

Monikomponenttiruiskuvalu

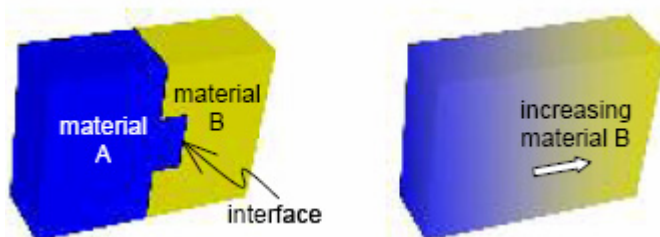
School of Technology and Management, Polytechnic Institute of Leiria (Kääntänyt Sanna Nykänen- Tampereen teknillinen yliopisto)

Johdanto

Vogelin mukaan /1/ ihminen käyttää valmistamissaan esineissä pääsääntöisesti melko jäykkiä materiaaleja, kun puolestaan ”luonnon esineet” ovat pehmeää ja myötäilevää materiaalia ja jäykkiä kohtia, kuten luuta ja hammasta, on vain joissain kohdin. Tämä perustavanlaatuisen ero johtuu esineiden erilaisista kokoonpano- ja prosessointimenetelmistä. Luonnollisten rakenteiden pääasiallinen vaatimus on kokoonpanon puute. Koko systeemin on kasvettava yhdestä lähteestä tai solusta muodostaen kokonaisuuden. /2/. Tuote, jossa ei tarvita kokoonpanoa yhdessä painon vähentämisen ja osien määrän vähenemisen kanssa on edullisempi valmistaa. Useissa tutkimuksissa on huomattu, että kokoonpanokustannukset ovat jopa 40 - 50 % koko tuotteen valmistuskustannuksista. /2/ Näin ollen tuotteen osien määrän väheneminen ja tuotantokustannusten pieneneminen vaikuttavat suuresti tuotteen kokonaishintaan. Useiden eri materiaalien käyttö yhdessä tuotteessa antaa lisää mahdollisuuksia suunnitteluun.

Kerroksittain kappaleen muodostavat menetelmät, kuten stereolitografia, lasersintraus (SLS) ja 3D- printaus, ovat käyttökelpoisia useista materiaaleista valmistettavien tuotteiden tekemiseen. /3,4/ Menetelmillä voidaan valmistaa monimutkaisiakin muotoja omaavia tuotteita, mutta niitä ei kuitenkaan voida yleensä käyttää massatuotantoon. Näitä tekniikoita parempi ratkaisu onkin monikomponenttiruiskuvalu. Monikomponenttiruiskuvalussa valmistetaan tuote kahdesta tai useammasta materiaalista muotissa. /3/

Monimateriaalikappaleet voidaan luokitella kappaleiksi, joissa on käytetty kahta tai useampaa materiaalia eli ne ovat heterogeenisiä. /5/ Materiaalit voivat olla omissa, erillisissä materiaaliosissaan tai vaihtua sulavasti. Esimerkkinä jälkimmäisestä tapauksesta on funktionaalisesti gradientit materiaalit. /6/ Ne ovat komposiittirakenteita, jossa rakenne vaihtuu asteittaisesti johtaen huomattaviin muutoksiin rakenteen ominaisuuksissa. Esimerkkinä puolestaan ensimmäisestä tapauksesta on kappale, jossa on erillinen rajapinta erottamassa materiaaleja toisistaan (kuva 1). /5/



Kuva 1. Kaksi erilaista monimateriaalista kappaletta, Oikealla kappale, jossa on selkeä rajapinta erottamassa materiaaleja toisistaan ja vasemmalla kappale, jossa materiaali vaihtuu asteittaisesti. /5/

Monikomponenttiruiskuvalu voidaan luokitella ruiskuvalun erikoistekniikaksi. Monikomponenttiruiskuvalussa kappaleen muodostavat eri polymeerit lämmitetään sulamispisteisiinsä ja ruiskutetaan muottiin tai muotteihin. Sulat polymeerit jäähtyvät ja kiinteytyvät seuraten muottionkalon muotoja.

Monikomponenttiruiskuvalu voi poiketa suurestikin perinteisestä ruiskuvalusta ja siksi sitä varten on kehitetty omia termejä. Termi "valujakso" (eng. moulding stage) viittaa monikomponenttiruiskuvalun vaiheeseen, jossa yksi valettavista materiaaleista ruiskutetaan muottiin. Esimerkiksi kappaleen, jossa on kolme eri materiaalia, ruiskuvalussa on kolme eri valujaksoa (yksi joka materiaalille). /6/ Muita käytettyjä termejä ovat mm. "substraatti" ja "valukuori" (eng. overmould). Substraatilla tarkoitetaan muottiin ensin valettavaa materiaalia ja valukuorella jälkimmäisen materiaalin valamista substraatin päälle.

Monikomponenttiruiskuvalussa on muistettava huomioida tärkeä seikka, jota ei normaalissa ruiskuvalussa esiinny. Materiaalien yhteensopivuus ja niiden välinen rajapinta on tärkeä asia huomioitavaksi. /5/

Materiaalien väliset rajapinnat

Mikroskooppinen rajapinta

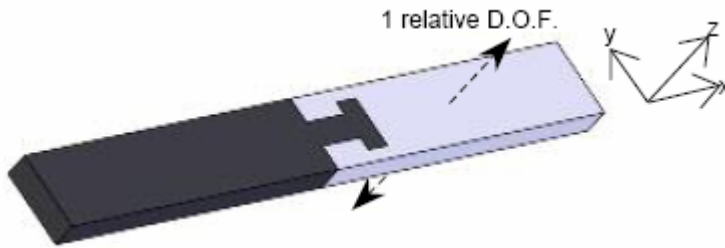
Mikroskooppiset eli kemialliset rajapinnat syntyvät kahden materiaalin liittyessä toisiinsa kemiallisen sitoutumisen vuoksi. Materiaaleja yhteenliittävä voima on polymeerien molekyylien ristositoutumienn. Kemiallisen rajapinnan laajuus ja lujuus on riippuvainen monesta eri muuttujasta, kuten molekyylien koosta ja painosta, materiaalien prosessointilämpötiloista sekä viskositeeteistä. Kuvassa 2. on esitetty kolme erilaista kahden materiaalien yhdistelmää, joissa on tapahtunut eriasteista ristositoutumista.



Kuva 2. Vasemmalla korkea ristositoutumisaste, keskellä keskinkertainen ristositoutumisaste ja oikealla matala ristositoutumisaste. /5/

Makroskooppinen rajapinta

Makroskooppinen tai lukkiutuva rajapinta muodostuu, kun kaksi materiaalia lukkiutuu toisiinsa kiinni mekaanisesti jonkin geometrisen muodon vaikutuksesta. Tällä tavalla voidaan liittää toisiinsa kaksi kemiallisesti toisiinsa epäsojivaa materiaalia (esim. ABS ja alumiini). Lisäksi lukkiutuvilla rajapinnoilla voidaan kontrolloida materiaalien liikkumista eri vapausasteiden suhteen. Kuvassa 3. on esitetty tanko, jossa on makroskooppinen, T:n muotoinen rajapinta. Tällainen rakenne sallii materiaalien liikkumisen vain z-akselin suuntaan.



Kuva 3. Makroskooppinen rajapinta. /5/

Mesoskooppinen rajapinta

Mesoskooppiset rajapinnat ovat mikroskooppisten ja makroskooppisten rajapintojen välistä. Niissä materiaalien liittyminen tapahtuu siis sekä molekulaarisella sitoutumisella että lukittumisella. Mesoskooppisia sidoksia voidaan valmistaa valamalla ensin yksi materiaali ja viimeistelemällä sen sidospinta epätasaiseksi. Tämän jälkeen valetaan toinen materiaali sen sidospintaan kiinni. /5/

Yhdistelmärajapinnat

Jotkut monikomponenttiruiskuvälutekniikat mahdollistavat valmistaa kappaleita, joissa on millainen tahansa yhdistelmä edellä mainituista rajapinnoista. On siis mahdollista tehdä esimerkiksi rajapinta, jossa tapahtuu kemiallinen kytkeytyminen mukailien geometristä, lukkiutuvaa muotoa. Bruck *et al.* mukaan /7/ mikroskooppisen- makroskooppisen rajapinnan yhdistelmä kestää paremmin vetojännitystä kuin tasaiset, liitetyt rajapinnat.

Muovien rajapinnat monikomponenttiruiskuvalussa

Monikomponenttiruiskuvalussa kaksi tai useampi ruiskutusyksikkö täyttää muottionkaloita vuoronperään. Kun ensimmäisen materiaali on ruiskutettu muottionkaloihin, osien sijaintia muutetaan, jotta voidaan tehdä seuraavan materiaalin ruiskutus. /9/

Ensimmäisen materiaalin jo jähmettyessä jälkimmäisenä ruiskutetun materiaalin sularintama kohtaa sen. Jos materiaalit ovat kemiallisilta ominaisuuksiltaan samankaltaisia, jälkimmäinen materiaali liittyy ensimmäiseksi ruiskutettuun materiaalin kiinni vahvalla, kemiallisella adheesiolla. Myös mekaanisia lukitusmuotoja sisältäviä rajapintoja voidaan suunnitella materiaalien yhteenliittämiseksi. Jos materiaaleilla on hyvin toisis-

taan poikkeavat sulamispisteet tai ne ovat kemiallisesti hyvin erilaisia (esim. kiteinen –amorfinen) ,eivät ne liity toisiinsa. Materiaalivalmistajilta on saatavilla materiaalien yhteensopivuustaulukoita (kuva 5.), mutta on muistettava, että ne ovat vain suuntaa-antavia.

Mekaanisia lukittumismuotoja voidaan käyttää liitoksen kestävyuden parantamiseksi esim. sellaisissa kohdissa, jotka altistuvat suurelle jännitykselle tai kulutukselle (kuva 4.) /9/



Kuva 4. Mekaanisia lukitusmuotoja, jotka parantavat materiaalien liittymistä toisiinsa.

Materials	ABS	ASA	CA	PA 6	PA 6,6	PA blend	PBT	PC	PC/ABS	PC/PBT	PC/PET	PE	PET	PMMA	POM	PP	PPO	PS	SAN	TPE	TPU	LSR
ABS	good	limited	limited	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
ASA	good	good	limited	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
CA	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PA 6	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PA 6,6	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PA blend	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PBT	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PC	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PC/ABS	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PC/PBT	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PC/PET	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PE	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PET	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PMMA	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
POM	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PP	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PPO	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
PS	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
SAN	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
TPE	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
TPU	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good
LSR	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good	good

Kuva 5. Materiaalien yhteensopivuustaulukko /9/

Monikomponenttiruiskuvallettujen pintojen suunnittelu ja karakterisointi

Monikomponenttiruiskuvaluprosessiin vaikuttaa moni eri muuttuja, joita ovat esim. lämpötila, paine ja aika. Yksi tärkeä parametri on valujaksojen välissä oleva jäähtymisaika, sillä se vaikuttaa rajapintojen väliin ristisitoutumiseen. Jotta ristisitoutuminen olisi riittävää, on toisen materiaalin valu suoritettava ennen kuin ensimmäisenä valettu materiaali on täysin jähmettynyt.

Materiaalien välisen rajapinnan lujuus määrittää pitkälle kappaleen rasituksen keston. Jotta sitä voitaisiin karakterisoida, on tehtävä kokeita, joiden avulla määritetään kriittinen jännitys, jolla rajapinta alkaa myötää. Eräässä tutkimuksessa on todettu, että rajapinnan geometrinen monimutkaisuus voi parantaa sen kestävyyttä, jopa 20 – 25 %. Lisäksi huomattiin, että ympyrämäiset geometriat ovat lujuudeltaan n. 5 % suorakulmaisia geometrioita kestävämpiä. /7/

Rajapinnan lujuutta voidaan testata monille eri testeillä. Yksinkertaisinta ja edullisinta on kuitenkin määrittää rajapinnan lujuus kemiallisesti sitoutuneista, tasaisista rajapinnoista neljällä eri kuormitustilalla (veto, leikkaus, vääntö ja peel-testi), jotka kaikki kohdistetaan kappaleen eri kohtiin. /7/

Kokeellisesti on vertailtu sekä tasaisen rajapinnan että yhdistelmärajapinnan (kemiallinen sitoutuminen + mekaaninen lukkiutuminen) mekaanista kestoja keskenään /3/. Tällöin huomattiin, että tasaisella rajapinnalla on n. 15 % parempi kestävyys. Jos rajapinnassa ei kuitenkaan vaikuta kemiallisia sidoksia, on mekaanisen lukkiutumisen omaava rajapinta huomattavasti kestävämpi. Näin ollen, jos monikomponenttiruiskuvalussa käytetään kemiallisesti yhteensopivia materiaaleja, on mahdollista käyttää molempia rajapinnan sitoutumisvaihtoehtoja (kemiallinen/mekaaninen).

Useamman materiaalin käytön hyödyt

Käyttämällä yhdessä kappaleessa useampaa, toisiinsa liitettyä materiaalia, voidaan saavuttaa huomattavia hyötyjä verrattuna perinteisiin, yhdestä materiaalista valmistettuihin kappaleisiin. Kokonaisia tuotekokoonpanoja voidaan korvata useammasta materiaalista valmistetuilla tuotteilla, sillä ominaisuudet sekä kustannukset ovat yhtäläiset tai jopa paremmat. Monikomponenttiruiskuvalulla valmistettujen tuotteiden ominaisuuksia verrattuna yhdestä materiaalista ruiskuvaluttuihin tuotteisiin ovat mm.

- mahdollisuus useampaan väriin
- pinta/ydin yhdistelmät
- in-mould kokoonpanot
- selektiivinen myötävyys
- pehmeät kohdat kappaleen osissa.

Useamman värin käyttö kappaleessa

Monikomponenttiruiskuvalulla voidaan valmistaa kappaleita, joissa eri värejä sekä läpinäkyvyyttä/läpinäkymättömyyttä. /8/ Näin on siis mahdollista valmistaa esim. kirkkaita ikkunakohtia tai värillisiä etikettejä (kuva 6.). Tällöin voidaan saavuttaa esteettisesti parempi laatu, kuin ruiskuvalamalla yhdestä materiaalista kappaleita, joista muodostetaan kokoonpano tai kappale, jonka pinta on maalattu eri väreillä. Näin vältetään myös maalin kulumiselta ja lohkeilulta sekä säästytään jälkikäsittelyltä, kuten kokoonpanolta tai maalaamiselta.



Kuva 6. Esimerkkejä monivärisistä kappaleista. /5/

Pinta/ydin yhdistelmät

Kappaleessa, jossa on ns. pinta/ydin- yhdistelmä, on ulompi pintakerros päällystämässä sisempää ydinkomponenttia. (kuva 7.)



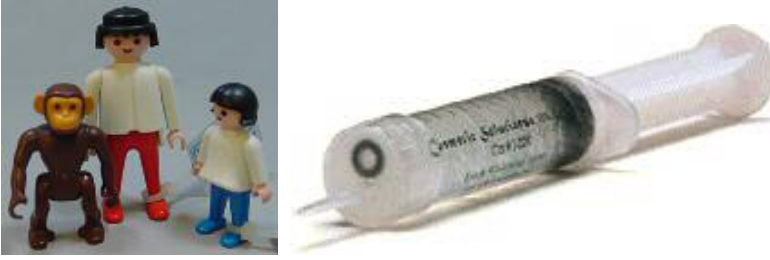
Kuva 7. Esimerkkejä kappaleista, joissa on ns. pinta/ydin- yhdistelmä. Vasemmalla käsinoja ja oikealla frisbee.

Tällaisissa yhdistelmissä etuna on ydinosan eristyminen täysin ympäristöltä sen päällä olevan kuoren ansiosta. Näin ydin voi olla täysin rakenteellinen ja /tai matalakustanteinen osa, kuoren palvellessa muita funktioita.

Pinta/ydin- yhdistelmä voidaan toteuttaa eri tarkoituksia varten. Pinnan funktio voi esim. olla ohut kuorikerros, joka suojaa ydintä esim. korroosiolta, säältä tai säteilyltä. Näin esim. tuote, jonka käyttöympäristö on ulkona auringonvalossa, voidaan monikomponenttiruiskuvalaa niin, että sen ydintä suojaa UV- säteilyä kestävä pinta (esim. puutarhatuoli). Vaihtoehtoisesti kuori voi olla esteettisesti hyvän näköinen ja piilottaa alleen vähemmän esteettisen ydinosan. Esimerkiksi värillinen, kiiltäväpintainen kuori lisää mitättömän näköisen ytimen omaavan kappaleen visuaalista ilmettä (esim. vessan pöntön kansi). Samoin tavoin kumiainen, pehmeä pinta lisää kovan ytimen omaavan kappaleen koskettamisen miellyttävyyttä. /9/ Näin vältetään kokonaan jälkikäsitteilyiden tarpeelta. Pinta/ydin- yhdistelmän käytön syy voi olla myös puhtaasti taloudellinen. Ydin, joka on tilavuudeltaan suurempi, voidaan valmistaa esim. kierrätetystä materiaalista tai muuten halvemmasta ja pintaa huonommat ominaisuudet omaavasta materiaalista. Esimerkkinä kuvan 7. frisbeeseen on käytetty 33 % kierrätysmuovia. /10/ Lisäksi pinta/ydin- yhdistelmällä voidaan pienentää kappaleen painoa esim. valmistamalla ydin vaahtomaisesta materiaalista.

Muotissakokoonpano (in-mould assembly)

Monikomponenttiruiskuvalulla voidaan valmistaa kappaleita, joiden kokoonpano tapahtuu kokonaan muotissa. Näin vältetään jälkikäteen tehtävältä kappaleen kokoonpanolta sekä erillisten liittimien, kuten ruuvien ja liiman, käytöltä. Osien määrä vähenee ja kokoonpanokustannukset laskevat. Lisäksi esim. tiivisteet voidaan valaa suoraan kappaleisiin, joissa tarvitaan hyvää tiivistystä. Kuvassa 8. on esimerkkejä edellä kuvatun kaltaisista kappaleista.



Kuva 8. Vasemmalla nukkeja, jotka on valmistettu kolmesta eri materiaalista monikomponenttiruiskuvalulla ja oikealla ruisku, jossa on muotissa valettu tiiviste. /5/

Myötävät komponentit

Monikomponenttiruiskuvalulla voidaan myös valmistaa kappaleita, joissa materiaalin myötävyyttä voidaan käyttää hyväksi kappaleen tietyissä kohdissa. Näin kappale saadaan toimimaan kunnolla, kun muodonmuutos voi olla suurempaa sitä vaativissa kappaleen kohdissa. Lisäksi kappaleen mekaanisia ominaisuuksia pystytään säätämään paikallisesti ja voidaan valmistaa kappaleita joiden valmistaminen muulla keinoin olisi epäkäytännöllistä ja vaikeaa. /11/ Kuvassa 9. on esitetty tästä yksinkertainen esimerkki, jossa on perinteisesti valmistetut kolmesta osasta yhteenliitetyt pihdit sekä monimateriaaliset, myötävät pihdit. Oikealla olevien pihtien keskellä oleva sarana on pehmeää ja joustavaa muovia ja pihtien muu osa on jäykkää ja kestävä muovia. Vasemmalla olevissa pihtieissä on metallinen jousi ja kaksi erillistä puoliskoä, jotka on liitetty yhteen.



Kuva 9. Perinteisten ja monimateriaalisten pihtien vertailu. /5/

Pehmeät kohdat kappaleessa

Edellisten lisäksi monikomponenttiruiskuvalulla voidaan valmistaa kappaleita, joissa on jäykästä muovista valmistettu kehys/kotelo ja pehmeämpiä, kumimaisia alueita. Jäykkä substraattiosa toimii välttämättömänä, kestäväenä ja jäykkänä rakenteellisena osana, kun vastaavasti kumimaiset alueet tuovat esteettisyyttä, parantavat otteen pitävyyttä kappaleesta sekä vähentävät tärinän määrää. Pehmeät alueet myös yksilöivät tuotetta ja antavat käyttäjälle paremman käyttötuntuman. Kuvassa 10. on esimerkkejä kappaleista, joissa on pehmeitä kohtia jäykän muovikuoren lisäksi.



Kuva 10. Vasemmalla johdoton saha ja oikealla sähköhammasharja. /5/

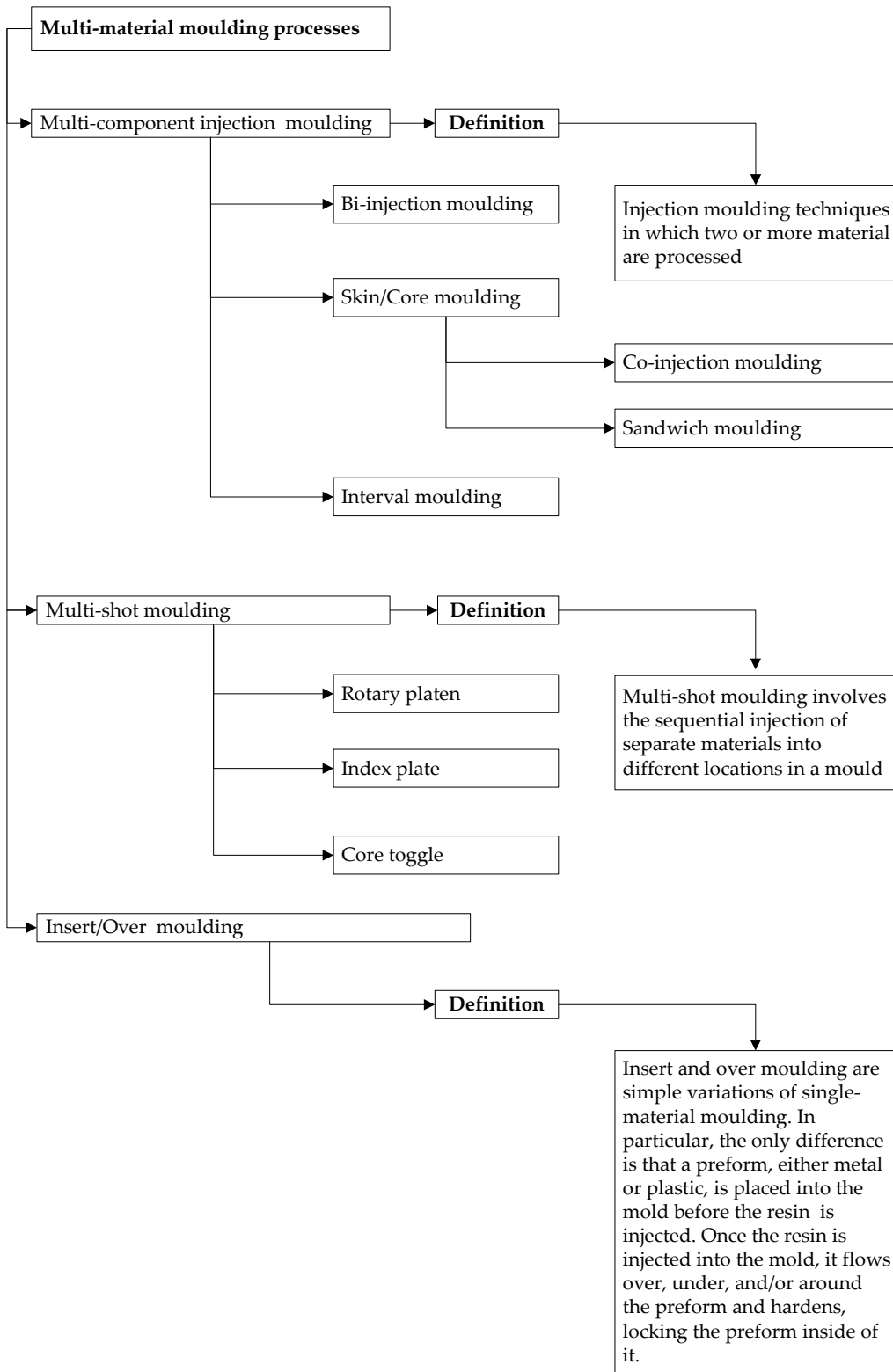
Monikomponenttiruiskuvalutekniikat

Monikomponenttiruiskuvalutekniikoita on erilaisia. *Rinnakkaisruiskuvalussa* käytetään vaihdettavaa muottipuoliskoja tai liikkuvia keernoja. Materiaalit sijoittuvat kappaleeseen rinnakkain tai päällekkäin. Rinnakkaisruiskuvalussa yhdessä ruiskuvaluyksikössä on kaksi ruiskutusyksikköä ja sulkuyksikkö, joka vaihtaa muottipuoliskoja. Jälkimmäinen materiaali ruiskuvaletaan käännettyyn muottipesään ensimmäisen materiaalin jälkeen mahdollisimman nopeasti.

Sisäkkäisruiskuvalussa eri massojen suuttimet on sijoitettu niin, että toinen materiaaleista jää kokonaan toisen sisään. Sisäkkäisruiskuvalussa tarvitaan aina kaksi ruiskutusyksikköä. Sisäkkäisruiskuvalu on yksi eniten käytetyimmistä monikomponenttiruiskuvalutekniikoista.

Samanaikaisessa ruiskuvalussa materiaalit ruiskutetaan muottiin samanaikaisesti ja tekniikka on käytännössä rinnakkaisruiskuvalua vastaava. Samanaikainen ruiskuvalu on vaikein monikomponenttiruiskuvalutekniikka.

Monikomponenttiruiskuvalulla voidaan myös ruiskuvalaa muovi esim. metallisen insertin ympärille tai jo aikaisemmin valetun muovisen kappaleen ympärille.



Kuva 11. Lähteen 5 mukainen monikomponenttiruiskuvalutekniikkajaoittelu.

Lähteet

- /1/ Vogel, S. – Better bent than broken, *Discover*, Vol. 16, No. 5, 1995, pp. 62–67.
- /2/ Ananthasuresh, G. K., and Kota, S. - Designing compliant mechanisms. *ASME Mech. Eng.*, Vol. 117, No. 11, 1995, pp. 93–96.
- /3/ Gouker, R. Gupta, S., Bruck, H. and Holzschuh, T. - Manufacturing of multi-material compliant mechanisms using multi-material moulding, *Int J Adv Manuf Technol* Vol. 30, 2006, pp. 1049–1075.
- /4/ Beaman, J., Bourell, D., Jackson, B., Jepson, L., McAdams, D., Perez, J. and Wood K. - Multi-material selective laser sintering: empirical studies and hardware development, *NSF Design and Manufacturing Grantees Conference, Vancouver, BC, 2000*, pp 3-6.
- /5/ Fowler, G. T. - Cost and performance evaluation models for comparing multi-shot and traditional injection moulding, *MSc Thesis, University of Maryland, 2004*.
- /6/ Fessler, J. R., Nickel, A. H., Link, G., Prinz, F. B. and P. Fussell. - Functional Gradient Metallic Prototypes through Shape Deposition Manufacturing. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, Texas, 1997*.
- /7/ Bruck, H. A., Fowler, G., Gupta, S. K. and Valentine, T. M. - Using geometric complexity to enhance the interfacial strength of heterogeneous structures fabricated in a multi-stage, Multi-piece moulding process. *Experimental Mechanics*, Vol. 44, 2004, pp. 261-271.
- /8/ Robert B. H. - Technical multicolour/component injection moulding to enhance product, reduce cost. *Proceedings of Multi-Shot Injection Moulding (CM97-210), Chicago, Illinois, 1997*.
- /9/ Maniscalco, M. - Basic Elements: Simplifying multi-component design. *IMM Magazine (online version)*. <http://www.immnet.com/articles?article=2343> (accessed: September 2006).
- /10/ Kirkland, C. - Rediscovering, unleashing the value of co-injection. *IMM Magazine (online version)*. http://www.immnet.com/article_printable.html?article=1766 (accessed: September 2006).
- /11/ Kumar, M. - Automated design of multi-stage moulds for manufacturing multi- material objects. *MSc Thesis, University of Maryland, 2001*.