappaleen muotoilumahdollisuuksien täydellinen hyödyntäminen. Massaa pyritään minimoimaan käyttämällä kevyempiä ja/tai lujempia materiaaleja, tarkoituksenmukaista muotoilua ja sen mahdollistavia valmistusmenetelmiä.
- **Tilantarpeen minimointi** - Käytännössä merkitsee usein samaa kuin massan minimointi. Tilantarpeen minimointi johtaa pieniin rakennekomponentteihin, ja sitä kautta esimerkiksi hyötykuorman lisäämiseen liikkuvassa kalustossa, kustannussäästöihin materiaalin säästöjen kautta, pienempiin käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin. Tilantarvetta voidaan pienentää rakenteen toimintoja kehittämällä, yhdistelemällä eri toimintoja tarkoituksenmukaisesti, tarkoituksenmukaisella materiaalinvalinnalla ja muotoilulla, ylisuuria varmuuskertoimia välttämällä, jne.
- **Luotettavuuden optimointi** - Ideaalina voidaan pitää, että koneenosa kestää luotettavasti juuri suunnitellun käyttöikänsä ilman korjauksia, jonka jälkeen se kuluneena tai muuten "loppuun ajettuna" voidaan romuttaa.
- **Turvallisuus** - Tuote ei saa normaalin käytön yhteydessä, poikkeustilanteiden sattuessa tai käytön päätyttyä aiheuttaa käyttäjilleen tai ympäristölle hallitsemattomia terveys- ja turvallisuusriskejä.
- **Häviöiden minimointi** - Tarkoittaa käytännössä kappaleen valmistuksessa kuluvan energian, ja materiaalihukan minimointia.
- **Kierrätettävyys** - Kasvava ihmiskunta kuluttaa kiihtyvällä nopeudella uusiutumattomia luonnonvaroja ja tuottaa erilaisia ympäristöä kuormittavia jätteitä. Yhä

tärkeämmäksi muodostuu mahdollisuus käytöstä poistettujen koneenosien materiaalin uudelleenjalostukseen. Eri materiaaleilla on tässä suhteessa varsin suuria eroja.

Esimerkiksi materiaaliominaisuuksien osalta komponenttiin kohdistuvat vaatimukset tiivistyvät ani harvoin vain yhteen tiettyyn maksimoitavaan materiaaliominaisuuteen. Pikemminkin vaaditaan kuhunkin käyttötarkoitukseen soveltuvia materiaaliominaisuuksien yhdistelmiä. Tästä näkökulmasta materiaalinvalinnan suoritus onkin huomattavasti vaativampi tehtävä kuin vain tiettyjen yksittäisten mekaanisten tai muiden materiaaliarvojen vertailu.

Valumenetelmän erityisvaatimukset

Valukomponentin suunnittelija tarvitsee tietoa mm. seuraavista asioista:

- **Valukappaleen suunnittelu- ja valmistusprosessi** - valuvalmistuksen huomioon ottaminen suunnittelussa, muotoilun vapauden tehokas hyödyntäminen, 3D- ja valunsimulointitekniikat ja muut suunnittelun apuvälineet jne.
- **Tarjolla olevat valumenetelmät ja niiden asettamat mahdollisuudet ja rajoitukset** - kustannukset, sarja- ja kappalekoko, materiaaliveitokset, muotoilu, vaaditut mallivarusteet sekä kaavaustekniikan ja mallivarusteiden asettamat rajoitukset, aineenvahvuudet jne.
- **Tarjolla olevat valumateriaalit ja niiden käyttäytyminen valussa** - valurakenteen erityispiirteet, metallurginen epähomogeenisuus ja seinämäherkkyys, valuviat, simuloinnin tarjoamat mahdollisuudet vikojen ennakoinnissa jne.
- **Valumateriaalien käyttöominaisuuksien erityispiirteet** - materiaaliominaisuudet ja niiden erityispiirteet, valuvikojen ja -pinnanlaadun vaikutukset ominaisuuksiin jne.

Näiden lisäksi on vielä otettava huomioon lukuisa joukko menetelmästä johtuvia, komponentin muotoon vaikuttavia näkökohtia (Prof. Jouko J. Vuorinen - "Hitsatun rakenteen muuttaminen valettavaksi", VKS 1997):

- **malli- tai kestopuottokustannukset**
- **kaavaus**
 - jakopinnan muoto ja sijoitus
 - päästöt ja vastapäästöjen välttäminen (myös kestopuoteissa)
 - keernojen muotoilu ja sijoitus
- **keernat**
 - vastapäästöjen välttäminen
 - keernojen yksinkertaistaminen
 - tarpeettomien keernojen välttäminen
 - keernakaasujen ulospääsy
- **muotin täytyminen**
 - seinämänpaksuudet ja -asennot
 - muut muotin täyttymiseen liittyvät näkökohdat
- **jähmettymiskutistuman huomioon otto**
 - suunnattu jähmettyminen
 - ainekeskittymien välttäminen
 - nurkanpyöritykset
- **termisten jännitysten huomioon otto, "vetely"**
- **puhdistus**
 - keernojen poisto
 - kuuma kohta

- valukkeiden poisto
- jakopinta- ja keernasijapurseen poisto
- **työstö**
 - työstövarat
 - kappaleen kiinnittäminen
- **valumenetelmä**
 - saavutettavat muodot
 - saavutettavat tarkkuudet
 - saavutettavat pinnanlaadut
 - pienimmät seinämänpaksuudet

Materiaalin valinnan alkeita

Suunnittelijan tehtävä on kehittää komponentille tai tuotteelle materiaalinvalinta- ja valmistusmenetelmäratkaisu, joka vastaa parhaiten komponentille asetettuihin vaatimuksiin. Vaatimukset muodostavat yleensä monitahaisen vaatimusprofiilin, jossa useilla eri vaatimuksilla on erilaiset ja joskus vaikeasti määriteltävätkin painoarvot ja joissa materiaalin valinta liittyy kiinteästi valmistusmenetelmän valintaan. Toisinaan tehtävä on ratkaistavissa yksinkertaisilla valinnoilla, jolloin yksinkertaista vertailua hyödyntämällä olisi löydettävissä selkeästi tietty ehdottomasti optimaalisin ratkaisu. Tyypillisempää on kuitenkin vertailla useiden eri (materiaali- ja valmistettavuus-) ominaisuuksien yhdistelmiä kuin yksittäisiä maksimoitavia ominaisuuksia.

Materiaalinvalinnan piilevät rajoitukset

Yleensä onkin niin, että vertailutilanne on todellisuudessa epäaito, jolloin materiaalien ja valmistusmenetelmien vertailuihin ja valinnanmahdollisuuksiin liittyy oleellisia rajoituksia. Eri valintojen optimointi aitoa vertailua varten edellyttäisi lähtökohdakseen erilaisia suunnittelun perusratkaisuja ja kaikkia muita sen jälkeisiä ratkaisuja. Esimerkiksi valettavan ja työstetyn materiaalin aito vertailu edellyttäisi käytännössä vähintäänkin tarkasteltavan komponentin erilaista perussuunnittelua: työstettäväksi suunniteltu rakenne vs. valettavaksi suunniteltu rakenne. Tällaisten täysin erilaisten suunnitteluvaihtoehtojen tarkastelu nähdään käytännön suunnittelutyössä työlääksi. Materiaalinvaihtoehtoja ei siis aina voida vertailla täysin "samalta viivalta". Todellisuudessa yksittäisen komponentin materiaalin tai valmistusmenetelmän valinta voi tapahtua hyvinkin loppuvaiheessa tuotteen suunnittelua, jolloin valintatilanne on jo tiukasti sidottu aiemmin tehtyihin perusratkaisuihin eikä kumpaakaan valintaa voida suorittaa muista tekijöistä riippumattomasti.

Materiaalin- ja valmistusmenetelmän valintaa suorittavan suunnittelijan käytettävissä on joukko työkaluja (esim. arvoanalyysimenetelmä, materiaalinvalinta- ja asiantuntijaohjelmistoja, 3D-suunnittelutyökaluja, lujuusopillisia analysointikeinoja jne.), taustatietoja (käsikirjoja, sisäisiä ja yleisiä standardeja, tutkimustuloksia, teknistä dokumentointia, hinnastoja, esitteitä tms.) sekä kokemusta. Toisaalta suunnittelijan valinnan vapautta rajoittavat yrityksen tuote- ja materiaalipolitiikkaan, materiaalien saatavuuteen ja hintaan, omaan osaamiseen ja valmistuskapasiteettiin, tiettyihin asiakassuhteisiin sekä alihankintapolitiikkaan liittyvät valinnat. Jos suunnittelutehtävä on laaja tai taloudellisesti merkittävä, työ on tyypillisesti vielä jaettu suuremmalle joukolle eri osa-alueiden asiantuntijoita, jolloin tilanne on edelleen komplisoidumpi. Tällöin vahvassa asemassa ovat nimenomaan yrityksen sisäiset linjaukset ja käytettäväksi osoitetut resurssit.

Materiaalinvalintakriteereistä

Materiaalinvalintatilanteissa tuijotetaan liian usein yksioikoisesti vain tiettyihin nimellisiin lujuusarvoihin ja ominaispainoon. Kaikki haluavat keveitä ja lujia valukomponentteja. Kevein vaatimukset täyttävä komponentti ei aina synny ominaispainoltaan alhaisimmasta materiaalista. Maksimoitaessa lujuutta tai keveyttä voidaan kuitenkin päätyä materiaalinvalintoihin, jotka nostavat esiin muita ongelmia ja esimerkiksi uusia vaurioitumismekanismeja. Toisaalta lujien materiaalien etujen hyödyntäminen edellyttää nimenomaan sitä, että aineenvahvuuksia voidaan lujuutta vastaavasti laskea, mikä ei kuitenkaan ole rajattomasti mahdollista. Lujat materiaalit ovat yleensä myös vähemmän sitkeitä kuin alemman lujuustason materiaalit. Lujuuden maksimointi voi siten tuottaa sitkeän periksi antamisen sijasta haurasmurtuman vaaran.

Materiaalien kimmo-ominaisuudet voivat myös poiketa voimakkaasti toisistaan. Ero esimerkiksi teräksen ja alumiinin kimmokertoimen välillä on niin suuri (noin kolmikertainen), että suunnittelijan on huomioitava myös kappaleen jäykkyyteen ja käytön aikaisiin muodonmuutoksiin liittyvät näkökohdat materiaalia valittaessa ja komponenttia muotoiltaessa ja mitoitettaessa. Sama ongelma voi tulla eteen juuri lujien materiaalien kohdalla minimoitaessa aineenvahvuuksia. Keveämmän mutta pehmeämmän materiaalin valinta voi toisaalta tuoda esille kulumisongelmia, joita raskaammalla ja kovemmallalla materiaalilla ei kyseisessä tilanteessa ole lainkaan.

Valaminen toki mahdollistaa esimerkiksi liitosvalun avulla paikallisten erityisongelmien ratkaisemisen ilman komponentin koko materiaalin valinnan määräytymistä paikallisen materiaaliongelman perusteella. Usein esimerkiksi kevytmetallivaluihin valetaan liitosvaluna kierretappeja, läpivientiholkkeja ym. inserttejä lujemmasta tai kovemmassa materiaalista. Valurautojen tapauksessa voidaan esimerkiksi paikallisten jäähdytyskokillien avulla tuottaa kovia karbidisia kohtia haluttuun paikkaan valukomponenttia.

Valamisen etuna valmistusmenetelmän valintatilanteessa on yleensä sen monipuolisuus ja mahdollisuus toteuttaa suunnittelijan kiperimpiäkin tavoitteita. Vapaa muotoilu mahdollistaa erilaisten vaatimusten täyttämisen ja toimintojen toteuttamisen yhdessä ja samassa komponentissa yhdellä materiaalilla. Valaminen on myös usein halvin tai halvimpia suursarjatuotteiden valmistusmenetelmiä. Sarjakohtaiset kiinteät kustannukset peittyvät suurissa sarjoissa alhaisten kappalekohtaisten kustannusten vaikutukseen. Kun muut valmistuskustannukset ovat alhaiset, materiaalin hinta muodostaa toki näennäisesti suuremman osan komponentin hinnasta. Tämä on kuitenkin osin harhaa, sillä harvoissa tuotteissa suurinakaan sarjoina raaka-materiaalin kilohinta hallitsee tuotteen kilohintaa.

Systemaattinen tuotesuunnittelu

Yrityksessä tapahtuva tuotesuunnittelu kattaa tuotteiden ja niiden eri sukupolvien suunnittelun. Yksittäisen tuotteen tai komponentin suunnittelu edustaa siis osaa laajemmasta, mahdollisimman johdonmukaisesta ja tehokkaasti johdetusta systemaattisesta tuotesuunnittelutoiminnasta. Systemaattinen tuotesuunnittelu ottaa tuotekohtaisten ja tapauskohtaisten **teknisten näkökohtien** ohella huomioon myös **pitemmän aikavälin näkökohdat** ja **ulkoiset tekijät** (markkinat, kysyntä, kilpailutekijät jne.) sekä yrityksessä vallitsevat **sisäiset tekijät** (yrityksen toiminta-ajatus ja tuotepolitiikka, osaaminen, tuotantokapasiteetti, ulkoisen ali-hankinnan edellytykset jne).

Lähtötilanne yksittäisten tuotteiden tai komponenttien suunnittelussa voi olla vaihteleva. Tuote voi olla esimerkiksi kokonaan uusi, toiminnallisesti muunneltu versio vanhasta tuotteesta tai vain käyttökokemusten perusteella paranneltava versio vanhasta komponentista.

Tällöin myös tuotesuunnittelun kulku voi olla oleellisesti erilainen. Kaikissa tapauksissa tulee kuitenkin yhdistää parhaalla mahdollisella tavalla uusien ideoiden synnyttäminen, kattava eri vaihtoehtojen vertailu ja systemaattinen arviointi, ratkaisujen teko ja valittujen ratkaisujen edelleen kehittäminen kustannustehokkaan ja tarkoituksenmukaisen tuotteen kehittämiseksi annettujen reunaehtojen puitteissa.

Yksittäisen tuotteen tuotesuunnitteluprosessin läpiviemiseen on esitetty lukuisia erilaisia systemaattisia menetelmiä ja apuvälineitä. Kaikki systemaattiset tuotesuunnittelumetodit sisältävät yleensä ainakin:

- taustaselvitysvaiheen
- uusien ideoiden kehittämissä vaiheiden
- ratkaisuvaihtoehtojen arvioinnin
- valittujen ratkaisujen jatkokehittelyyn

Useimmat tuotekehitysmetodit sisältävät myös

- iteroivan suunnittelun periaatteen

Iteratiivinen suunnittelu tarkoittaa sitä, että suunnitteluprosessissa voidaan aina palata taaksepäin suunnittelun lähtökohtien uudelleenmäärittelyyn ja aloittaa prosessi uusitun tai tarkennetun lähtökohdin. Esimerkiksi vertailtaessa jo suhteellisen pitkälle hahmoteltuja eri suunnitteluvaihtoehtoja voidaan huomata uusia materiaali- ja valmistusmenetelmien yhdistelmiä, joita ei osattu ottaa huomioon aiemmin, tai voidaan havaita turhia rajoituksia, jotka ovat tarpeettomasti rajanneet vaihtoehtoja. Iteratiivisen prosessin tarkoituksena on siis varmistaa se, että alkuvaiheessa tehdyt rajoitukset tai valinnat eivät estä optimaalisen ratkaisun löytämistä ja toteuttamista ja että prosessin aikana esiin tulevat uudet mahdollisuudet voidaan hyödyntää.

Eräs systemaattisen tuotesuunnittelumetodien tunnetuimmista apuvälineistä on **arvoanalyysi**. Sen periaatteena on analysoida tuotteelle asetetut toiminnalliset vaatimukset ja arvottaa ennakkoluulottomasti vaihtoehdot näiden vaatimusten tyydyttämiseksi. Tämä tapahtuu siten, että kullekin toiminnallisen vaatimuksen toteuttavalle ratkaisuvaihtoehdolle lasketaan arvo (toiminto per sen saavuttamiseksi vaadittava kustannus). Arvoanalyysin tai sen periaatteiden käyttö eri muodoissa on yleistä paitsi koneenrakennuksessa myös kaikessa muussa suunnittelutoiminnassa.

Arvoanalyysi

Koneenosien ja muiden uusien tuotteiden suunnittelu on luovaa toimintaa. Suunnittelutyö on kuitenkin myös kallista ja suunnitteluvaiheessa tehdyt ratkaisut vaikuttavat määrävällä tavalla tuotteiden valmistuskustannuksiin ja käyttöominaisuuksiin. Niinpä on tarkoituksenmukaista pyrkiä tehostamaan ja järjeistämään luovaa suunnittelua. On kehitetty useita luovan työskentelyn menetelmiä (jopa yli 50), joita suunnittelija voi soveltaa ideoiden hankintaan ja uusien ratkaisujen etsimiseen.

Laajimman suosion systemaattista tuotesuunnittelua tukevista menetelmistä on saavuttanut ns. arvoanalyysi, ja siihen liittyvä toimintanalyysi. Arvoanalyysi on alun perin kehitetty olemassa olevien tuotteiden paranteluun rakenteiden, valmistusmenetelmien ja materiaalinvalinnan kehittämisen kautta, mutta sittemmin se on menestyksellä otettu käyttöön myös uusien tuotteiden kehittämiseen.

Arvoanalyysi on useasta vaiheesta koostuva työskentelymetodiikka, jossa sopivasti yhdistyy analyttinen eli erittelevä, ja synteettinen eli luova ajattelu.

Arvoanalyysin peruskäsite on **arvo**, joka määritellään seuraavasti:

arvo = toiminto / kustannus

Toiminnolla (synonyymi sanalle tehtävä) tarkoitetaan tarkasteltavan kohteen ominaisuuksia. Arvoanalyysissä **pyritään kohteen arvon parantamiseen**. Se tapahtuu toimintoa eli kohteen ominaisuuksia parantamalla tai kustannuksia alentamalla. Useammasta osasta koostuvan tuotteen arvoanalyysissä on tavallisesti tarpeen suorittaa ns. toiminto-kustannus-analyysi, jossa tuotteen kustannukset jaetaan toiminnoille, ja saadaan hyvä vertailupohja toiminnot suorittavien komponenttien valinnalle.

Arvoanalyysi on alun perin ryhmätyöhön perustuva menetelmä, jossa ryhmätyön, luovan toiminnan ja ideoinnin osuus on huomattava. Arvoanalyysissä lähdetään liikkeelle kohteen toimintojen ominaisuuksista ja niiden aiheuttamista kustannuksista, eikä mahdollisesti jo olemassa olevasta ratkaisusta. Arvoanalyysi toteutetaan siten, että seuraaviin viiteen kysymykseen haetaan vastaukset:

- Mikä se on?
- Mitä se tekee?
- Mitä se maksaa?
- Mikä muu voi tehdä saman?
- Mitä tämä vaihtoehto maksaa?

Taulukko 1. Arvoanalyysi jaetaan seitsemään peräkkäiseen vaiheeseen alla olevan taulukon mukaisesti.

Työvaihe	Tehtävä	Arvoanalyysi	VA- kysymys
1. Informaatio	Lähtötietojen keruu	Käytä parhaita informaatiolähteitä. Erota mielipide objektiivisesta tiedosta	Mikä tuote on?
2. Analyysi	Ongelman määrittely: i. tehtävään syventyminen ii. tehtävän rajaus iii. tehtävän tavoitteet iv. tehtävän tarkastelutapa v. tehtävän olennaiset kohdat vi. ideoinnin lähtökohdat	Toimintoanalyysi Kustannusanalyysi Toimintokustannusanalyysi	Mitä tuote tekee? Mitä tuote maksaa? Mitä kukin toiminto maksaa?
3. Ideointi	Ideoiden hakeminen: Mahdollisimman paljon erityyppisiä ideoita	Idean hakumenetelmät: vapaa ja ohjattu ideointi ajattele luovasti, älä arvostele!	Mikä muu voi tehdä saman?
4. Arvostelu	Valitaan parhaat ideat	Arvostelumenetelmät: suhteellinen kustannus tekninen arvo Tarkkuus paranee arvostelun edistyessä	Mitä tämä maksaa?
5. Suunnittelu	Kehitetään ja testataan parhaat ideat. Valitaan paras idea!	Konstruointi (+ prototyypikoe) Tulosehdotus Toteutussuunnitelma	Kuka päättää? Miten toteutetaan?
Päätös ehdotuksen toteuttamisesta			
6. Toteutus	Toteutuksen edistäminen Tuloksen varmistaminen Tiedon ja kokemusten tallentaminen.	Raivaa informaatioesteet Säästä rahaa Lopeta, jos ei kannata jatkaa Työ on mennyt hukkaan, jos kannattavaa ehdotusta ei toteuteta	Kuka voi vaikuttaa ja edistää asiaa?
7. Valvonta	Projektin yhteenvedo: säästöt	Käytä tiedot ja kokemukset hyväksi (kustannus- ja arvostelustandardit)	Kuka tarvitsee tietojasi?

Arvoanalyysissä toiminto määritellään tuotteen ominaisuutena tai ominaisuuksien yhdistelmänä, joka tekee sen käyttökelpoiseksi tai hyödylliseksi. Toimintojen selvittäminen tapahtuu vastaamalla kysymykseen "Mitä se tekee?". Kysymykseen halutaan vastaukset kahdella sanalla, verbillä ja substantiivilla. Tämä kahden sanan rajoitus saattaa tuntua altaalta ja teoreettiselta. Jos kuitenkin halutaan saada selville ja erottaa toisistaan kaikki kohteen toiminnot, tulee ne kuvata mahdollisimman yksinkertaisesti, pelkistetysti ja ytimekkäästi. Toiminnot jaetaan perustoimintoihin ja sivutoimintoihin siten, että perus- eli päätoiminto on se oleellinen asia, miksi esine on olemassa. Sivutoimintoja ovat kaikki muut toiminnot, jotka antavat kohteelle lisäpiirteitä ja parantavat mahdollisesti sen käyttökelpoisuutta tms. Sivutoiminto tukee perustoimintoa olematta kuitenkaan täysin välttämätön perustoiminnon toteutukselle; esim. sähkölampun perustoiminnon "tuottaa valoa" eräs sivutoiminto on "kestää värinää".

Perus- ja sivutoiminnot voidaan jakaa edelleen osatoiminnoiksi; jotka ovat välttämättömiä ko. perus- tai sivutoiminnolle ja sen toteuttamiselle. Kohteen toiminnoista voidaan tarvittaessa muodostaa ns. toimintopuu, jossa perus- ja sivutoiminnot jakautuvat yhä yksityiskohtaisemmiksi osatoiminnoiksi. Toimintopuu noudattelee tuotteen rakennepuuta, jossa tuote muodostuu toiminnallisista kokonaisuuksista, jotka taas vuorostaan saattavat koostua pienemmistä toiminnallisista kokonaisuuksista. Monimutkaisella tuotteella voi näitä toiminnallisten kokonaisuuksien tasoja olla useampikin. Rakennepuun alimmalla tasolla ovat komponentit, joita ei enää voida jakaa osiin. Tuotteen toimintopuussa ylemmän tason perustoiminto muodostuu alempien tasojen osatoiminnoista, jotka samalla ovat vastaavan toiminnallisen kokonaisuuden perustoimintoja. Monet toiminnot vaativat lisätäsmennyksiä tullakseen tarkasti määritellyiksi. Nämä lisätäsmennykset ovat useimmiten joitakin lukuarvoja, normeja tai mittoja, jotka toiminnon tulisi täyttää, ts. toimintorajat.

Perustavien informaatio- ja analyysi -vaiheiden yhteydessä on saatu tarkemmin eritellyiksi tarkemman analyysin kohteiksi tulevat toiminnot ja tarvittaessa niiden osatoiminnot. Edelleen on selvitetty onko tavoitteena kustannusten minimointi vai toimintojen kehittäminen vai molemmat. Ideoinnin, joka on arvoanalyysin tärkein, luovavaihe, lähtökohdaksi otetaan tavallisesti kohteen perustoiminto, ja asetetaan kysymys: "Millä eri tavoilla tämä toiminto voidaan toteuttaa?" Ideointivaiheen tavoitteena on saada aikaan mahdollisimman paljon ideoita ilman että kritiikki haittaa niiden tuotantoa. Tavallisimmin ideointi suoritetaan "aivo-riiheksi" kutsutun luovan työn tekniikan avulla. Joskus on aiheellista ottaa avuksi myös muita ideointitekniikoita. Erikoisesti on syytä tuoda julki ja kiinnittää huomiota myös mahdollisuuksiin ja hassuihin ideoihin, sillä ne saattavat olla juuri se kipinä, joka sitten laukaisee lopullisen hyvän idean.

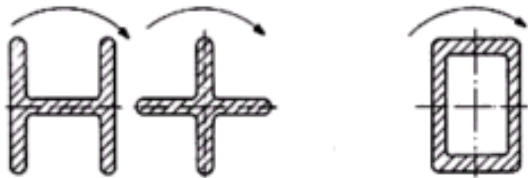
Arvosteluvaiheessa selvitetään tuotettujen ideoiden käyttökelpoisuus. Lähtökohdaksi on, että kaikki ideat voivat olla käyttökelpoisia. Perinteinen arvostelumenettely perustuu puhtaasti päättelyyn seuraavasti: Täsmennä ja havainnollista tarvittaessa ideoita. Arvioi summittaisesti kutakin ideaa vastaavat kustannukset. Valitse kustannuksiltaan halvin idea ja luetteloi sen hyvät puolet ja heikkoudet. Käy tällä tavalla läpi tarpeellinen määrä ideoita. Määrittele kustannukset, sekä edut ja haitat huomioonottaen ideoiden arvo ja valitse parhaita arvoja edustavat ideat edelleen kehitettäväksi.

Useammasta osasta koostuvan tuotteen arvoanalyysissä on tavallisesti tarpeen suorittaa ns. toiminto-kustannus-analyysi, jossa tuotteen kustannukset jaetaan toiminnoille, ja saadaan hyvä vertailupohja toiminnot suorittavien komponenttien valinnalle.

Normaalisti kysymykseen tulevat perusmuotoilumenetelmät ovat valaminen, takominen ja hitsaamalla kokoaminen. Mitä näistä käytetään, ratkeaa jo koneenosan suunnitteluun liittyvän materiaalinvalinnan ja toimintotarkastelun yhteydessä. Valamisen suurin etu on muotoilun vapaus, joka mahdollistaa mm. onttojen kappaleiden valmistamisen edullisesti,

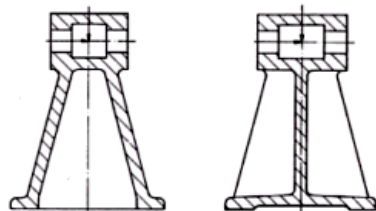
sekä ylipäättään kappaleen muodon optimoinnin siten, että se on lujuusopillisesti mahdollisimman tarkoituksenmukainen. Tässä optimoinnissa käytetään enenevässä määrin hyväksi tietotekniikkaa. Valamisen eduista tärkeimpiä on myös sen soveltuvuus metallille kuin metallille. Silloin kun menetelmät ovat vaihtoehtoisia, on niillä omat, valmistettavien kappaleiden määrästä riippuvat edullisuusalueensa. Hitsaamalla kokoaminen on kustannuksellisesti edullista yleensä silloin, kun kappaleen valmistusmäärä on niin pieni, ettei valumallin valmistus ole taloudellisesti mielekäästä. Takominen (lähinnä muottiintakominen) tulee kysymykseen hyvin suurilla kappalemäärillä. Menetelmän valintaan vaikuttaa oleellisesti myös kappaleen koko ja rakenteen monimutkaisuus. Joskus saatetaan menetelmiä yhdistämällä päästä parhaaseen lopputulokseen. Valettuja komponentteja voidaan esimerkiksi liittää hitsaamalla toisiinsa.

Koneenosan suunnittelussa on oleellisen tärkeätä ottaa huomioon kuormitustapa, joka osaan kohdistuu. Lujuuden ja jäykkyyden kannalta ovat taivuttava, vääntävä tai nurjahduttava kuormitus kriittisiä. Sen sijaan puhdas veto tai puristus on harvemmin ratkaiseva. Asiaa voidaan havainnollistaa vaikkapa viivoittimen avulla. Litteänä kappaleena se taipuu, vääntyy tai nurjahtaa hyvin pienellä voimalla. Sen sijaan sen venyttäminen tai katkaiseminen vetämällä vaatii varsin suuren voiman!



Kuva 1. Väännön alaisen rakenteen jäykistäminen onteloprofiililla.

Kuormitustavan huomioonottaminen on välttämätöntä, kun pyritään tekemään kappale kevyeksi. Silloin kun koneen osaan kohdistuu vääntörasitus, päästään edulliseen jäykkyyssuhteeseen (ja myös lujuus-paino-suhteeseen) suljetulla onteloprofiililla, jossa poikkipinnan vääntöjäyhyysmomentti suhteessa poikkileikkauspintaan on mahdollisimman suuri. Ellei vääntökuormitus ole määräävä, ei onteloprofiililla saavuteta oleellista etua, vaan on syytä käyttää pienemmin kustannuksin toteutettavaa avointa rakennetta. Jos osaan kohdistuu taivutuskuormitus, päästään parhaaseen jäykkyyssuhteeseen silloin kun poikkipinnan taivutusjäyhyysmomentti suhteessa poikkileikkauspintaan on mahdollisimman suuri, esimerkiksi I-profiililla. Myös nurjahduskuormituksen kannalta on taivutusjäyhyysmomentti ratkaiseva.



Kuva 2. Kun rakenteeseen ei kohdistu vääntörasitusta, ei ole mielekäästä käyttää suljettua kotelorakennetta, joka on avointa rakennetta kalliimpi.

Jos rakenteen keveys on niin tärkeä, että se kompensoi kalliimmasta materiaalista johtuvan kustannuseron, kannattaa rauta- ja teräsrakenteiden vaihtoehtona harkita sopivaa kevytmetalliseosta. Esimerkiksi alumiiniseoksilla päästään joissakin tapauksissa puolta kevyempään rakenteeseen kuin saman jäykkyyden omaavalla teräsrakenteella. Suunnittelijoiden ja materiaalispecialistien usein jäykkyytstarkasteluissa käyttämä ns. ominaisjäykkyys eli kimmokerroin

jaettuna aineen tiheydellä soveltuu sellaisenaan lähinnä vain vetokuormitustapauksiin ja johtaa materiaalinvalinnassa yleensä harhateille.

Paitsi erilaisten profiilien ja kuormitustavan keskinäisen vuorovaikutuksen, jota edellä lyhyesti käsiteltiin, joutuu suunnittelija ottamaan huomioon myös kuormitetun koneenosan poikkileikkauksessa esiintyvien epäjatkuvuuskohtien, kuten erilaisten lovien vaikutukset. Ei riitä että lasketaan nimellisjännitykset, vaan ko. lovilla on taipumus aiheuttaa jännityshuipuja, joiden vaikutus etenkin toistuvassa, väsyttävässä kuormituksessa on usein arvaamattoman suuri.

Niiden vaikutuksesta on väsytyksen alaisten koneenosien sallittu mitoitusjännitys huomattavasti pienempi kuin kyseiselle materiaalille määritetty väsymislujuus. Noin 90% kaikista käytännössä esiintyvistä koneenosien rikkoutumisista on väsymisperäisiä. Suunnittelija ottaa loven vaikutuksen huomioon ns. lovenvaikutusluvulla, K_t , joka voidaan määrittää väsymiskokeiden avulla, ja jonka suuruus on

$$K_t = \text{sileän koesauvan väsymislujuus} / \text{lovetun koesauvan väsymislujuus}$$

Jos tunnetaan loven muotoluku, K_t , ja materiaalin loviherkkyysluku, q (käsikirjatietoa), voidaan lovenvaikutusluku myös laskea kaavasta

$$K_t = q(K_t - 1) + 1,$$

jolla siis laskettu nimellisjännitys on kerrottava, kun halutaan tietää tunnetun loven aiheuttaman jännityshuipun suuruus.

Valintojen tekeminen

Kaikessa kehitystoiminnassa on osoitettavissa seuraavat tyypilliset vaiheet:

- Tehtävän määrittely
- Tavoitteiden asettaminen
- Vaihtoehtojen osoittaminen tai kehittäminen
- Parhaan vaihtoehdon valinta, ja päätös sen toteuttamisesta
- Toteuttaminen.

Valintojen tekeminen kuuluu siis oleellisena vaiheena kaikkeen kehitystoimintaan. Myös koneenosien kehittämisessä joudutaan tekemään valintoja, jotka koskevat koneenosan toimintaperiaatteita, rakennetta, materiaaleja, valmistusmenetelmiä jne. Valintojen tekemisessä on ongelmana, että erittäin harvoin valinta voidaan tehdä vain yhden valintakriteerin perusteella. Kriteerejä on tavallisesti useita, toinen toistaan tärkeämpiä! Tällöin on käytettävä tilanteeseen sopivaa valintamenetelmää, jos ei haluta jättää päätöksentekoa täysin intuition varaan.

Menetelmissä otetaan yleensä kantaa kriteerien tärkeysjärjestykseen, ja valinta suoritetaan sen mukaan, mikä vaihtoehto parhaiten täyttää asetettujen tavoitteiden mukaiset kriteerit. Voidaan tietenkin väittää, että yhdelläkin valintakriteerillä, kuten esimerkiksi edellä käsitelty koneenosan "arvo", päästään hyvään tulokseen. Se onkin varsin hyvä valintaperuste, mutta arvo on kooste monista vaikuttajista. Arvon arvioimiseksi ja laskemiseksi onkin jo jouduttu priorisoimaan ja ottamaan huomioon hyvin monta alakriteeriä.

Materiaalin valinta liittyy oleellisena osana siihen tuotesuunnittelun vaiheeseen, jossa selvitetään miten kukin osa toteutettavassa tuotteessa taloudellisesti valmistetaan. Suunnittelija selvittää valmistettavan osan materiaalille asetettavat vaatimukset ja etsii sopivimman materiaalin. Osan materiaalille asetettavista vaatimuksista voidaan käyttää nimitystä vaatimusprofiili, ja materiaalin ominaisuuksista vastaavasti ominaisuusprofiili.

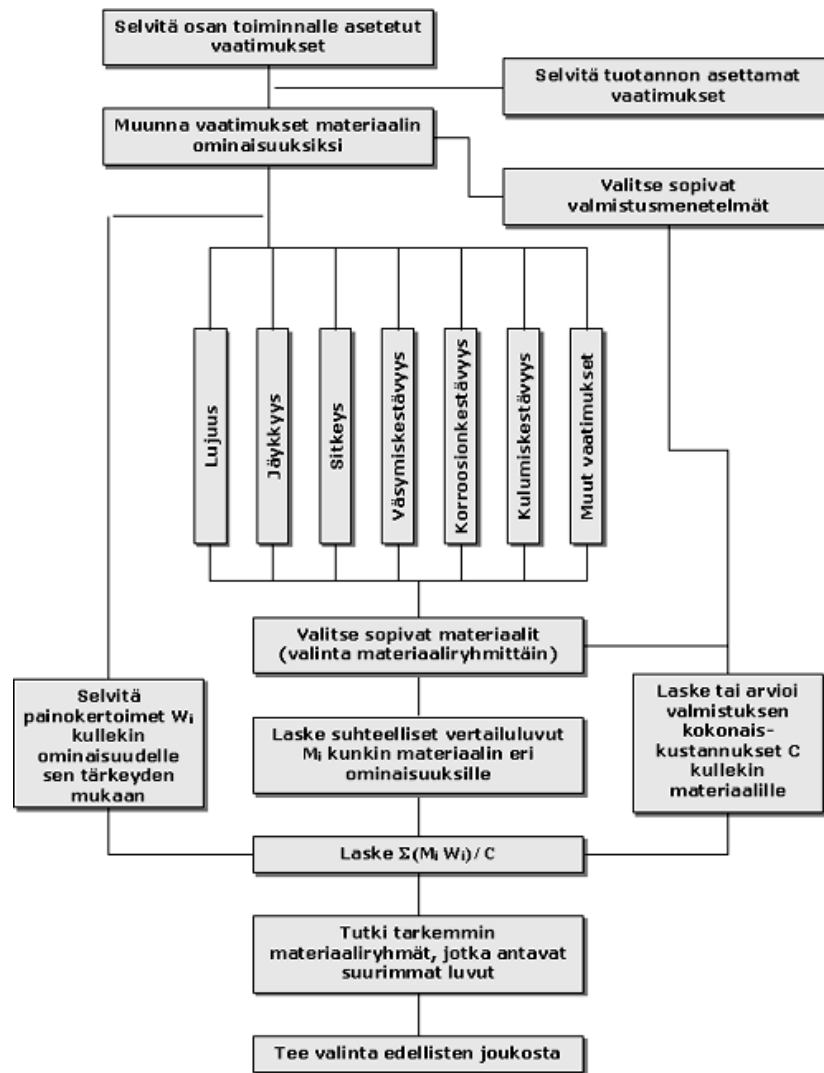
Suoraviivainen eteneminen materiaalinvalinnassa on mahdollista vain harvoin. Materiaalille asetettavat vaatimukset tarkentuvat työn edetessä, ja ne voivat lisääntyä ja muuttua. Valmistus aiheuttaa omat vaatimuksensa materiaalille ja materiaali valmistukselle. Vaatimusprofiilin ja ominaisuusprofiilin vuoroittainen tarkistaminen voi vaatia useita iteraatiokierroksia ennen kuin ne saadaan lopulliseen muotoonsa. Arvoanalyysi on todettu tehokkaaksi apuvälineeksi myös materiaalinvalintaongelmien käsittelyssä. Tällöin vaatimus- ja ominaisuusprofiilit voidaan jakaa helposti käsiteltäviin pieniin osiin ja eri tekijät voidaan ottaa huomioon niiden tärkeyden mukaisella painolla. Lopullinen vertailu tehdään numeroarvojen välillä, ja numeroissa ovat mukana myös kustannukset. Kuvan 8 mukainen materiaalinvalinnan kulkukaavio sisältää arvoanalyysiin pohjautuvan materiaalien numeerisen vertailun. Materiaalinvalinnassa käytettävä menetelmä, tähän tehtävään panostettava työmäärä ja yleensä suunnittelutyön painopisteet määräytyvät tuotteen vaatimustasosta, sarjasuuruudesta ja ratkaisun kustannusvaikutuksista.

Myös valmistusmenetelmän valinnassa voidaan käyttää valintamenetelmiä, jotka muistuttavat arvoanalyysiä, esimerkiksi ns. päätösanalyysitekniikkaa. Valintatilanteessa asetetaan tietyt vaatimukset, jotka valmistusmenetelmän tulee täyttää. Nämä vaatimukset voidaan painottaa aivan kuten arvoanalyysin toiminnotkin. Kustannukset ovat myös yhtenä vertailuperusteena, eikä sisällytettynä mihinkään muuhun vertailuperusteeseen, kuten arvoanalyysissä. Kun vertailuperusteet on painotettu, voidaan eri vaihtoehtojen hyvyttä vertailla aivan samoin kuin arvoanalyysissäkin.

Valmistusmenetelmät eroavat periaatteessa varsin paljon toisistaan, niin että materiaali, kappaleen koko, muoto ja valmistusmäärä jo sanelevat useimmiten pitkälle, mikä valmistusmenetelmä missäkin tapauksessa tulee kysymykseen. Asiaan vaikuttavat usein myös sellaiset seikat kuin alihankkijan sijainti, toimitusvarmuus, toimitusajat. Mikäli päätösanalyysiä käytetään valinnassa, voidaan myös nämä seikat käsitellä ja painottaa vertailuperusteena.

Taulukko 2. Materiaaliominaisuuksien asettamien vaatimusten tekijöitä

VAATIMUKSIA ASETTAVAT TEKIJÄT	MATERIAALIOMINAISUUKSIA
Toiminnat	
Muodon säilyttäminen	Kovuus, kulumiskestävyys, tiheys, lämpölaajenemiskerroin, kimmo-moduuli
Kuorman kantokyky: - jännitys - jännityskeskittymät - vaihteleva kuormitus - iskumaiset kuormitukset - kuluminen	Kimmo- ja liukumoduuli Murtoraja ja väsymislujuus Stikeys, loiherkkyys ja haurastumistaipumus Väsymislujuus, loven vaikutusluku, kestävyys termistä väsymistä vastaan Haurasmurtumistaipumus, iskusitikeys, transitilämpötila Kulumiskestävyys, kovuus, kittekerroin
Voiman siirtäminen	Kovuus, kulumiskestävyys, tiheys, lämpölaajenemiskerroin, kimmo-moduuli
Energian varastointi - plastinen - elastinen - kineettinen	Murtolujuuden ja murtorajan suhde, murtokurouma, murtovenymä, iskusitikeys Joustotyö Kittekerroin, kestävyys lämpötilan vaihtelua vastaan
Kemialliset tekijät	Korroosionkestävyys
Säteilytekijät	Vanhenehtumistaipumus, optiset ominaisuudet
Sähköiset ja magneettiset tekijät	Sähkönjohtavuus, magn. permeabiliteetti ym.
Valmistettavuus	muutamia esimerkkejä) Valettavuus: sulamispiste, jäähdyttämiskäky, juoksevuus, lämpökapasiteetti, sulamislämpöjre. Kylmänmuovattavuus: mukkauslujittumiskyky (tasavenymä), anisotropisuus (r-arvo), rajamuovattavuuspiirros. Lastuttavuus: teknologisten kokeiden tulokset
Kustannukset	Kilohinta, valmistus-, lämpökäsittely- ja viimeistelykustannukset

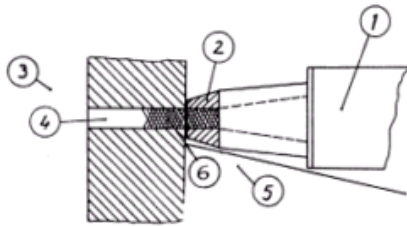


Kuva 3. Materiaalinvalinnan kulkukaavio

Arvoanalyysi CASE: Sähkötykin suokappaleen rakentäminen

Esimerkkinä arvoanalyysiajatteluun perustuvasta materiaalinvalinnasta esitellään suokappale, jollaista käytetään Rautaruukki Oy, Raahen Rautatehtaalla. Suokappale on osana hydraulisesti toimivassa sähkötykissä, joka painaa massaa masuunin raakarautareikään ja estää näin sulan pääsyn ulos. Toimintaperiaate selviää kuvasta 9. Reikä tukitaan 12 kertaa vuorokaudessa. Suokappaleen on asetettava tiiviisti masuuniseinää vasten tai muuten sula valuu seinän ja sen välistä, eikä raakarautareian tukkiminen onnistu.

Toiminnalliset vaatimukset



Kuva 4. Sähkötykin toimintaperiaate: 1) sähkötykki 2) suukappale 3) masuuni 4) rautareikä 5) laskukouru ja 6) massa, jolla reikä tukitaan.

Suuret lämpötilavaihtelut: Tykin lähestyessä rautareikää sen kärki on 3 - 5 s raakarautasuihkussa, jonka lämpötila on 1400 - 1500 astetta. 20 - 30 s kestävästä täytön aikana lämpötila on n. 1000 astetta. Täyttöjen välisen ajan tykki on masuunihallin lämpötilassa.

Kuluminen: Kuuma raakarautasuihku kuluttaa etenkin suukappaleen alareunaa.

Toiminnot

Suukappaleen perus- eli päätoiminto on selvästikin johtaa massaa. Sivutoimintoja ovat ainakin:

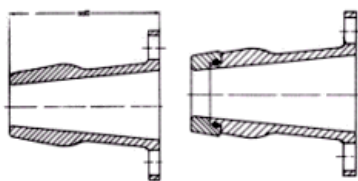
- kestää lämpörasituksen (parivertailua varten käytetään seuraavassa lyhennystä KL) (osatoimintoina mm. kestää lämpötilan ja kestää lämpöiskuja)
- säilyttää mittansa (SM)
- kestää kulumista (KK)
- sallii vaihdon (SV)
- johtaa lämpöä (JL)

Valmistusmenetelmän valinta

Alun perin tykin kärki oli yksiosainen valukappale, jonka materiaali oli valuteräs G-26-52 SFS 357. Kärjen massa oli 112kg. Valaminen todettiin jatkossakin parhaaksi valmistusmenetelmäksi.

Materiaalin valinta

Ym. valuteräksen käyttö tuli kalliiksi, koska suukappaleen alareuna kesti tiiviinä keskimäärin kolme vuorokautta, minkä jälkeen se oli korjattava täytehitsaamalla. Täytehitsauksen materiaali- ja työkustannukset olivat suuret. Kärjen suuresta massasta johtuen se oli myös hankala vaihtaa. Em syistä päätettiin etsiä vaihtoehtoisia materiaaleja. Samalla päätettiin selvittää, mitä vaikuttaisi sellainen rakennemuutos, joka mahdollistaisi irrallisen, vaihdettavan suukappaleen kärkiosan käytön.



Kuva 5. Vasemmalla suukappaleen yksiosainen rakenne, oikealla kaksiosainen.

Kaksiosaisen version laippaosan materiaalina päätettiin säilyttää G-26-52 SFS 357, jonka massa on 87 kg. Kärjen materiaaleina päätettiin kokeilla alkuperäisen teräksen ohella tulenkestävää terästä G-X40CrNiSi 25 20 DIN 17465 ja suomugrafiittirautaa GRS 250.

Edellä esitetyn mukaan materiaali-/rakenne-vaihtoehdoiksi saatiin:

- yksiosainen valettu materiaali G-26-52,
- kaksiosainen valettu rakenne, kärkiosa G-X40CrNiSi 25 20, massa 40kg,
- kaksiosainen valettu rakenne, kärkiosa GRS 250, massa 21kg, ja lisäksi
- suojaholkilla ympäröity yksiosainen rakenne, materiaali G-26-52, massa yli 112kg.

Toimintojen painottaminen

Taulukko 3. Toimintojen painottaminen

-	KL	JL	SM	KK	SV	painoluku
KL	KL	KL	KL	KL	KL	9
JL	KL	JL	JL	JL	JL	7
SM	KL	JL	SM	KK	SV	1
KK	KL	JL	KK	KK	KK	5
SV	KL	JL	SV	KK	SV	3
yht.						25

Kappaleen perustoiminto on johtaa massaa - tätä edellytetään kaikilta vaihtoehdoilta, joten se voidaan jättää tarkastelun ulkopuolelle. Sen sijaan eri sivutoimintojen keskinäiset painoarvot on määritettävä. Se voidaan suorittaa kätevästi parivertailua käyttäen. Siinä jokaista sivutoimintoa verrataan vuorollaan jokaiseen muuhun, jolloin sivutoiminto on sitä tärkeämpi mitä useammin se vertailussa "voittaa". Parivertailu on tietenkin aina subjektiivinen, ja sen tekemiseen pitäisi osallistua useamman, yrityksessä asiaa tuntevan henkilön. Saadut painoluvut ovat myös enemmän tai vähemmän kvalitatiivisia. Jo sekin vaikuttaa painolukuihin, miten suhtaudutaan vertailumatriisissa toiminnon vertaamisessa itseensä. Yllä suoritettussa vertailussa on jokainen toiminto saanut yhden lisäpisteen, kun sitä on verrattu itseensä. Aivan yhtä perusteltua olisi jättää lisäpiste antamatta, jolloin saataisiin hieman jyrkempi vertailuasteikko.

Vaihtoehtojen paremmuusjärjestys sivutoimintojen osalta

Seuraavassa on annettu arvosana 0...5 kullekin vaihtoehdolle.

a) Kestää lämpörasituksen (KL), voidaan määrittää rakenteen kestoikäkokeiden perusteella

- a. 3d* -> arvosana: 1
- b. 4d -> arvosana: 2
- c. 8d -> arvosana: 4
- d. 3d (suojaholkin arvioitu kesto) -> arvosana: 1

* d=vuorokausi

b) Johtaa lämpöä (JL), materiaalin lämmönjohtavuuden perusteella

- a. 42-59 W/Km -> arvosana: 3
- b. 15 W/Km -> arvosana: 1
- c. 45-55 W/Km -> arvosana: 4
- d. 42-59 W/Km -> arvosana: 3

c) Säilyttää mittansa (SM), materiaalin lämpöpitenemisen perusteella

- a. $12 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ -> arvosana: 3
- b. $17-19,5 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ -> arvosana: 1
- c. $10-11 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ -> arvosana: 4
- d. $12 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ -> arvosana: 3

d) Kestää kulumista (KK), materiaalin kovuuden perusteella (kovuus vain yksi vaikuttaja, ei aina edes tärkein!)

- a. min. 150 HB -> arvosana: 2
- b. 150-220 HB -> arvosana: 3
- c. 160 HB -> arvosana: 2
- d. min. 150 HB -> arvosana: 2

e) Sallii vaihdon (SV), kappaleen vaihdon ja korjauksen perusteella

- a. korjaushitsattava -> arvosana: 2
- b. korjaushitsattava -> arvosana: 2
- c. helposti vaihdettava -> arvosana: 4
- d. hankalasti vaihdettava -> arvosana: 1

Toimintojen painoarvolla painotettu vaihtoehtojen vertailu

Seuraavassa yhteenvetotaulukko (painoluku x arvosana) vaihtoehdoille

-	a)	b)	c)	d)
KL	9	18	36	9
JL	21	7	28	21
SM	3	1	4	3
KK	10	15	10	10
SV	10	15	10	10
yht.	49	47	90	46

Arvon laskeminen

Kun edellä lasketut toimintojen täyttämisen "hyvyyttä" kuvaavat suhdeluvut jaetaan arvioituilla suhteellisilla kustannuksilla:

a)	b)	c)	d)
100	100	14	80

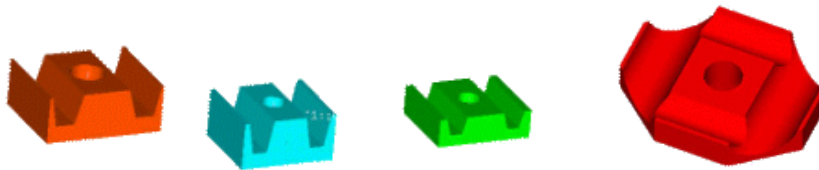
eri vaihtoehtojen arvoiksi saadaan:

a)	b)	c)	d)
0.49	0.47	6.4	0.57

Ylivoimaisesti parhaaksi vaihtoehdoksi saadaan siten kaksiosainen rakenne, jossa on suomu-grafiittiraudasta valettu kärkikappale.

Esimerkkejä

Esimerkki 1: Teräsköyden kiinnitin



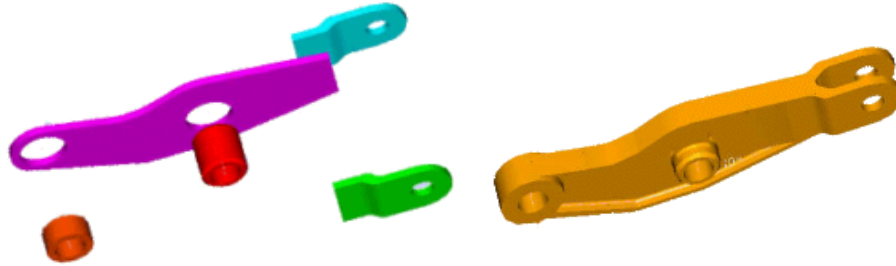
Kuva 6. Aikaisempi konstruktio vasemmalla ja paranneltu oikealla

Aikaisemmin kiinnittimiä tehtiin kolmea eri kokoa halkaisijaltaan erikokoisille teräsköydsille. Profiili jyrssiin rakenneteräksestä ja katkaistiin sopivan pituiseksi. Palan nurkat viistettiin ja kappale sähkösinkittiin.

Nykyinen valmistusmenetelmä on yksi tarkkuusvalettu kappale, jolla korvattiin kolme vanhaa rakennetta. Materiaalina käytetään ruostumatonta terästä. Kiinnitin lämpökäsitellään rakenteen tasaisuuden takaamiseksi.

Edut: Kustannukset pysyivät ennallaan, mutta varastonimikemäärä saatiin pienemmäksi ja laatu paremmaksi.

Esimerkki 2: Haarukkavipu



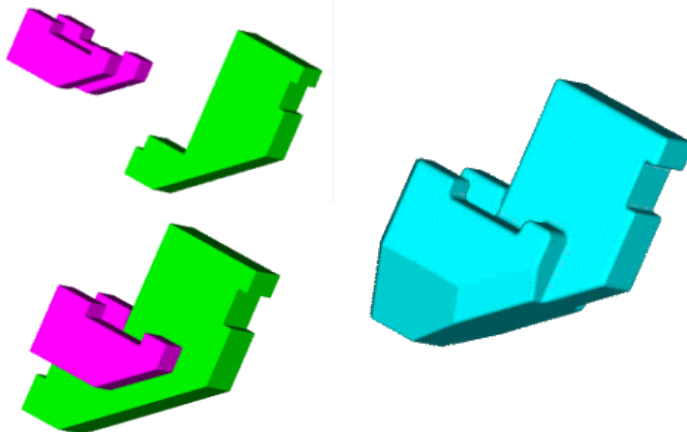
Kuva 7. Aikaisempi konstruktio vasemmalla ja paranneltu oikealla

Haarukkavipu valmistettiin aikaisemmin viidestä eri osasta hitsaamalla. Siinä oli yhteensä 15 eri työvaihetta.

Nykyisessä valmistusmenetelmässä valuaihiossa on käytetty ADI- raudan hyvät laakeriomi-naisuudet hyväksi ja koneistus suoritetaan yhdellä kiinnityksellä.

Edut: Kustannukset n. 75% entisistä.

Esimerkki 3: Murskainpää



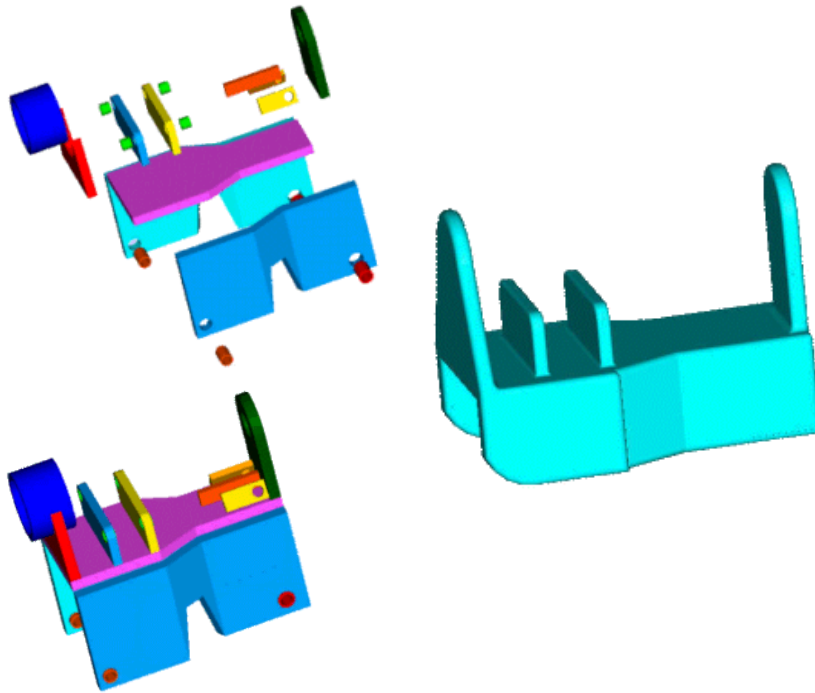
Kuva 8. Aikaisempi konstruktio vasemmalla ja paranneltu oikealla

Murskainpää valmistettiin aikaisemmin kahdesta taotusta osasta.

Nykyinen valmistusmenetelmä on yksi valettu kappale.

Edut: Kustannukset n. 25% entisistä.

Esimerkki 4: Laakerijalusta



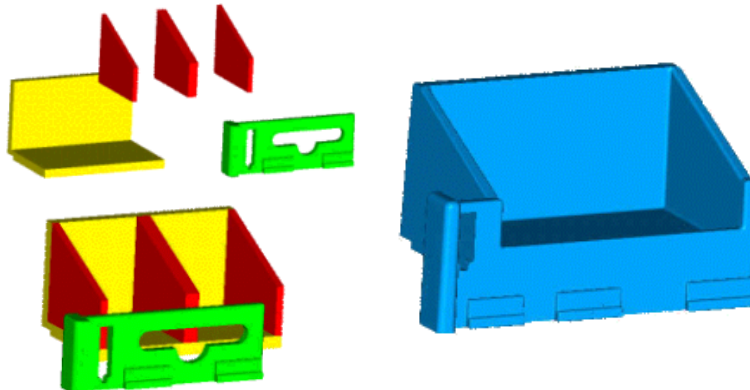
Kuva 9. Aikaisempi konstruktio vasemmalla ja paranneltu oikealla

Laakerijalusta valmistettiin aikaisemmin 27 hitsatusta osasta.

Nykyinen valmistusmenetelmä on yksi valettu kappale.

Edut: Kustannukset alle 60% entisistä, kauniimpi muoto.

Esimerkki 5: Suojakotelo



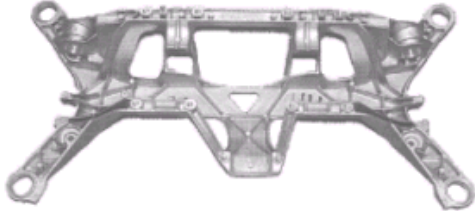
Kuva 10. Aikaisempi konstruktio vasemmalla ja paranneltu oikealla

Suojakotelo valmistettiin aikaisemmin taotusta kappaleesta ja hitsatuista levyistä.

Nykyinen valmistusmenetelmä on yksi valettu kappale.

Edut: paino putosi 318g:sta 238g:aan, työvaiheet vähenivät 10:stä yhteen, kustannukset n. 17% entisistä.

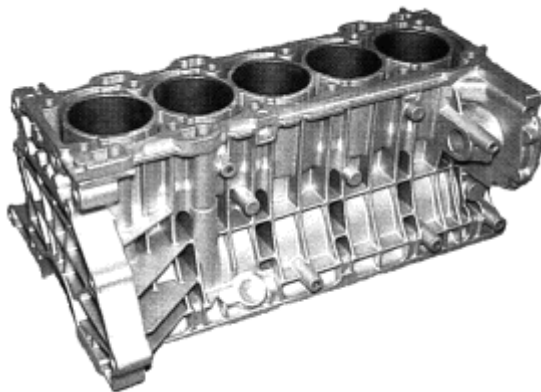
Esimerkki 6: Taka- akseliston runkopalkki



Kuva 11. Henkilöauton taka- akselin runkopalkki

Kuvassa on esitelty henkilöauton valamalla valmistettu taka-akseliston runkopalkki. Aiemmin vastaava komponentti koottiin hitsaamalla toisiinsa 19 levyteräsosaa. Vanha versio painoi 20 kg, uusi palkki painaa vain 12 kg. Alumiiniseoksesta valettu palkki ei myöskään tarvitse korroosionestokäsittelyä.

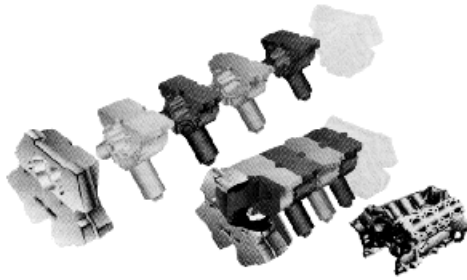
Esimerkki 7: Polttomoottori



Kuva 12. Painevalettu alumiininen sylinteriryhmä

Nyky aikaisten polttomoottorien pääkomponenteissa on lukuisia valuosia. Tyypillisimpiä ovat alumiiniset tai suomugrafiittivalurautaiset sylinteriryhmät (l. -blokit), sylinterinkannet ja männät, valurautaiset sylinterinholkit ja nokka-akselit sekä alumiiniset tai valurautaiset koteloinnit jne. Kuvassa on esitetty polttomoottorin sylinteriryhmä, joka on valmistettu alumiiniseoksesta painevaluna. Sylinterinholkit on valettu kappaleeseen kiinni liitosvaluna.

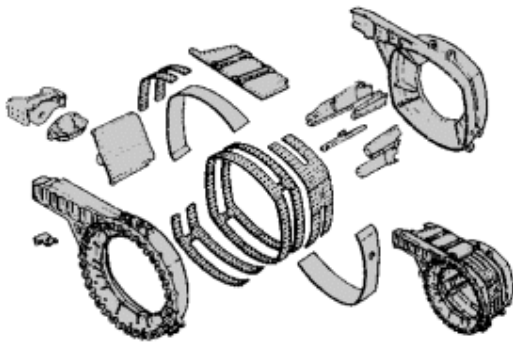
Esimerkki 8: Sylinteriryhmä



Kuva 13. Scanian suomugrafiittirautainen V8-dieselmoottorin sylinterilohko ja sen keernaryhmä.

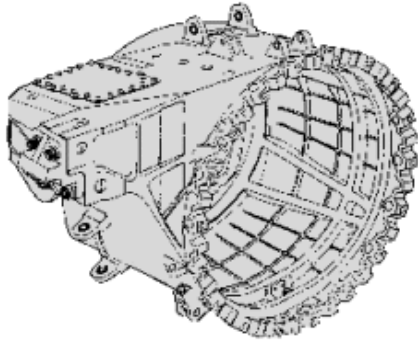
Kuva esittää suomugrafiittivaluraudasta hiekkavalettua Scanian dieselmoottorin sylinteriryhmää ja osaa sen valussa käytetyistä keernoista. Kuusi erillistä keernaa (ylimmässä kuvasarjassa) yhdistetään yhdeksi keernapaketiksi avainkeernalla (Key-Core-Method). Avainkeerna ammutaan muiden keernojen sisään. Tällä modernilla tekniikalla on saavutettu tarkat valutoleranssit ja pieni hylkäämisprosentti. Lisäksi keernojen liimaus on tullut tarpeettomaksi, peitostustarve on vähentynyt ja sylinteriryhmän paino on pudonnut parantuneen toleranssiasteen ansiosta. Kappale on muodoltaan siinä määrin monimutkainen, että muilla valmistusmenetelmillä tuottaminen olisi ollut vaikeaa ja kallista.

Esimerkki 9: Tarkkuusvalukomponentit



Kuva 14. Rootorikoneiston vaihdekotelo valmistettuna titaaniseoksesta taotuisista ja muokatuista osista

Tarkkuusvalukomponentein korvataan yleensä helposti useita eri menetelmin vaikeasti valmistettavia ja liitettäviä osia, mistä on esitetty hyvä esimerkkitapaus seuraavassa kuvassa. Siinä pystysuoraan nousevan lentokoneen rootorikoneiston kymmenistä pääkomponenteista ja sadoista liitinosista koostuva vaihdekotelo on valmistettu titaanista yhtenä ainoana tarkkuusvaluosana.



Kuva 15. Roottorikoneiston vaihdekotelo valmistettuna yksiosaisena tarkkuusvaluna

Esimerkki 10: Eri kokoisia valukappaleita

Komponentin koko ei aseta tiukkoja rajoituksia valamiselle. Seuraavissa kuvissa on esitetty kaksi ääriesimerkkiä. Ensimmäisen kuvan sormus on valmistettu tarkkuusvaluna kolmiulotteisen tietokonemallin pohjalta Rapid Prototyping -tulostetun polymeerimallin avulla (Model-Maker II / Sanders Prototype Inc.). Korun paino on vain muutamia grammoja. Jälkimmäisen kuvan hiekkavalettu keskinopean dieselmoottorin pallografiittivalurautainen V-18 sylinterinlohko painaa 87 tonnia. Molemmat kappaleet sisältävät vaikeita muotoja. Muiden valmistusmenetelmien hyödyntäminen on paitsi vaikeaa ja aikaavievää myös muotoilun vapautta rajoittavaa.

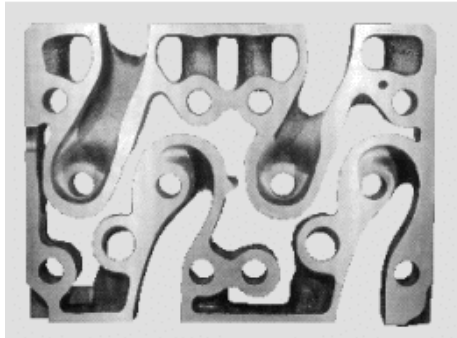


Kuva 16. Pikamalli (vas.) ja sen avulla tarkkuusvalettu sormuksen runko (oik.) sekä valmis sormus kivineen (alin kpl).



Kuva 17. Keskinopean dieselmoottorin 87 tonnia painava pallografiittivalurautainen V-18 sylinteriblokki.

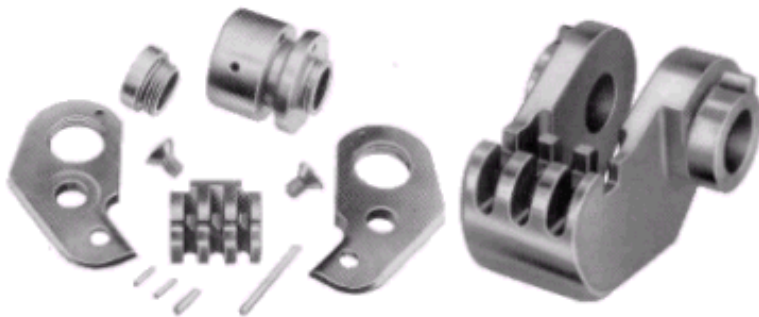
Esimerkki 11: Sylinterikansi



Kuva 18. "Viipale" kuorma-auton dieselmoottorin sylinterinkannesta. Jäähdytysvesivaipan sekä imu- ja pakokanavien monimutkainen muoto tuotetaan hiekkakeernojen avulla.

Kuva esittää "viipaleita" kuorma-auton dieselmoottorin sylinterinkannesta. Kuvasta näkyy sylinterinkannen jäähdytysvesivaipan ja kanavistojen vaikea muoto. Tällaisen suljetun sisäisen onkalon valmistus muilla menetelmin yksiosaisena komponenttina on lähimain mahdotonta.

Esimerkki 12: Pakkauskoneen komponentti



Kuva 19. Pakkauskoneen komponentti, jossa 11 työstettyä osaa on korvattu yhdellä tarkkuusvaluosalla.

Esimerkin kuva esittää pakkauskoneen komponenttia, jossa 11 työstettyä osaa on korvattu yhdellä tarkkuusvaluosalla, millä valmistuskustannuksia onnistuttiin laskemaan yli 70 %.

Esimerkki 13: Takapyörän ripustus



Kuva 20. Kolmesta tempervaluosasta ja kahdesta teräslevyosasta valmistettu henkilöauton takapyörän ripustus.

Suomu- ja tempervalujen käyttö on ajan myötä voimakkaasti vähentynyt pallografiittivaluraudan käyttösuuden kasvaessa. Molemmilla on kuitenkin edelleen paikkansa myös nykyaikaisissa valukomponenteissa. Suomugrafiittivaluraudasta valmistetaan ja tullaan vielä pitkään valmistamaan paitsi vaatimustasoltaan vähäisempiä perusvaluja myös mm. esimerkiksi paperikoneen teloja sekä raskaasti termisesti- ja mekaanisesti kuormitettuja moottorikomponentteja, jne. Tempervalujen (so. valkoydintempervalujen) eräs etu on hyvä hitsattavuus. Niinpä niiden tietyt liitettävyyteen perustuvat erikoissovellukset kuten allaolevassa kuvassa ovat myös säilyneet.

Esimerkki 14: Kevytmetallivalut

Kuvien kevytmetallivalut antavat mahdollisuuden painon minimointiin samalla kuitenkin keskittämällä materiaalia sinne missä sitä kuormitusten vuoksi tarvitaan. Ensimmäisessä kuvassa on esitetty esimerkkejä magnesiumvalujen hyödyntämisestä moderneissa henkilöautoissa. Toisessa kuvassa on esitetty alumiiniseoksesta kokillivalettu automaattivaihteiston kotelo, johon on integroitu yhteen vaihteistoa käyttävän paineöljyjärjestelmän kanavointi.



Kuva 21. Vasemmalla: Magnesiumpainevaluna valmistettuja henkilöauton osia: Istuimen ja oven runko. Oikealla: Automaattivaihteiston kotelo, johon on valettu sisään toimintaa ohjaavan paineöljyjärjestelmän kanavointi

Esimerkki 15: Suihkumoottorin siipi

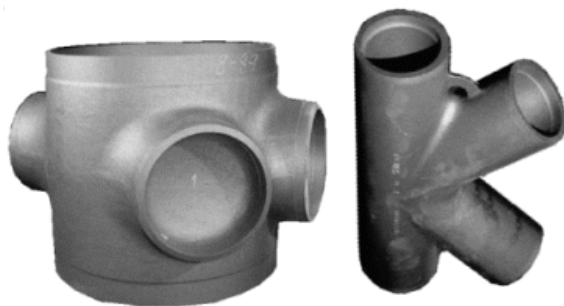
Suihkumoottorit ovat eräitä suurimmista titaanin ja superseosten käyttökohteista erityisesti tarkkuusvaluna. Titaanivaluja hyödynnetään mm. ahtimen siivissä ja moottorin sekä kiinteissä että pyörivissä rakenneosissa aina n. 500...550°C saakka. Tätä korkeammissa lämpötiloissa käytetään mm. superseoksia. Esimerkin 15 kuvassa on esitetty nikkelivaltaisesta superseoksesta suunnatusti jähmettämällä valettu sisäisiä jäähdytyskanavia sisältävä turpiininsiipi. Suunnatulla mikrorakenteella saavutetaan parhaat virumisominaisuudet.



Kuva 22. Suunnatun jähmettymisen avulla superseostarkkuusvaluna valmistettu virumiskestävyydeltään optimoitu suihkumoottorin turpiininsiipi.

Esimerkki 16: Noodikappaleet

Usein valaminen ja siihen liittyvä muotoilun vapaus tarjoaa parhaan tavan välttää rakenteellisen epäjatkuvuuskohdan syntymisen. Valamisen kautta ainetta ja jäykkyyttä voidaan siirtää sinne, missä sitä tarvitaan ja jännityskeskittymät voidaan välttää jouhevalla muotoilulla. Allaolevassa kuvassa on esitetty teräksestä valettuja off-shore-rakenteiden noodikappaleita. Putkirakenteen hitsausliitokset on näin voitu siirtää pois rasitetuimmista kohdista ja rakenteellinen epäjatkuvuuskohta on voitu muotoilla edullisimmalla tavalla.



Kuva 23. Teräksestä valettuja off-shore-rakenteiden noodikappaleita. Putkirakenteen hitsausliitokset on näin voitu siirtää pois rasitetuimmista kohdista ja rakenteellinen epäjatkuvuuskohta on voitu muotoilla edullisimmalla tavalla.