

MIKROMASINA

Mikromekaaniset komponentit ja laitteet

Projektin loppuraportti

Tilaja: MIKROMASINA-projektin johtoryhmä

Julkinen	X	Rekisteröidään VTT:n tutkimusrekisteriin JURE:een	X
Luottamuksellinen 28.2.2006 saakka			
Sisäiseen käyttöön			

Raportin nimi MIKROMASINA - Mikromekaaniset komponentit ja laitteet, projektin loppuraportti	
Toimeksiantaja/rahoittaja ja tilaus pvm/nro TEKES, päätös No. 40558/04	Raportin numero VTT-R-06045-06
Projektin nimi 27MIKROMAS-3	Suoritteen numero G5SU01030
Laatija Antero Jokinen, Topi Kosonen, Tatu Muukkonen, Timo Salmi, Otso Väättäinen	Sivujen/ liitesivujen lukumäärä 42/2
Avainsanat mikromekaniikka, mikrofluidistiikka, tarkka liike, DFA, DFM, aktuaattori	
Tiivistelmä <p>Raportti perustuu Tekesin Masina-teknologiaohjelmaan kuuluvaan Mikromasina-projektiin, joka toteutettiin VTT:llä aikavälillä 01.01.2003-28.02.2006. Raportti on koottu projektin aikana tehdyistä osaraporteista siihen on kirjoitettu yhteenvedon omaisesti projektin tärkeimmät tulokset.</p> <p>Projektiin osallistuvien yritysten tarpeiden mukaan painoalueiksi valittiin mikrofluidistiikka, tarkka liike ja asemointi. Samalla mikromekaniikka määritettiin projektin osalta siten, että se käsittää maksimissaan muutaman senttimetrin kokoisia kappaleita ja osia, joissa on alle sadan mikronin (<0,1 mm) suuruisia mikropiirteitä. Materiaaleina huomioitiin kaikki teknisesti käytettävät materiaalit piitä lukuunottamatta.</p> <p>Projektin osa-alueet, eli työpaketit olivat: mikromekaniikan mahdollisuudet, mikromekaniikan tuotesuunnittelu, mikromekaaniset komponentit ja niiden valmistustekniikat, mikromekaanisten komponenttien kokoonpano- ja käsittely, aktiiviset ja älykkäät materiaalit mikromekaniikan toimilaitteissa sekä yritysten case/demo-sovellukset, jotka käsittelevät lääketieteen diagnostiikan näytekasetteja, aktuaattoreita ja muovien pintaominaisuuksien modifiointia pintakäsittelyjen avulla.</p> <p>Projekti osoitti, että mikromekaniikan tärkeimmät kasvualueet ovat lääketieteen diagnostiikka ja optiikka ja elektroniikka, jotka ovat keskeisiä miniatyrisoinin kohteita. Lisäksi liikutettavat laitteet ja analysaattorit ovat tuotteita, joissa mikromekaniikkaa tarvitaan. Erityisesti muovista valmistettavat massatuotanto-osat ja -komponentit ovat keskeisiä mikromekaniikan sovelluksissa.</p>	
Espoossa 19.6.2006	
Heikki Kanner Teknologiajohtajan sijainen	Timo Salmi Tutkija
Pentti Eklund Tarkastanut	
Jakelu (asiakkaat ja VTT): VTT 13 kpl Tekes 1 kpl, Juhani Lempiäinen/Deltatron 1 kpl, Abloy Oy 1 kpl, Elcoteq Network Corp. 1 kpl, Arctic Diagnostics Oy 1 kpl, Innotrak Diagnostics Oy 1 kpl, Partner Tech Oy 1 kpl, Environics Oy 1 kpl, Oseir Oy 1 kpl, Otaniemen Teknologia kylä Oy 1 kpl, Plastone Oy 1 kpl, Metso Oyj 1 kpl	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

Alkusanat

Projektin loppuraportti perustuu Tekesin Masina-teknologiaohjelmaan kuuluvaan Mikromasina-projektiin, joka toteutettiin VTT:llä aikavälillä 01.01.2003-28.02.2006. Raportti on koottu projektin aikana tehdyistä osaraporteista ja siihen on kirjoitettu yhteenvedon omaisesti projektin tärkeimmät tulokset. Loppuraportti sekä kaikki osaraportit, matkakertomukset ja projektiaineisto on myös koottu CD:lle, joka on jaettu projektin johtoryhmälle. Tekijät ja VTT esittävät lämpimät kiitokset projektin johtoryhmälle ja Tekesille saamastaan tuesta ja rahoituksesta.

Espoo, kesäkuussa 2006

Tekijät

Sisällysluettelo

1	Johdanto	3
2	Projektin rakenne	3
3	WP 1. Mikromekaniikan mahdollisuudet	4
3.1	Mikromekaniikka - nykytila, haasteet & visiot	4
3.2	Kansainvälinen toiminta ja verkottuminen	13
3.2.1	Tutkijavaihto Stanfordin yliopistoon	13
3.2.2	Muut tutkijavaihdot	14
3.2.3	Muu toiminta	14
4	WP 2. Mikromekaniikan tuotesuunnittelu	15
4.1	Mikrokokoisten tuotteiden tai osien suunnittelu	15
4.2	Mikromekaanisten tuotteiden suunnittelu: Systemaattiset metodologiat, menetelmät ja työkalut mitta- ja muototarkkuuden hallintaan ja suunnitteluun	16
4.3	DF μ A - Kokoonpanoystävällinen suunnittelu mikromekaniikassa	19
5	WP 3. Mikromekaaniset komponentit ja niiden valmistustekniikat	20
5.1	Pienten kappaleiden valmistusmenetelmät ja -materiaalit	20
5.2	Mikrofluidistiikan komponenttien erityisominaisuudet ja niiden määrittäminen	23
6	WP 4. Mikromekaanisten komponenttien kokoonpano ja käsittely	24
6.1	Mikromekaanisten tuotteiden kokoonpanon laiteratkaisu	24
6.2	Pienten ja mikroskooppisten osien asemointi konenäöllä	29
7	WP 5. Aktiiviset ja älykkäät materiaalit mikromekaniikan toimilaitteissa	31
7.1	Potentiaalisten aktiivimateriaalien arviointi mikromekaniikan näkökulmasta	31
8	WP6. Yritysten case / demo -sovellukset	32
8.1	Abloy-case - Mikromekaniikkaan soveltuvat toimilaitteet ja niiden kriittiset parametrit liikkeen tuottamisessa	32
8.2	Arctic-case & demonstraatio - Selvitystyö mikrofluidistiikan komponenttien liittämismenetelmistä	34
8.3	Innotrac-case - Selvitystyö miniatyrisoidun näyttekasetin valmistettavuudesta & Demonstraatio - Yksinkertaisten venttiilien valmistus koviin muoveihin	35
8.4	Demonstraatio - Muovien pintaominaisuuksien modifiointi pintakäsittelyjen avulla	37
8.5	Demonstraatio - Liikkeen tuottaminen EAP-aktuaattorilla	39
9	Lähdeviitteet	40
9.1	Projektin osaraportit	40
9.2	Konferenssiesitelmät	41
10	Liitteet	42
	Liite 1. Lista matkakertomuksista	

1 Johdanto

Mikromekaniikan ja miniatyrisoinnin merkitys kasvaa koko ajan Suomessa ja kaupallista soveltamista ajatellen tarvitaan lisää tietoa niiden osa-alueista. Mikromekaniikka poikkeaa täysin perinteisestä mekaniikasta ja sen soveltaminen vaatii uudenlaista osaamista ja monitieteellistä lähestymistä aihepiiriin.

Edellä mainittujen seikkojen toteuttamiseksi Tekes käynnisti vuoden 2003 alussa kolmevuotisen Masina-teknologiaohjelmaan kuuluvan Mikromasina-projektin, jonka tavoitteena oli kehittää uuden sukupolven koneenrakennuksen mikromekaniikkaa ja sen suunnittelua korkealaatuisten, vaativien ja tietyin osin myös älykkäiden laitteiden ja toimintojen aikaansaamiseksi. Projektissa haluttiin luoda Suomen teollisuudelle edellytykset käyttää mikromekaanisia komponentteja tuotteissaan sekä mahdollistetaan miniatyrisointi korkean teknologian tuotteissa.

Projektiin osallistuvien yritysten tarpeiden mukaan painoalueiksi valittiin mikrofluidistiikka, tarkka liike ja asemointi. Samalla mikromekaniikka määritettiin projektin osalta siten, että se käsittää maksimissaan muutaman senttimetrin kokoisia kappaleita ja osia, joissa on alle sadan mikronin (<0,1 mm) suuruisia mikropiirteitä. Materiaaleina huomioitiin kaikki teknisesti käytettävät materiaalit piitä lukuunottamatta.

2 Projektin rakenne

Projekti koostui kuudesta työpaketista, jotka olivat seuraavat:

- WP1: Mikromekaniikan mahdollisuudet
- WP2: Mikromekaniikan tuotesuunnittelu
- WP3: Mikromekaaniset komponentit ja niiden valmistustekniikat
- WP4: Mikromekaanisten komponenttien kokoonpano- ja käsittely
- WP5: Aktiiviset ja älykkäät materiaalit mikromekaniikan toimilaitteissa
- WP6: Yritysten case/demo-sovellukset
- WP7. Projektin hallinta

Työpaketti (WP1) sisälsi selvityksen mikromekaniikan nykytilasta, haasteista ja visioista sekä verkottumisen kansainvälisten osajien kanssa mukaan lukien tutkijavierailut ja näytteilleasettelut alan messuilla projektin aiheeseen liittyen. Työpaketit WP2-WP5 sisälsivät kirjallisuusselvityksiä kuhunkin projektin aihealueeseen liittyen. Työpaketissa WP6 kehitettiin yritysten sovelluksia mikromekaniikkaan liittyen ja suurin osa tuloksista demonstroititiin koko johtoryhmälle kunkin yrityksen suostumuksella. Työpaketti WP7 sisälsi projektin hallinnon eli johtoryhmän ja alaryhmien kokoukset sekä raportoinnin.

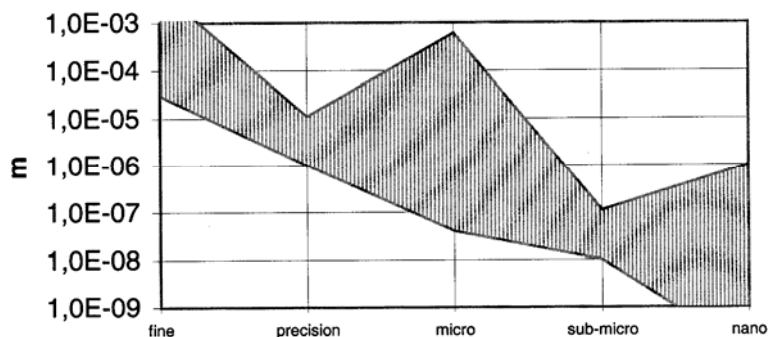
3 WP 1. Mikromekaniikan mahdollisuudet

3.1 Mikromekaniikka - nykytila, haasteet & visiot

Työssä selvitettiin mikromekaniikan nykytilaa, haasteita ja visioita projektin tarpeisiin käyttäen painoalueina mikrofluidistiikkaa, tarkkaa liikettä ja asemointia.

Mikro- ja hienomekaniikan (micro and fine mechanics) terminologia on varsin epäselvää (kuva 1). Yhden jaottelutavan mukaan tarkkuustekniikka (precision engineering) ja hienomekaniikka (fine mechanics) tarkoittavat samaa asiaa, toisaalta taas ajatellaan, että ne ovat toistensa alaryhmiä. Hienomekaniikalla (fine mechanics) viitataan usein pieniin komponentteihin, kun taas tarkkuustekniikalla (precision engineering) käsitetään myös suurempia komponentteja ja koneita, joilla on "tiukat" toleranssit. Jotkut jopa pitävät mikro- ja nanoteknologiaa yhtäläisenä käyttäen "nano" etuliitettä kuvatakseen kappaleita, joita mitataan mikrometreillä. Nanoteknologia voidaan kuitenkin helposti rajata ilmiöiksi, piirteiksi ja menetelmiksi, joita käsittelemään tarvitaan alle yhden mikrometrin tarkkuutta.

Mikroprosessorit, toimilaitteet, anturit ja muut mikroelektroniset (IC, Integrated Circuit) tai mikroelektromekaaniset järjestelmät (MEMS, Micro electro mechanical systems) ovat esimerkkejä mikrojärjestelmistä. Edellä mainitut määrittelyt viittaavat vain esineiden kokoon. Mikromekaniikassa termi Micro System Technology (MST) eli mikrosysteemitekniikka, on tullut laajaan käyttöön, kun kuvataan järjestelmiä, joissa voi olla mekaanisia, sähköisiä, optisia tai muita komponentteja [1].



Kuva 1. Hienomekaniikan kokomäärittelmän vaihtelualue eri lähteiden mukaan [1].

Mikrofluidistiikka

Mikrofluidistiikka elää eräänlaista murroskautta. Lääketieteen kehitys mahdollistaa uusia ja monin osin mullistavia ratkaisuja diagnostiikkaan liittyen ja tämä luo haasteita ja tarpeita sekä laitteiden rakennukseen että niihin liittyvään mikrofluidistiikkaan. Maailmalla tehdään erittäin paljon point-of-care- ja lab-on-a-chip -tekniikkaan liittyvää tutkimus- ja kehitystyötä, joka todennäköisesti tuottaa lähivuosina useita teknologian läpimurtoja ja uusia sovelluksia.

Tärkeimpiä teknologiahaasteita lääketieteen mikrofluidistiikan alueella ovat materiaali- ja valmistustekniikka, pintakemia sekä edullisten ja automatisoitujen miniatyyriratkaisujen kaupallinen valmistus sarjatuotantoon sopivilla tekniikoilla.

Materiaalitekniikka on merkittävä tekijä mikrofluidistiikan sovelluksissa. Materiaalivalinta vaikuttaa saavutettavaan puhtauteen, korroosionkestävyyteen, pintaominaisuuksiin sekä optiseen käyttäytymiseen, jotka kaikki ovat erittäin tärkeitä ominaisuuksia erityisesti

lääketieteellisissä sovelluksissa. Lisäksi materiaalivalinnalla on suuri merkitys valmistettavuuteen ja valmistuskustannuksiin sekä luonnollisesti kierrätettävyyteen, mikä on erityisesti kertakäyttötuotteiden kohdalla otettava huomioon.

Tällä hetkellä useissa tutkimus- ja protolaitteissa käytetään valmistusmateriaalina piitä, koska siitä on edullista valmistaa yksittäisiä komponentteja ja laitteita. Kuitenkin kaupallisen soveltamisen ja sarjavalmistuksen kannalta edullisemmat materiaalit ovat välttämättömiä, koska osa laitteista erityisesti lab-on-a-chip-sovelluksissa on kertakäyttöisiä. Tällöin muovin ja lasin käyttö tulee erityisen tärkeäksi ja niihin liittyvä materiaalitietämys on erittäin oleellista laitteiden toiminnan kannalta.

Valmistustekniikka on keskeinen asia erityisesti tuotantomittakaavaan siirryttäessä. Sarjatuotantoon sopivien valmistusmenetelmien kehittäminen vaatii erityisosaamista esimerkiksi muottitekniikkaan ja mikrotyöstöön liittyen. Lisäksi valmistusmenetelmän valinnassa käytettävä materiaali, kappaleen koko, muoto sekä sarjasuuruus vaikuttavat merkittävästi valmistuskustannuksiin.

Mikrofluidistiikan komponenttien ja laitteiden pintaominaisuudet ovat keskeisin tekijä niiden toimivuuden kannalta. Pintaominaisuuksien optimointi ja säätely ovat erittäin tärkeitä vaiheita ja pintatekniikkaan sekä -kemiaan liittyvä osaaminen on hyvin oleellista. Tietyissä tapauksissa nesteen kanssa kosketuksissa olevien osien pinnoitus on välttämätöntä toimivan laitteen aikaansaamiseksi.

Maailmalla kehitetään runsaasti mikrofluidistiikan komponentteja ja rakenneratkaisuja, joilla on tarkoitus mahdollistaa automatisoidut ja miniatyrisoidut lääketieteelliset analyysit ja diagnoosit. Näiden kaupallinen soveltaminen ja sarjavalmistus vaativat kuitenkin laaja-alaista mikromekaniikkaan liittyvää osaamista. Valmistuksen yhteyteen täytyy liittää käsittelyyn, siirtoon, asemointiin ja kokoonpanoon liittyviä mikromekaanisia toimintoja. Usein myös reagenssit sekä puskuri- ja pesunesteet tulee saada samaan komponenttiin tai yksikköön kuten esimerkiksi kertakäyttöisissä lab-on-a-chip-sovelluksissa. Lisäksi laadunvarmistus- ja puhtausvaatimukset ovat erittäin suuret.

Mikrofluidistiikkaan on kehittymässä perinteisten sovellusten, kuten diagnosoinnin, virtauksen säädön ja kemiallisen analyysin, rinnalle uusia sovellusalueita. Tällaisia uusia sovelluksia ovat mm. energian kuljetus, lämmönhallinta ja kemiallisiin prosesseihin perustuva tuotanto. Näissä uusissa sovelluksissa hyödynnetään useita rinnakkaisia mikrofluidistisia laitteita.

Mikrofluidistiikassa laitteiden koko tulee edelleen pienenemään; on jo alettu puhua nanofluidistiikasta. Samalla laitteisiin integroidaan yhä lisää toimintoja. Valmistuksessa pyritään siihen, että koko laite kaikkine toimintoineen valmistuu yhdessä prosessissa ja että laitteessa on mahdollisimman vähän erillisiä osia. Kehitys tähtää massatuotantoon niin, että mikrofluidistiset laitteet olisivat edullisesti kaikkien saatavilla. Odotettavissa on mullistus mm. potilashoidossa POC (point-of-care) -laitteiden markkinoilletulon myötä. Monet nykyisin lääkäriä vaativat, kalliit, aikaavievät ja monimutkaiset tutkimukset ja/tai analyysit voidaan tulevaisuudessa tehdä potilaan omin voimin mikrofluidistiikkaan perustuvia kertakäyttöisiä analysointilaitteita käyttäen.

Mikrofluidistiikan tulevaisuuden visioina on esitetty mm.:

- Laitteet alkavat imitoida luonnon organismien toimintaa.
- Lentävät mikrohyönteiset (Microair Vehicles, MAV) mm. puolustustarkoituksiin
- Kehon nesteiden jatkuva monitorointi.

- Biologisten nesteiden manipulointi, valmistus ja analysointi
- Solu- tai molekyyli-tason toimintojen seuraaminen ja kontrollointi.
- Molekyylien manipulointi nanofluidistiikalla.

Suomessa lääketieteen diagnostiikka on korkealla tasolla ja lääketieteellinen osaaminen analysointiin liittyville miniatyrisoiduille ja automatisoiduille ratkaisuille on pääasiassa jo olemassa. Sen sijaan sovelluksissa tarvittava mikromekaniikka vaatii monin osin kehitystyötä, jotta kaupallisesti tärkeät teknologiset ratkaisut olisivat hyödynnettävissä sarjavalmistuksessa.

Aiemmin mainitut mikrofluidistiikan teknologiahaasteet pätevät pääasiassa myös suomalaisen lääketieteen ja diagnostiikkayritysten tarpeisiin. Tämän lisäksi tarvitaan suunnitteluun ja mitoitukseen liittyvää osaamista sekä tietoa mikrofluidistiikan komponenteista ja niiden soveltamisesta point-of-care- ja lab-on-a-chip-ympäristöön.

Pienten yritysten kohdalla verkottuminen sekä kotimaisten että ulkomaisten osaajien kanssa on ensiarvoisen tärkeää. On oleellista heti kehityksen alkuvaiheessa hakeutua verkostoihin, joista löytyvät tutkimukseen, tuotekehitykseen, suunnitteluun sekä valmistukseen liittyvät osaajat sekä kaupalliset toimittajat. Näin saavutetaan laitteiden tuotekehityksen ja tuotannollistamisen kannalta tehokkain ja nopein eteneminen.

Mikrofluidistiikka on keskeinen mikromekaniikan osa-alue ja siihen liittyvä kehitystyö on voimakasta maailmalla. Erityisesti lääketieteen alueella mikrofluidistiikalla on paljon annettavaa ja se mahdollistaa paljon uusia teknologisia läpimurtoja esimerkiksi diagnostiikan automatisointiin ja miniatyrisointiin liittyen. Lisäksi lääketutkimuksessa ja lääkkeiden kehitystyössä mikrofluidistiikan antamat mahdollisuudet ovat huomattavia.

Mikrofluidistiikkaan liittyviä lääketieteen kaupallisia sovelluksia löytyy jo useita maailmalta, mutta merkittävimmät läpimurrot ovat vielä edessä ja mikromekaniikkaan liittyvien teknologioiden ja osaamisen kehittyessä niiden kaupallinen soveltaminen ja taloudellinen valmistus suursarjatuotteina tulee mahdolliseksi.

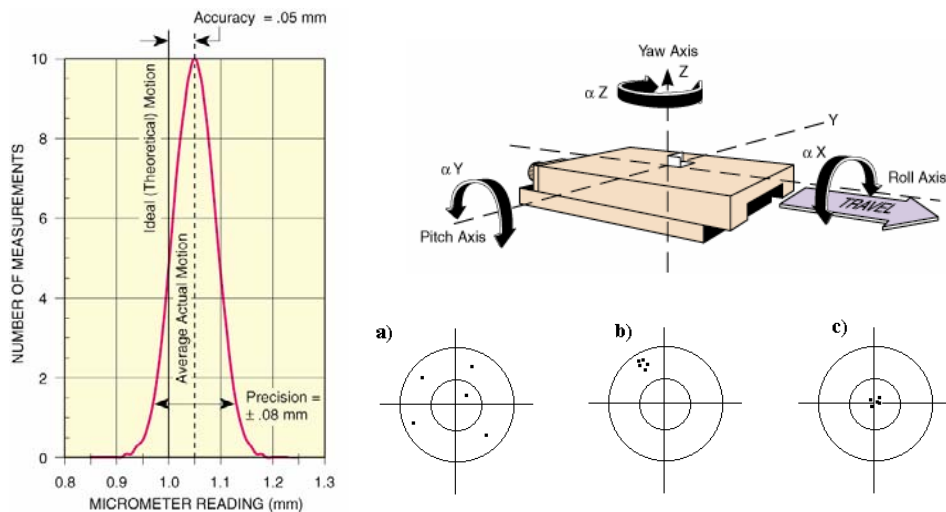
Lab-on-a-chip- ja mikroarray-tekniikka ovat merkittävimpiä lääketieteen mikrofluidistiikan osa-alueita ja niiden kehittäminen ja soveltaminen mahdollistaa todennäköisesti suurimmat lääketieteeseen liittyvät innovaatiot.

Mikrofluidistiikan monitieteellisyyden takia tarvitaan hyvin laaja-alaista osaamista toimivien sovellusten aikaansaamiseksi. Erityisesti pintakemialla sekä materiaali- ja valmistustekniikalla on usein suuri merkitys mikrofluidistiikan toimivuuteen. Lisäksi laaja-alainen mikromekaniikan osaaminen on oleellista miniatyrisoitavien ja automatisoitavien ratkaisujen kannalta.

Tulevaisuudessa myös nanotekniikka antaa paljon täysin uusia mahdollisuuksia mikrofluidistiikalle ja sen sovelluksille.

Tarkka liike

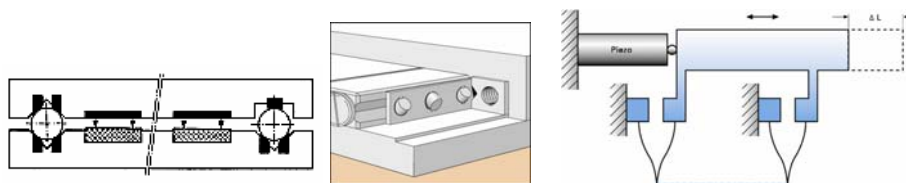
Tarkka liike ja sen sovellusalueet on oleellinen, mutta myös monimuotoinen mikromekaniikkaan liittyvä aihepiiri. Tarkkaa liikettä tarvitaan mikromekaanisten laitteiden osana. Toimilaittevalmistajat ilmoittavat esitteissään usein vain absoluuttisen tarkkuuden, resoluution ja toistotarkkuuden. Todellisuudessa tarkan liikkeen toimilaitteissa esiintyy myös muita paikoitusvirheitä, kuten erilaisia kulma- ja esim. hystereesivirheitä. Erilaisia paikoitus/liiketarkkuuden määritelmiä on paljon (kuva 2).



Kuva 2. Absoluuttinen tarkkuus, kallistuma ja huojunta ja toistotarkkuus [1].

Tarkan liikkeen ohjaimen tehtävänä on kontrolloida liikuteltavan toimilaitteen dynamiikkaa. Moottori muuntaa saadun ohjaussignaalin moottorin ulos tuottamaksi voimaksi. Ohjauksessa voidaan käyttää joko tarkempaa suljettua tai halvempaa avointa säätöä. Tarkan liikkeen anturit ovat useimmiten optisia. Tarkimmissa sovelluksissa voidaan käyttää laserinterferometrejä.

Tarkan liikkeen laakeroinneista lohenpyrstöliukupinnat ovat yksinkertaisia, iskunkestäviä ja likaa sietäviä. Niillä on kuitenkin suuri lähtökierke ja liikekitka vaihtelee nopeudesta riippuen. Kuulalaakereiden ominaisuutena on pehmeä ja tasainen liike vähäisellä kitkalla. Ristikkäiset rullalaakerit (kuva 3) ovat jäykempiä rakenteeltaan ja niitä voidaan käyttää pienemmällä esikuormituksella, joka taas johtaa vähentyneeseen kitkaan. Uudelleenkiertävissä laakereissa rullat tai kuulat kiertävät kulkussa olevaa suljettua rataa pitkin. Ne sallivat erittäin pitkät liikematkat ja suuren kuormituskapasiteetin akselin keskipisteen sivussa.



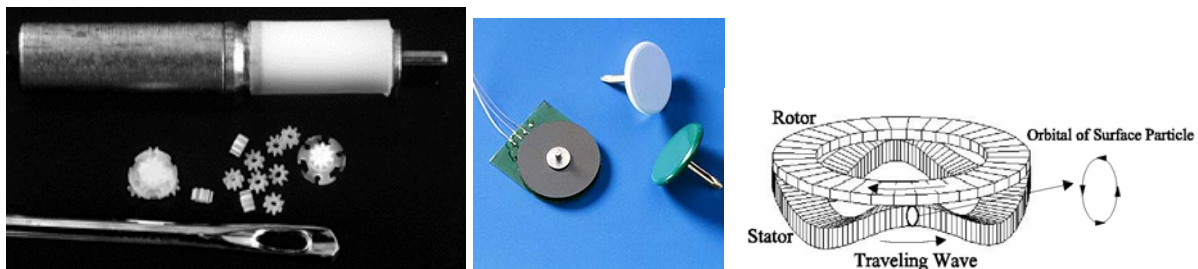
Kuva 3. Magneettis-kinemaattiset kuulalaakerit, ristikkäiset rullalaakerit ja joustava johde [1].

Tarkan liikkeen johteista ruuvijohde on itselukittuva, mutta sillä on suurempi kitka kuin kiertokuulalaakereilla. Kuulaholkkihohteessa kuulat vähentävät ruuvijohdeen kitkaa muuttamalla kitkan pyörimisestä aiheutuvaksi kitkaksi. Kuularuuvit tarjoavat huomattavasti pienemmän kitkan, pienemmän kulumisen ja pitemmän eliniän kuin ruuvijohdeet. Niillä voidaan saavuttaa suuremmat nopeudet, mutta ne eivät ole itselukittuvia. Joustavien johteiden (kuva 3) toiminta perustuu kiinteän materiaalin ohuemmissa kohdissa tapahtuviin elastisiin muodonmuutoksiin.

Mikromekaniikassa käytetään perinteisiä makromaailmasta tuttuja sähkömagnetismiin, lämpöön, hydraulikkaan ja pneumatiikkaan perustuvia toimilaitteita. Uudempia toimilaiteratkaisuja ovat esimerkiksi älymateriaaleihin ja elektrostaattisuuteen perustuvat toimilaitteet. Tutkimustoiminta uusien toimilaitteperiaatteiden osalta on vilkasta

Lineaarisen liikkeen toimilaitteet ovat erityisen käyttökelpoisia, koska xyz-koordinaatisto on yleisesti käytössä, mikä yksinkertaistaa rakennetta ja suunnittelua. Voiman tuottomenetelminä käytetään mm. elektrostaattisuutta, pietsosähköisyyttä, elektromagneettisuutta, elektrostriktiivisyyttä, magnetostriktiivisyyttä, muistimetalleja, hydraulikkaa, pneumatiikkaa ja lämpöä. On myös olemassa suuri määrä erilaisia lineaarisia toimilaitteita kuten kampoja, paaluja, pinoja, askeltajia, taipujia ja erilaisia moottoreita.

Pyörivän liikkeen moottoreiden toimintaperiaate on useimmiten sähkömagneettinen. Lineaariliikkeeksi muuntamiseen käytetään pääasiassa tarkkoja kuularuuveja. Aikaisemmin pyörivän liikkeen miniatyyrimoottoreiden kehitys näytti keskittyvän pitkulaisiin moottoreihin, mutta viimeaikoina on kehitetty myös litteitä moottoreita (kuva 4).



Kuva 4. Faulhaberin ja Mymotors:n pyöriviä miniatyyrimoottoreita ja pyörivän liikkeen pietsomoottorin toimintaperiaate [1].

Kaupallisia tarkan liikkeen toimilaitteita tarjoavissa yrityksissä on niin perinteisiä automaation asemoinnin osajia (esim. Bosch ja Rockwell) kuin myös uusia pelkästään tarkan liikkeen toimilaitteisiin keskittyneitä yrityksiä (esim. Nanomotion ja PI). Tarjolla olevien tuotteiden kirjo on todella laaja, esim. pelkästään Newportilla on tarjolla useita eri toimintaperiaatteella olevia tarkan liikkeen toimilaitteita ja toimilaitteperheissä kymmeniä eri liikematkoilla ja tarkkuuksilla varustettuja toimilaitteita (kuva 5).



Kuva 5. Newport ILS-sarjan lineaarimoottori ja Danaher:n mikroliikutustaso ja PI:n Hexapod [1].

Tarkan liikkeen aihepiirissä tehdään laajalti tutkimus- ja kehitystyötä, joista esimerkkinä voidaan nostaa esille pienet toimilaitteet ja toisaalta yhä tarkempien ja nopeampien moottorien kehittäminen. Esimerkiksi lineaarimoottoreiden kehittämiseen panostetaan voimakkaasti ja niissä nähdään voimakasta potentiaalia. Kehitys ei rajoitu vain uusiin toimilaitteisiin, vaan esimerkiksi myös mekaniikkakomponentteja kehitetään koko ajan.

Aktiivimateriaalit ovat olleet viime vuosina voimakkaan tutkimuksen kohteena. Aktiiviseksi tai älykkäiksi materiaaleiksi käsitetään sellaiset materiaalit, joilla on mm. kyky muodonmuutokseen tai kyky reagoida ulkopuoliseen ärsykkeeseen, kuten lämpötila, sähkökenttä ja pH. Älykkäitä materiaaleja käytetään liikkeen tuottamisessa mm.

mikromekaanisissa toimilaitteissa ja niissä yhdistyy parhaimmassa tapauksessa aktuaattori (tuottaa liikettä) ja anturi (tietää paikan). Älykkäitä materiaaleja ovat mm. muistimetallit, pietsosähköiset keraamit ja liikettä tuottavat polymeerit. Näillä on hyvin mielenkiintoisia, mutta toisistaan poikkeavia ominaisuuksia, taulukko 1. Älymateriaaleilla on myös niiden soveltamista rajoittavia ominaisuuksia, jotka on syytä tuntea älymateriaalia sovellettaessa. [1]

Taulukko 1. Aktuaattoritekniikoiden välinen vertailu.

Aktuaattoritekniikka (esimerkki)	Pituuden muutos max. (%)	Maksimi-paine (MPa)	Elastinen ominaisenergia (J/g)	Maksimi-hyötysuhde (%)	Suhteellinen nopeus (täysi työjakso)
Dielektrinen elastomeeri (Akryyli) (Silikoni)	380 63	7,2 3,0	3,4 0,75	60-80 90	Keskimääräinen Nopea
Elektrostriktiivinen polymeeri (PVDF-PTFE)	4,3	43	0,49	n. 80 arv.	Nopea
Hiili-nanoputki	>2,5	>1,0	>0,013	<10?	Keskimääräinen
Nestekide-elastomeeri	>35	>0,3	>0,10	<10?	Hidas
IPMC (Nafion)	10	1,0	0,025	<10?	Keskimääräinen
Johtava polymeeri (Polyaniliini)	10	450	23	<10?	Hidas
Geelipolymeeri (Polyelektrolyytti)	>40	0,3	0,06	30	Hidas
Electrostaattinen laite (Integroitu voimakennosto)	50	0,03	0,0015	>90	Nopea
Sähkömagneettinen (Kaiutinkela)	50	0,10	0,003	>90	Nopea
Pietsosähköinen Keraami (PZT)	0,2	110	0,013	90	Nopea
Yksikiteinen (PZN-PT)	1,7	131	0,13	90	Nopea
Polymeeri (PVDF)	0,1	4,8	0,0013	n. 80 arv.	Nopea
Muistimetalli (TiNi)	>5	>200	>15	<10	Hidas
Muistipolymeeri (Polyuretaani)	100	4	2	<10	Hidas
Metallin lämpölaajeneminen	1	78	0,15	<10	Hidas
Magneto-striktiivinen (Terfenol-D)	0,2	70	0,0027	60	Nopea
Lihassoikeus (Luonnon maksimisuorituskyky)	100	0,80	0,04	-	Hidas-Nopea
(Ihmisen suorituskyky)	>40	0,35	0,07	-	Keskimääräinen

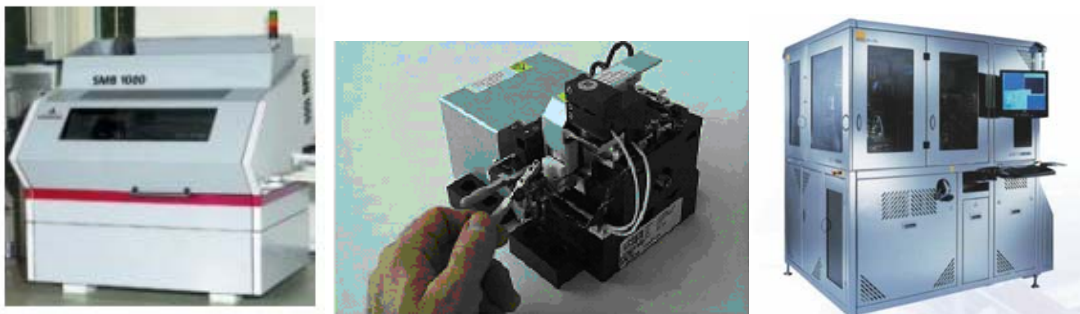
Asemointi

Asemointi liittyy läheisesti toiseen painoalueeseen, tarkkaan liikkeeseen. Asemointisanan voidaan ajatella tarkoittavan jonkin kappaleen aseman määrittämistä tai jonkin kappaleen saattamista haluttuun asemaan ja yleensä myös haluttuun asentoon. Tarkka liike on yksi osa asemointia, mutta ei yksistään riitä. Jos jokin kappale halutaan asemoida, tulee ensin tietää kappaleen sen hetkinen asema ja asento. Asennon määrittäminen tehdään tyypillisesti anturein, lähinnä konenäön avulla. Perinteisesti asemointi tehdään mekaanisesti esimerkiksi puristamalla vasteita vasten, mutta kun kappaleet tulevat riittävän pieniksi, mekaaniset menetelmät eivät enää toimi samalla tavalla kuin makromaailmassa.

Selvityksessä asemointia tarkastellaan lähinnä kappaleen käsittelyyn ja erityisesti mikromekaanisten tuotteiden kokoonpanossa esiin tuleviin asemointitarpeisiin liittyen. Lisäksi tarkastellaan konenäön soveltamista asemoinnissa. Aihe on varsin laaja ja selvitys rajoittuu lähinnä asemointiin liittyvän problematiikan esittelyyn.

Tärkeimpiä ongelmia mikrokokoonpanossa on kappaleisiin tarttuminen ja niiden käsittely. Perinteisestä kappaleenkäsittelystä poiketen gravitaatiovoimat saattavat tulla merkitykselliseksi adheesiovoimiin verrattuna. Sen johdosta kappaleenkäsittelyyn tulee uusia haasteita, mutta vastaavasti myös uusia mahdollisuuksia. Toinen haasteellinen alue on prosessien ja tuotteiden tarkkuuden hallinta.

Asemointi liittyy hyvin vahvasti kokoonpano- ja kappaleenkäsittelytekniikkaan. Perinteiseen kokoonpanoon verrattuna laitteet ovat monimutkaisempia ja ne (kuva 6) ovat suurelta osin räätälöityjä asiakkaiden tarpeiden mukaan, konenäköä käytetään usein. Erilaisia, eri tarkkuuksille ja volyymeille tarkoitettuja kokoonpanolaitteistoja on markkinoilla runsaasti. Laitetoimittajat kuitenkin pyrkivät standardoimaan ratkaisujaan mahdollisimman paljon. Tarkimmilla kokoonpanolaitteilla päästään alle mikrometrin tarkkuuksiin.



Kuva 6. Sysmelec-kokoonpanosolu, Adept-liikemoduuli ja Süss Triad-tarkkuusbondauslaite [1].

Konenäön käyttäminen mikroskooppisten ja makroskooppisten kohteiden mittauksissa on monilta osin samanlaista - usein voidaan käyttää samoja kameroita, kuvankäsittelymenetelmiä ja jopa monia samoja valaisumenetelmiä, mutta vaadittavasta isosta suurennuksesta ja kohteen pienestä mittakaavasta johtuen on kuitenkin myös joitain merkittäviä eroja. Mikroskopiakuvauksessa vaaditaan suhteellisesti voimakkaampaa valaisua tai kameralta enemmän herkkyyttä tai pidempiä valotusaikoja verrattuna makromaailmaan. Mikroskooppiset kohteet vaativat voimakasta suurennusta, jolloin linssin syvyysterävyysalue voi olla useissa mikroskopiasovellutuksissa pienempi kuin kohteen kuva-alalla olevat syvyysvaihtelut. Siksi sovellutuksissa vaaditaan yleensä automaattinen tarkennus, mahdollisesti myös syvyyskannaus. Myös laskentanopeuden vaatimukset ovat suuret. Makromaailmassa epätasaiselta näyttävä pinta voi näyttää mikromaailmassa paikallisesti peilimäisen tasaiselta ja kirkkaalta tai toisinpäin, mikä aiheuttaa valaisulle uusia vaatimuksia. Myös ympäristön puhtauteen on kiinnitettävä erityistä huomiota, koska jo pienet pölyhiukkaset tai pudonneet hiukset (halkaisija 100 μm) voivat peittää käsiteltävän komponentin alleen. 3D-muotojen analysoinnissa laserilla toteutettua strukturoitua valaisua ei toimi, mutta linssien lyhyttä syvyysterävyysaluetta voidaan hyödyntää 3D-muodon mittaamiseen.

Useissa mikrosovelluksissa on tarvetta visualisoida kohde, koska sitä ei nähdä tarkasti paljaalla silmällä. Konenäkömenetelmillä kohteesta luodaan operaattorille havainnollinen kuva ja mahdollisesti vielä tunnistetaan ja osoitetaan kuvasta potentiaalisesti merkittäviä piirteitä tai kohteen tilan muutoksia.

Kappaleen asemoinnissa kohteesta muodostetaan tarkka kuva ja mahdollisesti 3D-malli, jonka perusteella voidaan tehdä päätelmiä kohteen asemasta ja kunnosta. Konenäköä voidaan käyttää myös tarkan liikkeen mahdollistajana käyttämällä sitä liikeakselin suljetun piirin säätöön. Kohteen paikka määritetään reaaliajassa ja tieto hyödynnetään ohjauksessa. Mikroskooppisten komponenttien kuvaamiseen ja automaattiseen mallinnukseen on maailmalla useita kaupallisia laitteita. On myös laitteita, joilla voi analysoida 3D-profiileja ja muodostaa mikro-topografia-profiileja pinnoista.

Konenäön kannalta tarkan liikkeen ja asemoinnin tutkimus on lähestulkoon poikkeuksetta ollut mikromanipulaatiomenetelmien ja järjestelmien kehitystä. Kuvausgeometrian suunnittelussa on esitetty monia erilaisia konstruktioita. Esimerkiksi yhdistämällä kuva useammasta kamerasta voidaan välttää kuvaan tulevat varjostumat. Mikro-manipulaatiojärjestelmässä voi olla tarvetta tehdä ensin nopea ja karkea lähestymisliike, jota seuraa tarkka manipulatiovaihe. Näiden liikkeiden vaatimukset konenäköjärjestelmälle ovat hyvin erilaiset ja voi olla tarkoituksenmukaista käyttää kahta eri kameraa. Mikromanipulaattorin ohjauksessa voidaan hyödyntää virtuaalitodellisuutta, jolloin riittävän reaaliaikaisuuden saavuttamiseksi konenäköpaikoitus ja ohjausprosessointi voidaan erottaa alaprosesseiksi eri prosessoreille ja yhdistää nopealla tietoliikenneyhteydellä.

Konenäön tarkkuutta erityisesti mikrokokoonpanossa voidaan parantaa ottamalla sen vaatimukset huomioon jo kohteena olevien komponenttien suunnittelussa. Komponenttiin voidaan tarvittaessa lisätä piirteitä, jotka soveltuvat erityisen hyvin tehtävään paikoitukseen. Kun objektiivin sumeneminen mallinnetaan, voidaan komponentin CAD-mallista simuloida mikroskoopin näkemää kuvaa eri syvyyksille fokuksituna.

Asentamalla mikromanipulaattori teollisuusrobotin tarraimeksi saadaan yhdistettyä laaja liikealue ja tarkka liike. Ongelmana ovat teollisuusrobotista aiheutuvat värinät, jotka voidaan kompensoida tehokkaasti liittämällä mikromanipulaattorin ohjaukseen 3D-kiihtyvyyssmittari.

Asemoinnin aihepiirissä tutkimusta tehdään hyvin monella eri alueella. Raja tutkimuksen ja kaupallisen osaamisen välillä on epämääräinen. Jossain rajatussa alueessa saatetaan tarjota suhteellisen pitkälle vietyä kaupallista tekniikkaa, mutta rajauksen ulkopuolella aihe on tutkimusasteella. Eräs tutkimuksellinen aihepiiri on mikromaailmassa ilmenevien käsittelyongelmien hallinta ja mikromaailman ilmiöiden mallintaminen. Tarkkuuden toleranssien hallinnan menetelmien ja työkalujen kehittämisessä on myös aktiviteetteja. Erityisesti Japanissa on ollut laajoja tutkimushankkeita liittyen mikrotehtaisiin, jotka mahtuvat salkkuun tai pöydälle, kuva 7. Näiden konseptien soveltaminen käytäntöön mullistaisi suurelta osin koko teollisen rakenteen, kun valmistus voitaisiin hajauttaa asiakkaiden luo. Nähtäväksi jää, missä määrin ja milloin tällaiset visiot toteutuvat [1].



Kuva 7. Periaatekuva japanilaisesta mikrotehdasajatuksesta [1].

Optoelektroniikka on alue, jossa mikromekaniikkaan liittyviä odotuksia on paljon ja siihen perustuvien tuotteiden odotetaan tulevan kuluttajamarkkinoille tuleviin tuotteisiin. Internetin kehitys vaatii nopeamman liikenteen sallivaa teknologiaa, johon optoelektroniikan uskotaan tuovan ratkaisun. Markkinoilla tapahtuu suuri muutos, kun optinen tiedonsiirto tulee tärkeimmäksi tavaksi kommunikoida elektroniikan ja optisten järjestelmien välillä. Muutos edellyttää ainakin osittain muutosten toteutumista tuotteissa ja niiden valmistustekniikoissa. Optoelektroniikassa suurin haaste on kokoonpanon vaatima tarkkuus ja nykyiset prosessit ovat hitaita, saanto huono ja tuotteet liian monimutkaisia. Vastaavaa kehitystä on odotettavissa myös muussa mikromekaniikassa.

Mikromekaanisten tuotteiden kokoonpanossa alkaa enenevässä määrin prosesseihin tulla vakiintuneita menetelmiä, joiden avulla valmistuksen kustannuksia ja saantoa voidaan parantaa. Standardoinnissa yleisesti pienten tuotteiden kokoonpano (ml. optoelektroniikka) näyttää olevan 10 – 20 vuotta jäljessä pintaliitosladontatekniikkaa. Erityisesti optoelektroniikan suhteen seuraavanlaisia muutoksia tullaan tarvitsemaan: Tuotteiden konstruktioita tulee yksinkertaistaa ja osien lukumäärää vähentää, tuotteen osat ja toiminnot integroituvat. Suunnitelmien ja prosessien yksinkertaistamiseksi tarvitaan standardeja. Kokoonpanon automaatio lisääntyy. Valmistusprosessit ja komponenttien hinnat halpenevat. Tarkkuuskokoonpanossa nähdään tarvetta nopeasti käyttöön otettaville, modulaarisille ja uudelleen käytettävillä, ultra-tarkoille kokoonpanojärjestelmille.

Monin paikoin mikromekaanisten tuotteiden tuotantoon liittyy odotuksia suurista mahdollisuuksista ja markkinapotentiaalista. Muutaman vuoden takaisen Saksan VDE:n tekemän analyysin mukaan Saksan avainteknologialat käyttävät 65-69 %:sti mikrojärjestelmäteknologiaa ja tulevaisuudessa käytön uskotaan lisääntyvän 15-17 %. Jos odotukset alkavat toteutua, volyymin nouseessa tuotannon tehokkuus nousee oleelliseksi tekijäksi. Se edellyttää tehokkaita, koeteltuja ja riittävästi automatisoituja prosesseja sekä valmistusystävällisiä tuotteita. Siihen pääsemiseksi täytyy hallita pienten kappaleiden valmistus- ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu (DFMA) sekä edistyskellisten menetelmien käyttö tarkkuuden/toleranssien hallinnassa.

Suomalaisella teollisuudella on haasteena mikromekaniikan kokoonpanotekniikan hallinta mukaan lukien edeltävistä vaiheista tulevan logistiikkaketjun käsittelyvaiheet. Sama koskee

uutta osavalmistustekniikkaa. Tarvitaan eri tason tuotantotekniikan osaamista, suurten sarjojen tuotantotekniikkaa, joustavaa tuotantotekniikkaa pienille sarjoille, joustavia automaatoratkaisuja, puoliautomaatiota sekä manuaalisyön apuvälineitä. Tietyillä tuotteilla ja erityisesti tuotteiden yhä pienentyessä puhtausvaatimusten mukainen käsittely osavalmistuksesta kokoonpanoon läpi koko logistiikkaketjun on tarpeellista rakentaa.

3.2 Kansainvälinen toiminta ja verkottuminen

3.2.1 Tutkijavaihto Stanfordin yliopistoon

Tutkijavaihdon (Tatu Muukkonen) valmistelun ja toteutumisen aikana (Stanford University, California, USA) alueelta etsittiin aktiivimateriaaliosaajia ja tavoitteiden mukaisesti verkotuttiin kansainvälisesti [2]. Mielenkiintoisimmat vierailukohteet ovat esitetty alla.

Structures and Composites Laboratory

Yksi alan parhaista aktiivimateriaaliosaajista löytyy Yhdysvalloista, Stanford University, Structures and Composites Laboratory, professori Fu-Kuo Chang. Hän on maailmanlaajuisesti tunnettu älykkäiden rakenteiden ja materiaalien tutkija erikoisalanaan rakennemonitorointi, integroitujen ja älykkäiden rakenteiden suunnittelu, vauriosietoiset komposiittirakenteet ja multifunktionaaliset rakenteet. Tämä laboratorio oli tutkijavaihdon pääkohde.

Acellent Technologies Inc.

Acellent on yhtiö, joka kaupallistaa prof. Chang:in kehittelemää ja patentoimaa Smart Layer konseptia eteenpäin. Acellent tekee asiakaslähtöisiä rakennemonitorointisovelluksia, joissa aktuaattori- ja sensoriverkko (Smart Layer) liitetään pysyvästi osaksi tutkittavaa rakennetta. Passiivisen taikka aktiivisen menetelmän avulla seurataan rakenteen kuntoa ja se paikallistaa vauriokohdat.

Khuri-Yakub Ultrasonic Group

Stanford University tutkii mikromekaniikkaa useassa laboratoriossa. Yksi tällainen on E. L. Gintzon Laboratory, Khuri-Yakub Ultrasonic Group. Laboratoriossa esiteltiin, kuinka pietsokeraamimateriaaleilla mitataan kappaleen muotoa 3D, kuunnellaan ääniä vedessä ja rakennetaan mikrosekoituskennoja ja muutetaan mikrovirtauksia. Suurin osa tutkimuksesta liittyi sotilassovelluksiin ja lääketieteeseen.

SRI International

SRI International, USA on paikallinen VTT. Se on voittoa tavoittelematon tutkimusorganisaatio ja siellä on töissä noin 2000 ihmistä ja projekteja kaikkialla maailmalla. SRI:llä on kaiken muun ohella myös aktiivimateriaaliosaamista. He kehittävät mm. pietsosensoreita. Varsinainen huipputuote on kuitenkin Electroactive Polymer Artificial Muscel (EPAM). Tuote on liikettä tuottava aktuaattori. Sen rakenne on hyvin yksinkertainen ja toimiva. Joustavan, eristävän kumikalvon kahta puolen märkämaalataan sähköä johtava elektrodi. Kun elektrodien kytetään jännite, niin niiden välille muodostuu sähkökenttä. Silloin elektrodit vetävät toisiaan puoleensa ja puristavat kumikalvoa, joka laajenee ja tuottaa näin ollen liikettä. Kun aktuaattoria puristetaan, niin se toimii myös sensorina.

Artificial Muscle, Inc. (AMI)

SRI:n spin off -yhtiö nimeltä Artificial Muscle Inc. (AMI) kaupallistaa SRI:n innovaatiota Electroactive Polymer Artificial Muscle. Vuoden 2005 alussa valmistuivat ensimmäiset sarjatuotantoaktuaattorit.

Berkeley Sensors & Actuator Centre (BSAC)

Berkeley ja Stanford ovat kaksi kuuluisaa yliopistoa Kaliforniassa. Kun Stanford on yksityinen, niin Berkeley on julkinen yliopisto. Molemmissa tehdään erittäin kovatasoista aktiivimateriaalitutkimusta ja mikromekaniikkaa. Vierailu tehtiin paikkaan nimeltä Berkeley Sensor & Actuator Center (BSAC). Se sijaitsee Berkeley Universityn tiloissa. BSAC on kuuluisa paikka, siellä luodaan huomispäivän MEMS:it. He tekevät tutkimusta mm. mikrofluidistiikan, mikroventtiilien ja -pumppujen kanssa.

Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA)

EMPA, Sveitsi, vierailtiin tavoitteena verkottuminen ja yhteistyön aloittaminen erityisesti aktiivimateriaalin Dielectric EAP -asiantuntijoiden kanssa. EMPA on tunnettu kansallinen laboratorio Sveitsissä. Erittäin mielenkiintoista on se, että he ovat aloittamassa projektia, jonka tavoitteena on pudottaa käyttöjännite tasolle 100 V.

3.2.2 Muut tutkijavaihdot

Projektissa hyödynnettiin myös Tupani Taskisen tutkijavierailua Carnegien Mellon yliopistoon, PA, USA (01.01-31.12.2004). Lisäksi projektissa valmisteltiin tutkijavierilua AIST:lle (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Japani), jossa Antero Jokinen vieraili 01.04-31.05.2006.

3.2.3 Muu toiminta

Projektin tuloksia esiteltiin seuraavissa kansainvälisissä konferensseissa:

International Precision Assembly Seminar, IPAS2004 ja IPAS 2006. Esitelmien tarkemmat tiedot kirjallisuusviitteissä [15-17].

Lisäksi projektin tuloksia esiteltiin mm. Hannoverin teollisuusmessuilla 19-23.04.2004 ja 11-15.04.2005 sekä Medica/ComPaMed messuilla Düsseldorfissa 16-18.11.2005. Projektin puitteissa on osallistuttu eurooppalaiseen tarkkuus- ja mikrokokoonpanon temaattiseen verkostoon Assembly-Net ja luotu siinä yhteyksiä alan toimijoihin. Lista projektissa suoritetuista matkoista ja vierailukäynneistä on esitetty liitteessä 1.

Projektin tuloksia esiteltiin seuraavissa kotimaisissa tilaisuuksissa:

- Mikromekaniikka-päivä, 23.11.2004, Helsinki. Mikromekaniikka kone- ja laiterakennuksessa, Antero Jokinen.
- Masina-teknologiaohjelman tulosseminaari, 19.10.2005, Hämeenlinna. Mikromekaniikka kone- ja laiterakennuksessa, Antero Jokinen.

- Työvälinevalmistajien neuvottelupäivät, 26.-27.1.2006, Naantali. Lääketieteen diagnostiikka tulevaisuuden liiketoimintamahdollisuutena, Topi Kosonen.
- Finnish-Korean Joint Workshop on Miniaturization & M4-Micro-Meso Mechanical Manufacturing, June 28, 2005, Helsinki, Timo Salmi.

4 WP 2. Mikromekaniikan tuotesuunnittelu

4.1 Mikrokokoisten tuotteiden tai osien suunnittelu

Yleisesti ottaen mikrotuotteen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon seuraavat tärkeät näkökohdat [3]:

- Suunnittelu optimaalista toiminnallisuutta silmälläpitäen
- Massatuotannon huomioonottaminen
- Kustannusten minimointi tuotteen valmistuksessa, kokoonpanossa ja pakkaamisessa
- Tuotteen testauksen huomioonotto
- Tuotteeseen kohdistuvien ympäristön vaikutusten huomioonotto
- Tuotteen materiaalien optimointi

Mikrotuotteiden suunnitteluvaiheessa tehdyt päätökset vaikuttavat ratkaisevasti myöhempiin valmistusprosesseihin. Mikrotuotteen kehittämisen lähtökohdat ovat tällä hetkellä kaukana systemaattisesta. Voidaan olettaa, että systemaattinen toimintatapa toisi mukanaan paljon etuja. Tämän vuoksi mikrotuotekonsepti täytyy määrittellä selkeästi, jotta voitaisiin kiteyttää tärkeimmät hyötynäkökohdat. Sitä paitsi mikrotuoterakenteet täytyy määrittellä ja luokitella, jotta saataisiin aikaan tehokas integraatio makro-mikro-nano-periaatteiden välille. Vaihtoehtoiset arkkitehtuurit voitaisiin näin ollen arvioida helposti säästäen aikaa suunnitteluvaiheessa. Tuotearkkitehtuurien standardointi antaisi samansuuntaisia lisäetuja.

Tuote- ja tuotantoprosessien integroiminen on ehdottoman tärkeää, koska uudet prosessit mahdollistavat uudet tuotekonseptit ja tuote-tuotantoprosessi saadaan paremmin optimoitua. Systemaattiset suunnittelumenetelmät ovat tärkeitä, koska mikrotuotteen toiminnallista käyttäytymistä on vaikeaa ennustaa. Top down -suunnittelumenetelmien oletetaan olevan tehokkaita. Materiaalin erikoisen käyttäytymisen ymmärtäminen mikro-nanoskaalassa on perustana suunnittelun onnistumiselle ja tehokkaita ja realistisia materiaalimalleja täytyy sisällyttää tuote-/prosessianalyysityökaluihin (CAD-työkalut).

Mikrokomponenttien tolerointifilosofia ja periaatteet täytyy määrittää selvästi, ISO GPS -standardien soveltuvuus mikrotuotteille on ajankohtainen puheenaihe.

Standardisointi voisi olla tehokasta myös kokoonpanon ja pakkauksen kannalta. Standardipiirteiden integrointi suurimpaan osaan mikro-osia mahdollistaisi kokoonpanojärjestelmien optimisoinnin, parantaisi kokoonpantavuutta, vähentäisi linjojen räätälöintiin kuluvaa suunnittelu-aikaa ja -kustannuksia sekä parantaisi kokoonpanolinjan joustavuutta.

Mikrotuotteen prosessien integrointi jatkuviksi prosessiketjuiksi on tärkeää. Prosessiketju tulisi valita ottamalla huomioon mahdolliset vaihtoehdot ja optimoida välttämättä haitallista vuorovaikutusta eri prosessivaiheiden välillä.

Mikrotehdas on todellinen mahdollisuus mikrotuotteiden valmistuksen kestäväälle kehittämiselle.

Jotta mikroteknologian lupaavia näkymiä voitaisiin toteuttaa, on erittäin tärkeää että:

- Käytetään sekä tuote- että ja teknologialähtöistä lähestymistapaa.
- Tuotelähtöisessä lähestymistavassa kehitetään metodologioita ja periaatteita sekä seuraavaa että tulevia tuotesukupolvia ajatellen.
- Teknologialähtöisessä lähestymistavassa ylläpidetään materiaalien jatkuvaa kehittämistä ja prosesseja tuetaan käyttämällä uusia suunnitteluperiaatteita.

On tärkeä ymmärtää uusien suunnitteluperiaatteiden ja myös edistyksellisten materiaalien ja teknologioiden teollinen potentiaali pyrittäessä massatuotantoperiaatteisiin ja alhaisiin kustannuksiin [3].

4.2 Mikromekaanisten tuotteiden suunnittelu: Systemaattiset metodologiat, metodit ja työkalut mitta- ja muototarkkuuden hallintaan ja suunnitteluun

Mekaanisia osakomponentteja miniaturisoidaan, koska tuotteiden koko pienenee ja toimintojen määrä kasvaa. Tämä johtaa lisääntyviin tarkkuusvaatimuksiin valmistuksessa ja kokoonpanoteknologiassa. Toleranssit ja geometrinen muotojen ja mittojen sallittu vaihtelu ovat kriittisiä tekijöitä miniaturisoiduissa tuotteissa ja mikromekaanisissa komponenteissa. Mikromekaanisten tuotteiden suunnittelussa tuotteiden ja niiden osien mitoitus ja muototarkkuus, sekä valitun valmistusprosessin mahdollisuudet ja rajoitukset täytyy tietää, kuten myös kokoonpanoteknologioiden vaikutukset. [4].

Mikromekaanisessa kokoonpanossa prosessi täytyy usein automatisoida, koska tarkkuusvaatimusten vuoksi ihminen ei pysty suorittamaan työtä tarpeeksi tarkasti ja tehokkaasti. Kokoonpano-operaation onnistuminen mikromekaanisessa kokoonpanossa riippuu mm. mekaanisesta tarkkuudesta, asennusvoimista ja laitteiston herkkyydestä kokoonpantavien osien mittatarkkuuksille. Kokoonpantavien osien, kiinnittimien ja muiden laitteiden koko ja asema vaihtelevat, mistä aiheutuu kokoonpanovirheitä. Jotta tarkkuusvaihtelu saadaan hallintaan, tulee suorittaa toleranssitarkastelu.

Perinteisesti suunnittelijat toleroivat suunnittelemansa osat vasta juuri ennen osapiirustusten julkistamista. Toleranssiarvot perustuvat yleensä kokemukseen, valmistusmenetelmien rajoituksiin ja arvauksiin [4].

Toleranssien kasautumisanalyysijä ovat:

- 1D analyysi - lineaarisesti kasatut osat ja valmistusmenetelmien kumulatiiviset vaikutukset
- 2D analyysi - kokoonpanot tai vaihtelu tasossa (lineaariset ja kulmamuuutokset)
- 3D analyysi - osat, prosessit tai vaihtelu kolmessa dimensiossa

Worst case -analyysi on yleisin käytössä oleva toleranssianalyysimenetelmä. Worst case -analyysissä tarkastellaan kokoonpanoa pahimman mahdollisimman tapauksen, eli osien

suurimpien ja pienimpien toleranssiarvojen perusteella. Menetelmän haittapuoli on, että se saattaa johtaa liian tiukkoihin toleransseihin ja lisätä näin tuotteiden valmistuskustannuksia. Menetelmän hyvä puoli on että sitä käytettäessä pysytään aina varmallalla puolella toleroitaessa, toisin sanoen mitoiltaan virheellisiä kappaleita ei pitäisi päästä syntymään.

Muita paremmin tilastollistavia menetelmiä ovat mm. linearisointi ja neliöjuurisumma-menettelmä, laajennettu Taylorin sarja ja numeerinen integrointi perustuen Quadrature-tekniikkaan.

Monte Carlo -menetelmässä arvotaan toleranssiarvojen todennäköisyysjakaumista satunnaislukuja. Tietokoneen avulla simuloidaan eri toleranssiarvoja kerta toisensa jälkeen ja tilastoidaan eri simulointikertojen lopputulokset. Tuloksena saadaan toleranssijakaumat mitattavasta kokoonpanosta.

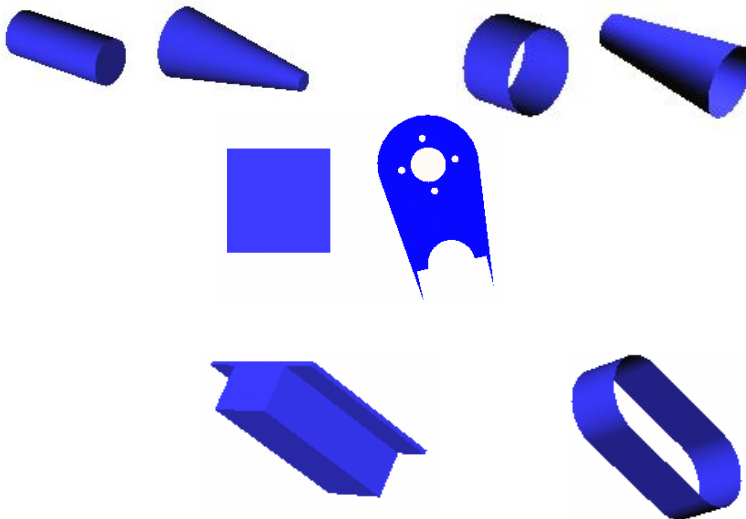
Nykyään on tarjolla useita kaupallisia tietokoneavusteisen toleroinnin (CAT) työkaluja, jotka auttavat ennustamaan ja välttämään muotovaihteluiden aiheuttamia ongelmia.

CAT-ohjelmistot voidaan luokitella erilaisiin lajeihin:

- Taulukkolaskentaan pohjautuvat
- CAD-integroidut
- Alustariippumattomat itsenäiset työkalut.
-

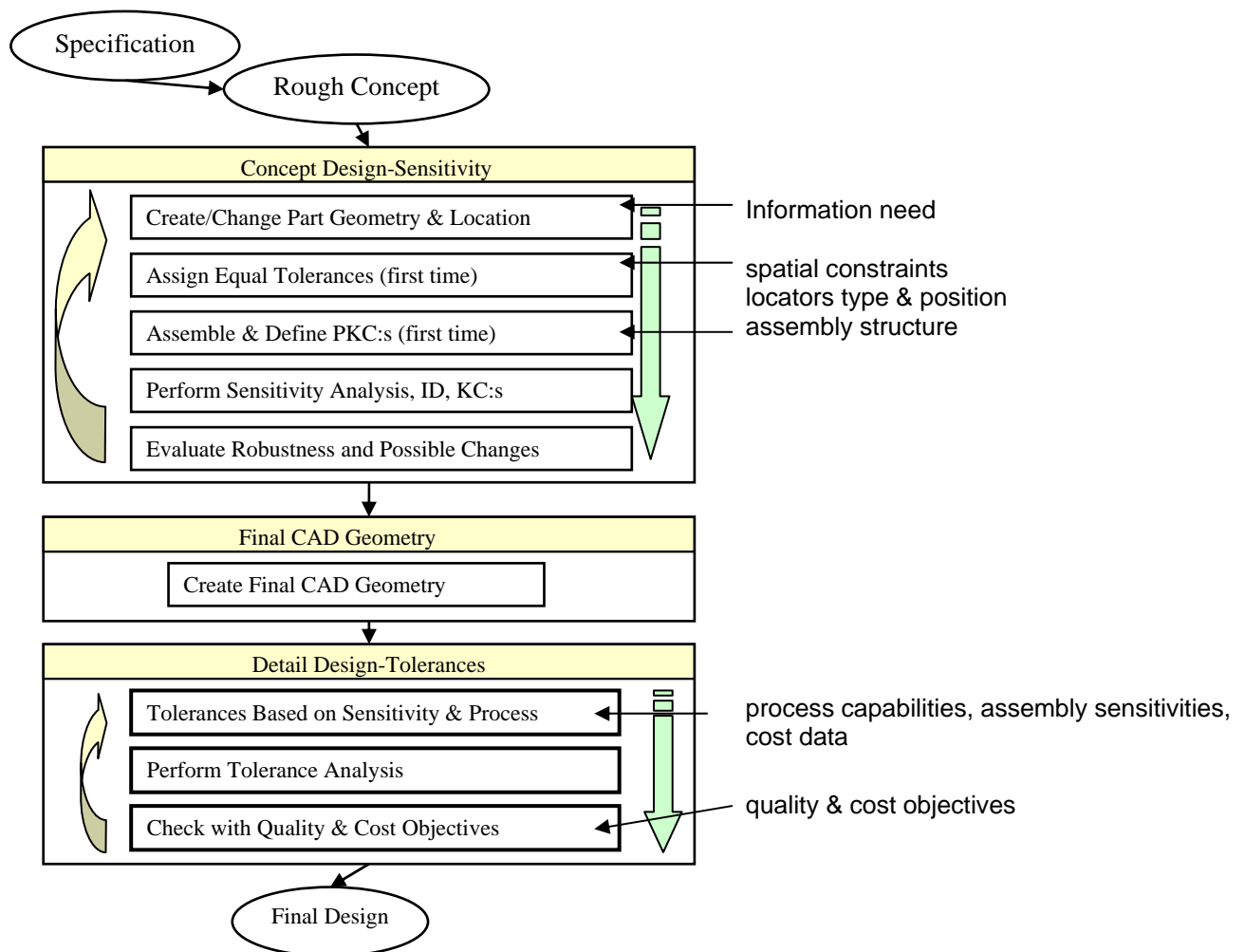
Geometriset (2D, 3D) toleranssianalyysit ovat yleensä liian monimutkaisia taulukkolaskenta-ohjelmistoille. 1D-analyysi on yleisin suunnittelutapa monissa insinööritaloissa edelleenkin, huolimatta siitä että se on epätarkka (2D-3D kokoonpanoissa), ikävä ja aikaa vievä prosessi.

Kuvassa 8 on esimerkki VisVsa-nimisen CAT-ohjelmiston piirteistä, joilla määritetään tietyn kokoonpanomallin osien mitoituksellisesti tärkeät pinnat, jotka määräävät tuotteen tai osien toiminnalliset mitat ja muodot.



Kuva 8. VisVsa-nimisen CAT-ohjelmiston piirteitä, mm. tappi, reikä, ura ja pinta [4].

Robustin suunnittelun ideana on mitoittaa suunnittelumuuttujat ja parametrit siten, että kokoonpanoon eniten virhettä tuottavat pinnat saadaan minimoitua, kuitenkin vaikuttamatta haitallisesti tuotteen toiminnallisuuteen (kuva 9).



Kuva 9. Toimintojen kulku robustissa suunnittelussa [4].

Toleranssianalyysimetodit, joita on esitetty tällä hetkellä kirjallisuudessa, ovat käytössä useimmiten ilmailu- ja autoteollisuudessa. Kirjallisuudesta löytyy vain muutama sähkömekaanisia tai miniaturisoituja tuotteita koskeva metodiartikkeli. Kuitenkin monet kulutus- ja teollisuuselektronikan valmistajat käyttävät toleranssianalyysiä ja simulointia.

Toleranssisuunnittelussa on kolme elementtiä:

1. Rajoitukset/säännöt määräävät miten osat sijaitsevat toisiinsa nähden (layout, tuoterakenne, riippuvuussuhteet)
2. Osien kokoonpanopiirteet, jotka määrittävät mistä osat koskettavat toisiinsa, (ohjauspinnat ja muodot)
3. Toleranssipiirteiden koko ja sijainti määrittävät, kuinka tarkasti osat ovat suhteessa toisiinsa.

Suunnittelija tarvitsee top down -mallinnus- ja analyysimetodeja, jotka tukevat kaikkia kolmea elementtiä.

Kirjoittaja kokosi tietoja eri lähteistä ja kokosi oman geneerisen tuotteenkehitysprosessimallin. Malli osoittaa ne suunnitteluvaiheet, joissa tolerointia koskevat päätökset tehdään tai toleranssimallinnusta käytetään.

Tärkeimmät muistettavat pääkohdat ovat: [4]

- Tunnista valmistuksen ja kokoonpanon kriittiset tekijät (pääominaispiirteet), kontakti- ja liitospinnat, tuotteen toiminnoille tärkeät piirteet.
- Pidä toleranssiketjut lyhyinä, tämä on myös yksi DFA-sääntö.
- Visualisoi toleranssiketjut ja suhteet, jotta niitä olisi helpompi ymmärtää myös kommunikoinnissa ja dokumentoinnissa.
- Tee toleranssianalyysi, jopa 1D-stack-analyysi on parempi kuin ei mitään.

4.3 DFμA - Kokoonpanoystävällinen suunnittelu mikromekaniikassa

Kokoonpanon kehittämiseen liittyy olennaisesti tuotteen konstruktion ja kokoonpanon välinen vuorovaikutus: konstruktion vaikutus kokoonpanon helppouteen ja kustannuksiin ja kokoonpanon huomioiminen tuotteen suunnitteluvaiheessa. Suunnitteluvaiheessa määritetään valmistuskustannukset hyvin suurelta osin. Kokoonpanon huomioiminen tuotesuunnitteluvaiheessa on kannattavan automaattisen kokoonpanon perusedellytys ja nykyisillä kovasti kilpailluilla markkinoilla kokoonpanoystävällinen tuotesuunnittelu tulee välttämättömäksi myös manuaalisessa kokoonpanossa heti volyymien noustessa.

Kokoonpanoystävällisen tuotesuunnittelun yhteydessä käytetään usein termiä DFA (Design For Assembly). Kokoonpantavuuden parantamista ja DFA:ta voi lähestyä kolmella eri tavalla: toimintatavoilla, yleisillä ohjeilla ja järjestelmällisillä menetelmillä.

Toimintatapojen kautta pyritään tuotesuunnittelun prosessia kehittämään niin, että valmistuksen näkökohdat tulevat samalla huomioiduiksi. Yleiset ohjeet opastavat, millaiset tuotteen ominaisuudet ja piirteet ovat kokoonpanon kannalta toivottavia. Järjestelmälliset menetelmät hyödyntävät jotain analyysimenetelmää, joko tietoteknistä työkalua tai taulukkoja.

DFA-suunnitteluperiaatteiden toteuttamisessa käytetään erilaisia analysointityökaluja, joissa kokoonpantavuustarkastelun tekniikka on mietitty valmiiksi, säännöt ja ohjeet sisältyvät menetelmiin. Analyysimenetelmät tukevat järjestelmällistä työskentelyä ja niiden avulla saadaan vertailulukuja ja analyysiin liittyvä dokumentointi tuotetaan analyysin kuluessa.

Perinteisen ja mikrokokoonpanon tunnetuin ero on, että tietyn rajan jälkeen fysikaalisten ilmiöiden luonne muuttuu. Gravitaatiovoimat eivät ole enää välttämättä vallitsevia. Se tuo muutoksia erityisesti osien käsittelyyn liittyen. Näiden ilmiöiden sekä suurten tarkkuusvaatimusten vuoksi mikrokokoonpanossa on käytössä myös paljon uudenlaista tekniikkaa. Menetelmien laaja kirjo tulee esiin esimerkiksi liittämistekniikoiden yhteydessä. Monin paikoin ratkaisuisissa ollaan laitteiden ja menetelmien suorituskyvyn äärirajoilla ja ratkaisuilla on taipumus olla kalliita ja tehottomia.

Yleisperiaatteena on, että pääsääntöisesti perinteiset DFA-säännöt pätevät mikromaailmassa. Kuitenkin uudenlainen tekniikka ja fysikaaliset ilmiöt tuovat muutostarpeita ja vastaavasti kaikki perinteiset suunnitteluohjeet eivät ole tarpeellisia.

Eryteisesti mikromekaanisille tuotteisiin liittyvien DFA-säännösten luomista on vaikeuttanut se, että eri tekniikoiden suorituskyvyn rajat eivät ole täysin selviä, osa mikrokokoonpanon prosesseista on vielä kehityksen alla, eikä kaikilta osin ole muodostunut yleisesti vakiintuneita tekniikoita. Eri ratkaisujen vaatimukset saattavat poiketa merkittävästi toisistaan. Yhtä

tärkeänä kuin yleisten säännösten noudattaminen, mikromekaanisten tuotteiden suunnittelussa korostuu se, että tuotteiden suunnittelun yhteydessä tai rinnalla täytyy suunnitella myös niiden tuotantotekniikka ja valmistusmenetelmät. Aihetta on laajemmin käsitelty raportissa [7].

5 WP 3. Mikromekaaniset komponentit ja niiden valmistustekniikat

5.1 Pienten kappaleiden valmistusmenetelmät ja -materiaalit

Useat mikromekaniikassa ja pienten kappaleiden valmistuksessa käytettävät menetelmät ovat hyvin materiaalispesifisiä, eli vain tietty materiaali tai tietyt materiaalit soveltuvat kullekin menetelmälle. Tästä syystä materiaaleja ja valmistustekniikoita ei voi käsitellä täysin erillisinä kokonaisuuksina, vaan ne kytkeytyvät useimmissa tapauksissa kiinteästi toisiinsa. Lisäksi mikrotekniikassa usein sovelletut erikoismateriaalit ja tietyt materiaaliominaisuudet, kuten esim. aktuaattorimateriaalit ja materiaalien pintaominaisuudet, rajaavat materiaalivalikoimaa entisestään. Mikrotekniikassa ei voidakaan puhua materiaalivalinnasta samaan tapaan kuin esim. perinteisessä koneenrakennuksessa, vaan jo suunnittelun alkuvaiheessa materiaali- valikoima on usein rajattu yhteen tai vain muutamaan materiaaliin.

Taulukkoon 2 on koottu tämän selvitystyön perusteella perustiedot mikrotekniikassa yleisimmin käytetyistä materiaalityypistä. Erityisesti mikrofluidistiikan bio- ja lääketieteellisissä sovelluskohteissa nousevat kestämuovit ominaisuuksiltaan ja valmistettavuudeltaan selvästi muiden materiaalityypien yläpuolelle. Piin ja lasimateriaalien valmistustekniset rajoitukset ja korkea hinta vähentävät niiden käyttökelpoisuutta erityisesti suursarjoissa valmistettavissa tuotteissa. Nämä materiaalit ovat vähitellen jäämässä lähinnä vain proto- ja demolaitteiden valmistusmateriaaleiksi. Nykyisin erittäin suosittu PDMS-polymeeri on sopiva materiaali, kun halutaan valmistaa nopeasti ja edullisesti demolaitteita tutkimuskäyttöön. Kaupallisiin sovelluksissa sen käyttö jäänee erittäin vähäiseksi. Viime vuosina tärkeimpiä kaupallisten mikrofluidistiikan tuotteiden kestämuovimateriaaleja ovat olleet PMMA ja PC.

Taulukko 2. Pienten kappaleiden valmistukseen käytettyjen yleisimpien materiaalien ominaisuuksien, valmistettavuuden ja kustannusten vertailu [5].

Ominaisuus	Termoplastiset polymeeri (PC, COC, jne)	Lujat polymeerit (PEEK, jne)	Elastomeerit (PDMS, jne)	Lasit	Pii	Pinnoitettavat metallit (Ni, jne)	Ruostumaton teräs
Soveltuvuus mikrotyöstöön / -valmistukseen	+++	+	+++	++	+++	+	--
Sopivat työstömenetelmät	Ruiskuv. Hot Emb.	Ruiskuv. Hot Emb.	Valu	Märkä-etsaus	Märkä- ja kuivaetsaus	Saostus, höyrystys	Työstö
Mahdolliset kappalegeometriat	2D, 3D	2D, 3D	2D, 3D	2D	2D	2D	2D, 3D
Liitettävyys	++	++	++	-	-	+	+
Mekaaninen lujuus	--	+	---	++	++	++	+++
Terminen kestävyys	--	-	--	++	++	++	+++
Happojen kestävyys	++	++	++	+++	++	-	++
Orgaanisten liuottimien kestävyys	--	+	--	+++	++	+++	+++
Optinen läpinäkyvyys	++	-	++	+++	---	---	---
Materiaalin hinta	+++	+	+++	-	---	--	-
Kokonaiskustannukset	+++	+	+++	--	--	---	---

Nykyisin käytössä olevat mikrovalmistusmenetelmät ja niille soveltuvat materiaalit voidaan tämän selvitystyön perusteella jakaa karkeasti seuraaviin ryhmiin (taulukko 3):

- Sarjatuotantomenetelmät
 - Piin & lasin mikrotyöstö
 - Ruiskuvalu, muovit
 - Hot Embossing, muovit
- Protojen ja piensarjojen valmistusmenetelmät
 - LTCC, lasikeraamit
 - LIGA, nikkeli
 - SU-8, polymeeri
 - Valu, polymeerit; erityisesti PDMS
 - Lastuava mikrotyöstö, metallit ja polymeerit
 - Lasertyöstö, metallit, polymeerit ja keraamit
- Muottien ja mallikappaleiden valmistusmenetelmät
 - Kipinätyöstö, metallit; erityisesti muottiteräkset
 - Sähkökemiallinen kasvatus, metallit; erityisesti Ni
 - + osa em. proto- & piensarjoille käytetyistä menetelmistä

Todellisia massavalmistukseen soveltuvia menetelmiä ovat vain muovien ruiskuvalu ja piin mikrotyöstömenetelmät (märkä- ja kuivaetsaus). Pinta-alaltaan suuria komponentteja valmistettaessa piitekniikat rajautuvat vielä pois korkeiden materiaalikustannusten takia.

Taulukko 3. Pienten kappaleiden valmistukseen soveltuvien menetelmien vertailu [5].

Menetelmä	Kappaleen geometria	Rakenteen maksimikorkeus [µm]	Yksityiskohtien minimikoko [µm]	Pinnanlaatu, Ra	Sivusuhte (Aspect Ratio)	Maksimi kappalekoko [mm x mm]	Materiaali-valikoima	Nopeus	Hinta	Saatavuus
Ruiskuvalu	3D	1000	≥ 0,2	≤ 50nm	1-10	-	muovit, metallit, keraamit	+++	+++	+++
Hot Embossing	2D	1000	0,2	≥ 50nm	2,5-50	120x80	muovit ym.	++	++	+
LTCC	3D	3200	10	0,3µm	< 50	-	keraamit	+	+	++
Lastuava mikrotööstö	3D	200-500	50-300	0,1-0,2 µm	1-10	-	metallit, muovit	-	-	+
µEDM	3D	~1000	10	0,1 µm	3-50	-	metallit	-	-	+
Lasertööstö	2D	~250	0,5-20	1 µm	10-50	-	muovit, metallit, keraamit	++	+	+
Piin mikrotööstö + metallipinnoitus	2D	~200	≥ 2	-	1-2	-	pii, metallit (Ni)	-	--	-
SU-8 (muotinvalmistuksessa)	3D	≤ 3000	0,2	≤ 20nm	≤ 3,5	85x85	nikkeli (Ni)	++	-	-
LIGA	2D	3000	0,2	< 50nm	50-500	-	metallit (Ni)	---	---	---

Muotteja käytävissä valmistusmenetelmissä, esim. ruiskuvalussa ja Hot Embossing -menetelmässä, tärkein tarkkuutta rajoittava tekijä on tällä hetkellä itse muotti. Muottien valmistustekniikkaan, niiden pinnanlaatuun ja materiaaleihin on kiinnitettävä erityistä huomiota. Esimerkiksi seuraavien tekijöiden huomioiminen on ensiarvoisen tärkeää, kun halutaan valmistaa mittatarkkoja mikrokomponentteja: muotin ja muovimateriaalin lämpölaajenemiserot, valmistuksen aikaisen lämpösyklin suuruus ja muottimateriaalin ja muovin yhteensopivuus, ts. kiinnitarttuvuus. Nykyisin on olemassa toimivia muotinvalmistusmenetelmiä piensarjoina (100-5000 kpl) valmistettaville mikrokomponenteille, mutta suursarjatuotantoon (10 000-100 000) soveltuvia riittävän tarkkoja muotinvalmistusmenetelmiä ei juuri ole.

Lähes kaikessa mikrovalmistuksessa tarvitaan komponenttien liittämistä toisiinsa. Tähän tarkoitukseen sopivien liittämistekniikoiden kehitystyö ei ole edennyt samaa tahtia muun mikrovalmistustekniikan kanssa. Toimivien ja yksinkertaisten liittämismenetelmien puute onkin yksi pullonkaula esim. mikrofluidistiikkaan perustuvien tuotteiden massatuotannossa ja niiden laajamittaisessa kaupallistamisessa. Nykyisin käytössä olevat menetelmät ovat yleensä mikrotasolle skaalattuja makromaailman liittämismenetelmiä. Käytetyimpiä menetelmiä tällä hetkellä ovat erilaiset liimausmenetelmät, erityisesti UV-kovettuvat liimat ja liimakalvot, sekä laserhitsaus.

Piipitoisten materiaalien, esim. lasi, pii ja silikonimuovi, pinnan modifiointi tehdään pinnan piiatomien kautta. Piipitoisen pinnan modifiointiin on olemassa kaksi tapaa. Yleisin on silanointi (eli silylointi) eli pinnan käsittely silaanilla, jolloin saadaan syntymään (Si-O-Si-R)-pinnoite eli piiatomeihin kiinnittyy siloksaanisidoksella orgaaninen molekyyli. Vapaaksi jäävän silaanimolekyylin pääteryhmän reaktion kautta rakennetaan sitten varsinainen

polymeeripinnoite. Voidaan myös käyttää hydrosilylointia, jossa hiiliatomi kiinnittyy suoraan piiatomiin Lewis-hapon katalysoimana.

Silanointiesikäsitteilyn sijasta mikroanalytiikassa voidaan käyttää fysikaalisella adsorptiolla muodostettuja pinnoitteita. Haittapuolena on pinnoitteen helppo poishuuhtoutuvuus nestevirtauksen mukana sekä käyttö vain kapealla pH-alueella. Adsorpoimalla mikrokanavan pinnalle vuorottain kationista ja anionista polyelektrolyyttiä saadaan pinnoite, jota voidaan käyttää laajalla pH-alueella.

Muovien pintavaraus on yleensä pieni, joten aina ei tarvita merkittävää pinnan modifiointia. Polymeerit ovat kuitenkin lievästi hydrofobisia. Pintoja täytyy muuttaa hydrofiilisempaan suuntaan, jotta virtaus ja analysoitavien aineiden käsittely mikrokanavissa voi tapahtua vesiympäristössä. Muovien modifiointi on polymerointitekniikan soveltamista mikroympäristössä. Reaktiivisiin ryhmiin voidaan kohdistaa alkalinen hydrolyysi (pinta tulee hydrofiilisemmäksi) tai aminolyysillä pintaan saadaan amiiniin terminoituvia ketjuja, joita voidaan edelleen modifioida.

UV-lasersäteen matalilla tehoilla - alle materiaalin poistoon vaadittavan tehon ns. rajatehon - on mahdollista kemiallisesti modifioida polymeerien pintaa. Käsittelyssä pinnan polaarisuus ja siten myös varaustila muuttuu. Käsittelyllä saadaan pintaan syntymään mm. karboksyyli-ryhmiä analogisesti ns. koronakäsittelyn tavoin.

Koronakäsittely on normaalipaineessa tapahtuvaa plasmakäsittelyä ja hyvin kaoottinen tapahtuma. Kontrolloidumpi plasmakäsittely saadaan aikaan alennetussa paineessa synnytetyn plasman avulla. Inerteillä kaasuilla on joko puhdistava tai ristisilloittava vaikutus. Happipitoisilla plasmoidilla pintaan synnytetään karboksyyli-rakenteita, ts. pinta tulee hydrofiilisemmäksi karboksyyli-rakenteiden hydrolyysin kautta. Typpipitoisilla plasmoidilla lisätään biohteensopivuutta (aminorakenteet). Fluoridipitoisilla plasmoidilla pintaa saadaan hydrofobisemmäksi (teflon-ilmiö). Plasmamodifioitujen pintojen säilyvyys on rajallista. Vaikutus säilyy yleensä joitakin viikkoja.

Fysikaalisissa pinnoitusmenetelmissä on kyse polymeeripinnoitteiden valmistamisesta alennetussa paineessa kaasufaasin kautta eli PVD (Physical Vapor Deposition) tai CVD (Chemical Vapor Deposition) -menetelmistä [5].

5.2 Mikrofluidistiikan komponenttien erityisominaisuudet ja niiden määrittäminen

Mikrofluidistiikan komponenteilta vaaditaan erityisominaisuuksia, joita ei tavata lainkaan makromaailmassa, tai joiden merkitys makromaailmassa on vähäinen. Materiaalien pintaominaisuudet, optiset ominaisuudet, sekä kaasujen ja nesteiden läpäisevyys ovat keskeisiä näistä ominaisuuksista.

Pinnankarheus ja pintaenergia ovat keskeiset fluidistiikkakomponenttien pintaominaisuuksiin vaikuttavat tekijät. Materiaalien hydrofiilisyyden / hydrofobisuus, kostutusominaisuudet ja molekyylien kiinnitettavuus on johdettavissa näistä kahdesta pintojen perusominaisuudesta. Sekä pinnankarheutta että pintaenergiaa voidaan tarvittaessa modifioida ja siten hyödyntää laitteiden toiminnassa.

Kaupallisten muovien optiset ominaisuudet ovat hyvin materiaalispesifisiä. Muoveihin yleisesti lisättävät lisä- ja täyteaineet vaikuttavat oleellisesti näihin ominaisuuksiin. Muovien valmistajakohtaisissa kauppalaaduissa on suuria eroja juuri lisäaineiden suhteen. Mikro-

fluidistiikan sovelluksissa ei siten riitäkään muovityypin määrittely pelkän peruspolymeerin nimen perusteella, vaan materiaali olisi aina määriteltävä tarkemmin. Materiaalin lisäksi optisiin ominaisuuksiin vaikuttaa myös käytetty valmistusmenetelmä. Eri menetelmät muokkaavat tai rikkovat polymeerirakennetta eri tavoin, mikä vaikuttaa oleellisesti materiaalin ominaisuuksiin.

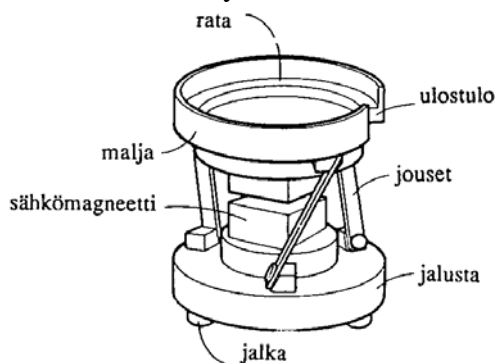
Monet mikrofluidistiikan tuotteissa käytetyt pintakäsittelyt ja niihin varastoidut analyysikemikaalit ovat usein herkkiä kosteudelle tai tietyille kaasuille. Materiaalien kaasujen ja höyryjen läpäisevyys on siten huomioitava materiaalinvalinnassa ja tuotteiden pakkauksessa. Muovimateriaalien kaasun- ja höyrynläpäisevyysominaisuuksia on tutkittu ja testattu erittäin paljon mm. elektroniikkateollisuuden tarpeisiin. Kyseinen testausdata on käyttökelpoista myös mikrofluidistiikan komponenttien pitkäaikaiskestävyyden ja varastoitavuuden kannalta.

Mikrofluidistiikkaan perustuvien tuotteiden tuotantoon liittyvistä seikoista ei juuri löydy kirjallisuutta. Esim. lab-on-a-chip-laitteiden laaduntarkastuksesta, valmistustoleransseista tai ko. tuotteille sopivista pakkaustekniikoista ei ole raportoitu juuri lainkaan. Tämä kertonee alan uutuudesta ja siitä, että massatuotantovaiheessa olevia tuotteita ei vielä juurikaan ole markkinoilla [6].

6 WP 4. Mikromekaanisten komponenttien kokoonpano ja käsittely

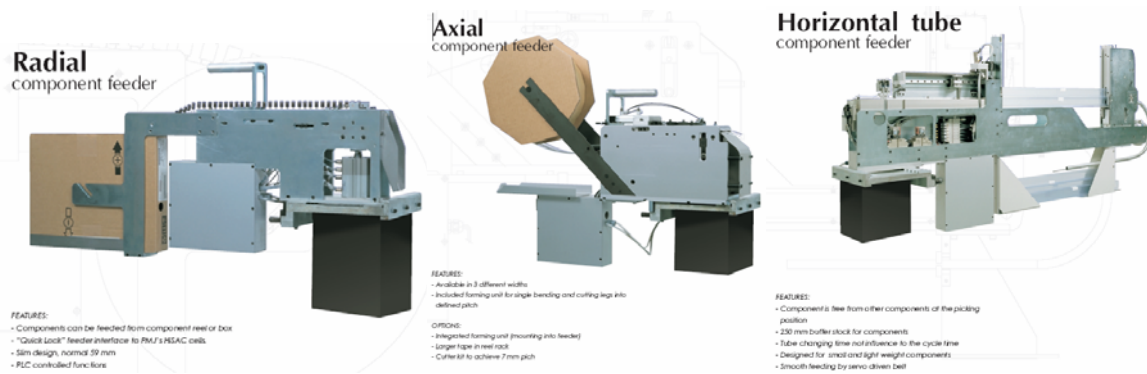
6.1 Mikromekaanisten tuotteiden kokoonpanon laiteratkaisu

Syöttötapahtuma voidaan jakaa karkeasti neljään eri perustoimintoon: varastointiin, kuljetukseen, asemointiin ja osien luovuttamiseen. Pienten osien syötössä tärkein syöttölaite on tärysyötin (kuva 10), jonka avulla epäjärjestyksessä olevat osat saadaan toimitettua yksitellen haluttuun paikkaan ja asentoon kappaleenkäsittelylaitteen poimittavaksi. Tämä tekniikka on ns. automaattisista syöttölaitteista eniten käytetty myös mikrotuotteiden osien syötössä. [7]



Kuva 10. Lieriötärysyötin. [7]

Elektroniikkateollisuudessa käytetään useimmiten erilaisilla makasiineilla järjestetyssä muodossa tapahtuvaa syöttöä, esim rullat, blister-teipit ja putkimakasiinit (kuva 11). Suuri osa elektroniikkateollisuudessa käytettävistä syöttölaitteista soveltuu myös mikrokokoonpanon syöttölaitteiksi. Myös pienille ja protosarjoille kehitetyt Gel-Pak -ratkaisut soveltuvat mikrokokoonpanon osille. [7]



Kuva 11. Radiaali-, aksiaali- ja horisontaali putkisyöttölaite. [7]

Joustava syöttölaite on osien käsittelyjärjestelmä, joka voidaan helposti ja nopeasti modifioida syöttämään erilaisia osia kokoonpanorobotille (kuva 12). Kun perinteiset syöttölaitteet tyypillisesti räätälöidään syötettäville kappaleille sopiviksi, erityisesti kappaleen asennon määrittäminen tapahtuu kappaleen geometriasta riippuvilla mekaanisilla ratkaisulla, joustavissa syöttölaitteissa kappaleesta riippuvista mekaanisista ratkaisuista on pyritty luopumaan. Tyypillisesti kappaleiden aseman ja asennon määrittäminen tapahtuu konenäön avulla ja kappaleiden poiminta robotilla. Useat valmistajat tarjoavat erilaisia joustavia syöttölaiteratkaisuja ja lähes jokaiselta konenäkö/robotijärjestelmäintegraattorilta löytyy jonkinlainen ratkaisu joustavaan osien syöttöön/kokoonpanoon. Konenäöllä varustettujen joustava syöttölaite -kokoonpanorobotiratkaisujen poimintanopeudet ovat yleensä yhdestä sekunnista ylöspäin. [7]



Kuva 12. Joustava syöttölaite Mikron polyfeed. [7]

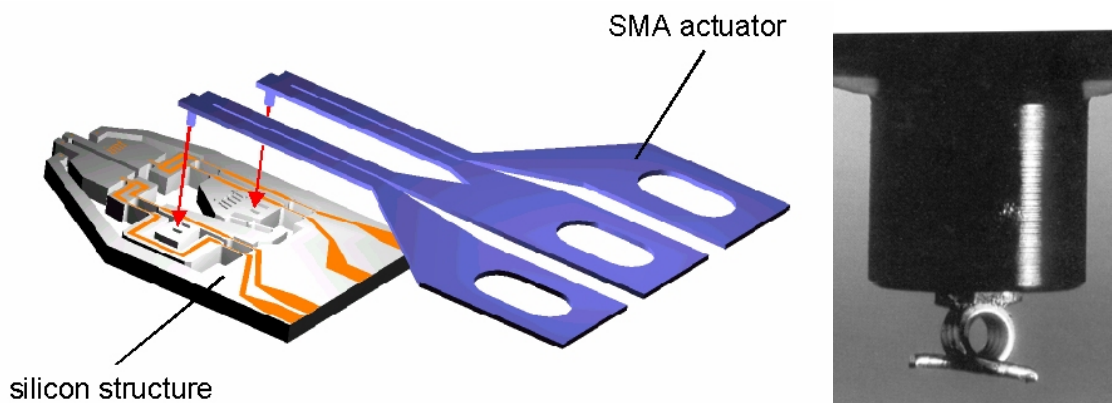
Mini- ja mikrokokoonpanoon liittyviltä tarraimilta vaaditaan osien pienuuden, paikoitustarkkuuden ja herkkyuden vuoksi paljon enemmän kuin perinteiseen kokoonpanoon tarkoitettuilta tarttujilta. Tarttujan tulisi olla paikoitukseltaan tarkka paikoitusnopeuden kuitenkin säilyessä hyvänä. Robotin käsivarteen liitetyn tarraimen paikoitustarkkuus ei pelkästään riitä, vaan tartunnan kappaleeseen täytyy olla tarkka ja toistettavissa, mikä usein on hankalaa mm. adheesivoimien vaikutuksesta. Myös tartuntavoimien täytyy olla oikeassa suhteessa kappaleen herkkyteen: ei niin suuri, että kappale vahingoittuisi, mutta kuitenkin riittävä, että kappaleen asento säilyy siirtojen aikana [7].

Mini- ja mikrotarraimet voidaan jakaa toimintaperiaatteen perusteella kolmeen eri ryhmään: Tarraimet, joissa on liikkuvia osia, tarraimet, joissa ei ole liikkuvia osia sekä kosketuksettomat tarraimet. Tarraimissa, joissa on liikkuvia osia, käytetään yleensä kitkaa tai muotosulkeisuutta hyväksi tartunnassa. [7].

Liikkuvilla osilla varustettujen mini- ja mikrotarraimien kehittäminen näyttää keskittyneen erilaisiin älymateriaalisovellutuksiin niiden lupaavien ominaisuuksien vuoksi. Älymateriaalien etuina perinteisiin mekanismeihin verrattuna ovat toimilaitteen yksinkertaisuus ja pieni koko. Ongelmina on ollut löytää materiaaleja, jotka tuottavat riittävän suuren liikkeen riittävällä voimalla ja nopeudella.

Tarraimissa, joissa ei ole liikkuvia osia, kappaleen siirtoon tarvittava ote saadaan aikaan esim. alipaineella tai pintajännityksen avulla, adheesiolla tai jäädyttämällä (kuva 13). Erityisenä ongelmana tämän tyyppisissä tarttujissa saattaa olla kappaleen paikannus. Kappaleen paikka tarttujan päässä ei ole täsmällinen, koska luonnollista keskitystä ei välttämättä tapahdu. Hyötyinä on yksinkertaisuus ja yleensä hellä tartunta. Paikannuksen parantamiseksi on tarrainten tartuntapäitä pyritty suunnittelemaan enemmän keskittäviksi. Mikrotarttujia, joissa ei ole liikkuvia osia, on tutkittu paljon. Tulevaisuudessa tarkempien tarraimien tarve kasvaa.

Kosketuksettomissa tarraimissa liikuteltava komponentti laitetaan leijumaan tarttujan periaatteesta riippuen sähkömagneettisesti, elektrostaattisesti, optisesti tai ilmanpaineen vaihtelujen avulla. Kosketuksettomat tarraimet sopivat erityisen hyvin herkille ja erittäin pienille osille. Tarraimien suunnittelussa pintavoimien hallitsemiseksi neljä strategiaa: vähentäminen, voittaminen, hyväksikäyttö ja välttäminen. Kosketuksettomissa tarraimissa strategiana on välttää pintavoimat, kun kappaleeseen ei kosketa [7].



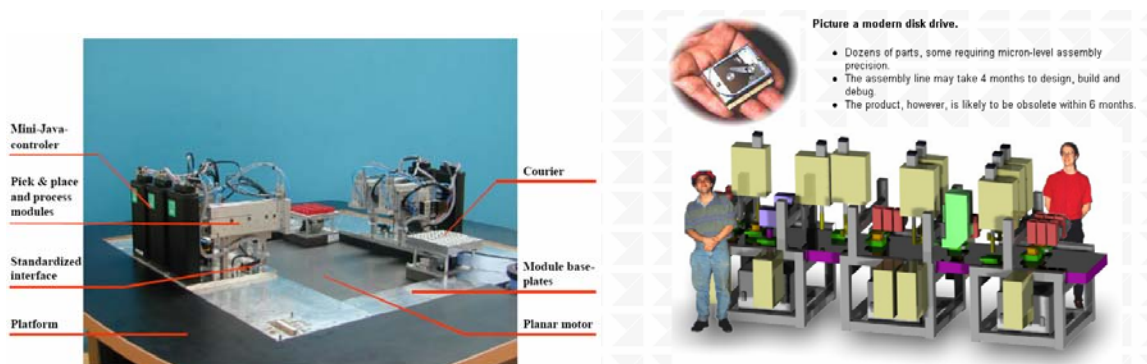
Kuva 13. SMA-toimilaite ja jäätarttuja

Mikrokokoonpanon päällimmäinen erityispiirre on tuotteiden ja ennen kaikkea osien pienuus. Vähintäänkin niissä on hyvin pieniä piirteitä. Sen seurauksena kokoonpanon tarkkuusvaatimukset ovat tavallista suuremmat. Osien pienentyessä kappaleiden fysikaalinen käyttäytyminen muuttuu, adheesiovoimat tulevat merkittäviksi, gravitaatiovoimat eivät välttämättä ole enää vallitsevia. Lisäksi valmistuksen prosessit muuttuvat, erityisesti kokoonpanoon liittyvät liittämismenetelmät: mukaan tulevat vahvasti liimaus, erilaiset juotostekniikat, mikrohitsaustekniikat, laserliittäminen ym. Kappaleiden pienenemisen myötä myös ympäristövaatimukset lisääntyvät, prosessit vaativat ympäristöltä puhtautta ja suojausta mm. tärinää ja lämpötilamuutoksia vastaan. Nämä kaikki johtavat yleisesti käytetyn tekniikan ääriarjoille ja niiden ulkopuolelle vaatien erityisiä järjestelyjä ja uudenlaista tekniikkaa.

Mikrokokoonpanon kokoonpanolaitteissa voidaan nähdä joitakin tyypillisiä piirteitä verrattuna perinteiseen kokoonpanoon. Yksi piirre on konenäön laaja soveltaminen asemoinnin osana ja tavallisesti kameroita on useita. Kameroita sijoitetaan robotin käsivarteen, usein poiminta- ja asennuskohtaa voidaan tarkastella kameroilla päältä, sivulta ja altpäin sekä tarraimen läpi. Konenäön avulla selvitetään runkokappaleen ja asennettavien kappaleiden

asentoja ja sijainteja. Lisäksi konenäköä voidaan käyttää laadun ja kokoonpanoprosessin valvonnassa. Muitakin antureita voidaan käyttää kokoonpanon apuna, mm. voima-antureita. Mikrokokoonpanossa kokoonpanorobotissa itsessään on harvoin kuusi vapausastetta, mutta liikeakselien määrä saattaa järjestelmässä olla huomattavan suuri. Akseleita on erikseen pidemmille siirtomatkoihin ja tarkkaan paikoitukseen. Liikeakselit ovat pääsääntöisesti lineaarisia. Päämanipulaattorin lisäksi akseleita voi olla tarraimissa, kappaleiden poimintapöydissä; voidaan käyttää myös pieniä apumanipulaattoreita, esim. kappaleen kääntämiseen. Liikeakseleita valittaessa edessä on tarkkuus-liikemata-nopeus-dilemma. Kokoonpanon vaatimuksista riippuen liikeakseleiden toteutustavat vaihtelevat hammashihnakäyttöistä kuularuuveihin ja lineaarimoottoreihin. Tarkoissa sovelluksissa käytetään tyypillisesti kivipöytiä ja ilmalaakerointia. Tyypillisesti tarkimmat lyhyet liikkeet tehdään pietsotoimilaitteilla, joissa on joustavat nivelet (flexures). Ympäristön puhtaus on usein toteutettu solun laitekaappiin rakennetulla jonkinasteisella puhdistilalla.

Pienten tai mikrotuotteiden kokoonpanossa yksi kehitysalue on ollut erilaiset minitehdaskonseptit (kuva 14) [7].



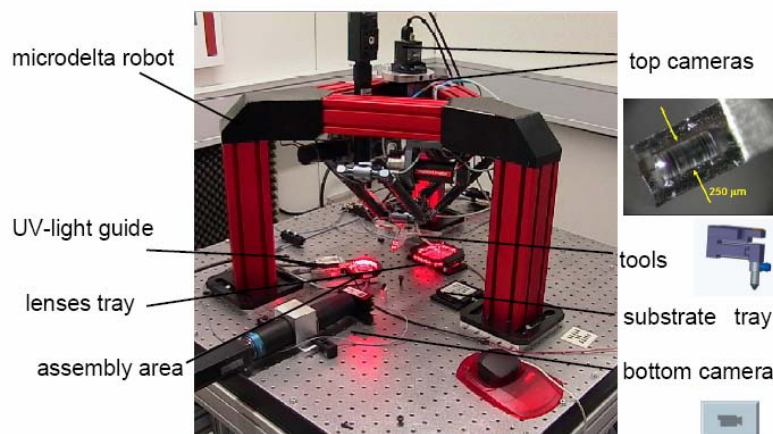
Kuva 14. Miniprod- ja Minifactory-minitehdaskonseptit.

Fraunhofer IPA:n Miniprod-konseptissa on pyritty modularisoimaan ja miniatyrisoimaan laitteiden komponentit. Järjestelmä perustuu pieneen ja kompaktiin prosessiin sekä kokoonpanomoduuleihin, joita on asennettu tuoteriippumattomaan alustaan ”plug and produce”-periaatteen mukaisesti käyttäen standardisoituja liityntöjä. Käyttäjä voi valita eri moduuleista sovellukseen tarvittavat yksilöt ja kokoonpanna miniatyrisoidun tuotantolinjan. Moduulien liitännät ja materiaalinkäsittelyn komponentit on suunniteltu siten, että muutokset valmistusjärjestelmässä voidaan tehdä nopeasti. Energiaa ja tietoa voidaan siirtää integroitujen konfiguroitavissa olevien liityntöjen kautta. Yksittäisten kokoonpanosegmenttien ydinelementtinä on planaarimoottori. Jokaisen planaarimoottorin päälle voidaan tapauksesta riippuen asentaa ja konfiguroida useita kuriireja. Kuriirit liikkuvat kitkattoman ilmalaakeroinnin päällä. Osien kuljetinalustat (tarjottimet), joissa kuljetetaan tuotteita ja komponentteja, voidaan kuljettaa joustavasti useisiin koneistus- tai prosessointiasemiin yksittäisillä kuriireilla. Erottamalla tuotantoyksiköt on mahdollista varustaa yksittäiset segmentit puhdistiloilla ja erottaa ne likaisista alueista [7].

Minifactory on Carnegie Mellon yliopiston Agile Assembly Architecture, AAA-projektiin liittyvä minikokoonpanojärjestelmäkonsepti. AAA on tuotantoarkkitehtuuri, jonka tarkoituksena on lyhentää monimutkaisen tarkkuustuotteen, kuten kovalevyn, prototyyppi-tuotantovaiheesta varsinaiseen tuotantovaiheeseen kuluva aikaa kuukausista viikkoihin tai jopa päiviin. Tuotantolinjan suunnittelussa käytetään apuna simulointia ja laitteiden 3D-malleja. Suunnitteluun liittyviä tietoja pidetään yllä reaaliaikaisesti internetin välityksellä. Automaattiset kalibrointiprosessit nopeuttavat tuotantolaitteiden käyttöönottoa.

Minifactory-järjestelmä perustuu helposti toisiinsa liitettäviin modulaarisiin komponentteihin, kuten suuren tarkkuuden kiinnitysistukat, kiinnityssillat modulaarisia robottielementtejä varten, kahden vapausasteen tarkkuusmanipulaattorit jne. Aktiiviset kuriiriagentit (liikkuvia paletteja) kuljettavat tuotteita tuotantolinjalla ja ottavat osaa sekä kokoonpano- että kiinnitysoperaatioihin. Järjestelmän manipulaattoriagentit taas huolehtivat poiminnasta ja paikoituksesta [7].

Sveitsiläinen tutkimuslaitos CSEM on kehittänyt hyvin tarkan ja nopean kokoonpanorobotin. Sen toistotarkkuus suoravetomoottoreita käytettäessä on alle 2 μm ja nopeus 3 sykliä/s. Kuvassa 15 olevassa sovelluksessa robottia käytetään asentamaan halkaisijaltaan 250 μm ja pituudeltaan 500 - 800 μm olevia linssejä piille etsattuihin uriin [7].



Kuva 15. CSEM:n nopea ja tarkka kokoonpanorobotti [7].

Optoelektronikan valmistamisessa pieniä lasi- tai metalliosia asetetaan tarkasti paikalleen ja liitetään juottamalla, hitsaamalla tai liimaamalla toisiinsa. Optoelektronikan ja perinteisen elektronikan kokoonpanossa on paljon yhtäläisyyksiä, mutta myös selkeitä eroavaisuuksia.

Valokuitukomponentit voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin komponentteihin. Aktiiviset komponentit käsittävät valonlähteenä toimivan puolijohdelaserteknologian. Aktiiviset komponentit ovat yleensä helpompia asennettavia. Passiivikomponentit toimivat valon kulkiessa niiden läpi eivätkä vaadi muuta energiaa tai elektroniikkaa. Niiden tehtävänä on suodattaa, jakaa tai yhdistää kuiduissa kulkevia valosignaaleja. Nämä komponentit vaativat enemmän työtä ja ovat kalliimpia valmistaa. Kolme yleisintä tapaa kiinnittää optisia komponentteja kokoonpanoon ovat liimaaminen, laserhitsaus ja juotto. Valokuidun kiinnittämistä komponenttiin kutsutaan yleisesti nimellä pigtailing.

Kokoonpanon vaikeuden vuoksi saanto on usein erittäin huono, 20 – 30 prosentin saanto ei ole harvinainen. Voidaan sanoa, että saanto ja läpimeno yksin määräävät automaation investoinnit. Kohdistustarkkuusvaatimusten sekä komponenttien usein hankalien dimensioiden vuoksi automaatioaste optoelektronikan tuotannossa on pysynyt hyvin matalana verrattuna muuhun elektroniikkaan. Paikoitustarkkuus on yleensä mikrometrejä ja usein jopa alle yhden mikrometrin. Suuri osa optisesta kokoonpanosta joudutaan tekemään puhdastiloissa, koska komponenttien liitokset ovat arkoja likaantumiselle. Paketointi vastaa 60–90 % optisen komponentin valmistuskustannuksista.

Kokoonpanostandardien ja testiproseduurien puuttuminen on vaikeuttanut optoelektronikan tuotteiden kokoonpanoa ja tehnyt suursarjatuotantoon siirtymisen vaikeaksi.

Markkinoilla on tarjolla suuri määrä manuaalisia, puoliautomaattisia ja automaattisia alle mikrometrin tarkkuuteen kykeneviä paikoituslaitteita (kuva 16). [7]



Kuva 16. SUSS FC250 -tarkkuuskokoonpanosolu ja puoliautomaattinen Flip Chip -bonderi OPUS Model 100. [7]

Yli 75 % valokuitukomponenteista kokoonpannaan tällä hetkellä manuaalisesti. Valokuituteollisuus on siirtymässä kohti suurempivolyymisia puoli- ja täysautomatoituja järjestelmiä. Helpommin koottavia komponentteja ja menetelmiä kehitetään. Suurnopeuspaikannuslaitteet mahdollistavat optisten komponenttien kohdistamisen, kiinnittämisen ja testaamisen korkeammilla nopeuksilla kuin aikaisemmin. Pienempivolyymiseen joustavaan kokoonpanoon on tarjolla semi-automaattisia kokoonpanosoluja ja modulaarisia alustoja, jotka ladataan erien mukaan. Seuraava askel on linkittää nämä solut yhteen yhdeksi jatkuvaksi in-line-prosessiksi, joka muistuttaa puolijohdteollisuuden suurinopeuksisia laitteita.[7]

6.2 Pienten ja mikroskooppisten osien asemointi konenäöllä

Mikromekaniikan automaattisissa käsittelylaitteissa anturipohjainen takaisinkytkentä on tullut yhä tarpeellisemmaksi. Vaikka kokoonpantavat kappaleet toimitettaisiinkin erikoispaleteissa, kaseteissa tai nauharullissa, toleranssit ovat usein niin tiukat, että kokoonpanovaiheessa pitää tarkistaa komponenttien paikka ja asento, eräissä sovelluksissa jopa liikkeen aikana. Anturointivaihtoehdoista konenäkö on potentiaalisin. Yksi sen houkutteleva ominaisuus on kosketuksettomuus. Mikrorobotiikassa konenäköä käytetään yleisesti myös robotin asema-anturina. Sitä voidaan käyttää myös kokonaisjärjestelmän ohjaukseen, eli mikromanipulaatioissa kaikki tapahtumat voidaan kuvata muutamalla kameralla. [8]

Asemoinnin konenäköjärjestelmään osioita ovat kuvantamisjärjestelmä ja hahmontunnistus. Asemoitavien kappaleiden ominaisuudet, kuten koko, muoto, materiaali jne. vaikuttavat ratkaisevasti valittavaan kuvantamisjärjestelmään. Toisaalta kappaleenkäsittely-ympäristö asettaa vaatimukset tarkkuudelle sekä tarvittavien koordinaattien määrälle (2-D vs. 3-D).

Kuvausjärjestelmänä 2-D kuvaaminen on edelleen vallitseva tekniikka konenäköjärjestelmissä. 2-D intensiteetikuvilla käsitetään yleisesti harmaasävy- ja värikuvia. Yhdestä 2-D kuvasta voidaan vain päätellä kuvattavan kohteen 2-D projektio.

Optiset 3-D-mittausmenetelmät voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin. 3-D-kuvantamisessa lopputulos voi olla ns. etäisyyskuva tai -kartta tai kolmiulotteinen tilavuusmalli. Etäisyyskuvassa kuvaelementin arvo esittää kyseisen pintaelementin etäisyyttä kuvaajasta. Mikroskooppisille ja pienille kappaleille soveltuvia 3-D-kuvantamismenetelmiä ovat syvyysterävyyden hyödyntäminen skannaamalla tai kohdan terävyydettä tarkastelemalla, Moire-ilmiö, varjojen analysointi, stereonäkö ja strukturoidun valaisun käyttö kolmiomittauksen yhteydessä.

Kuvantamisjärjestelmä rajoittaa käytettävissä olevien hahmontunnistusmenetelmien määrää. Toisaalta kaupalliset menetelmät pystyvät lähinnä vain kaksiulotteiseen asemointiin. Kolmiulotteinen asemointi on vielä tutkimus- ja kehitysvaiheessa ja tästä alueesta saadaan uusia tuloksia jatkuvasti. Kokoonpanojärjestelmässä on yleensä lähtökohtana, että kokoonpantavat tai käsiteltävät osat ovat entuudestaan tunnettuja. Tästä johtuen hahmontunnistuksen tavanomaista ensimmäistä vaihetta, eli kohteen identifiointia, ei tarvitse tehdä pelkässä asemoinnissa. Hahmontunnistusmenetelmiä on kehitetty tunnistamaan ja asemoimaan kappaleita kahdessa ja kolmessa ulottuvuudessa. Kaksiulotteinen kappaleen asemointi on kappaleen paikan ja kiertymän mittauksista intensiteetikuvasta. Paikka ilmoitetaan kahtena kuvakoordinaattina ja kiertymäkulmana. Kolmiulotteisessa hahmontunnistuksessa kappaleen paikka mitataan kolmen koordinaattiakselin suhteen ja asento kiertymänä näiden ympäri. Kaksiulotteisessa tapauksessa voidaan kappaleella ajatella olevan kolme vapausastetta (kaksi liikesuuntaa ja yksi kiertymä), kun taas kolmiulotteisessa tapauksessa vapausasteita on kuusi (kolme liikesuuntaa ja kiertymä).

Tässä hankkeessa hahmontunnistuksen menetelmät voidaan tyypillisesti rajoittaa mallipohjaiseen hahmontunnistukseen - ennen tunnistusta tai asemointia on kuvattavista kappaleista tallennettu etukäteistietoa tai käytettävissä on esimerkiksi CAD-tietoa. Mallin rakentamista valittujen opetuskappaleiden avulla kutsutaan hahmontunnistusjärjestelmän opettamiseksi. Opettamisessa perinteisin tapa on käyttää tunnistustehtävässä käytettävää kuvantamisjärjestelmää opetusdatan hankkimiseen. Toinen vaihtoehto on käyttää laskennallista dataa, esimerkiksi CAD-mallista laskettuja tietoja. Mallipohjaiseen hahmontunnistukseen soveltuvia menetelmiä on lukuisia ja ne eroavat toisistaan hyvinkin paljon. Suurimmat eroavaisuudet tulevat siitä, minkä tyyppistä kuvantamisjärjestelmää varten menetelmä on kehitetty sekä siitä mitkä ovat tunnistuksen vaatimukset ja tulokset. Kuvantamisjärjestelmän ominaisuudet taas määräytyvät siitä, minkä tyyppisiä kappaleita ollaan käsittelemässä.

Automaattinen hahmontunnistus sekä aseman ja paikan mittaus visuaaliseen informaatioon perustuen on monimutkainen ja vaikea tehtävä. Ihmiseltä tämä tehtävä onnistuu luonnostaan ja ihminen on tässä tehtävässä erittäin robusti, nopea ja pystyy tunnistamaan valtavan joukon eri hahmoja. Ihmisen näön ja näkymän ymmärtämisen tutkimus on edelleen kesken. Ratkaiseva käännekohta hahmontunnistuksessa lienee silloin, kun ihmisen näköjärjestelmän toimintaa ymmärretään paremmin ja pystytään mallintamaan riittävällä tarkkuudella.

7 WP 5. Aktiiviset ja älykkäät materiaalit mikromekaniikan toimilaitteissa

7.1 Potentiaalisten aktiivimateriaalien arviointi mikromekaniikan näkökulmasta

Aktiivimateriaalit kykenevät muuttamaan muotoa ja tuottamaan liikettä. Tyypillisiä aktiivimateriaaleja ovat (1) pietsokeraamit (PZT), (2) magnetostriktiiviset (MS) materiaalit, (3) muistimetallit (SMA), (4) magneettiset muistimetallit (MSM) ja (5) elektroaktiiviset polymeerit (EAP). Aktiivimateriaalien käytöllä pyritään yksinkertaistamaan rakennetta. Yksinkertainen rakenne on kevyt ja toimintavarma. Usein aktiivimateriaalista rakennettu aktuaattori korvaa sähkömoottorin tai pneumaattisesti taikka hydraulisesti toimivan monimutkaisen toimilaitteen. Joissain tapauksissa aktiivimateriaaleista voi rakentaa myös mikroaktuaattoreita mikromekaniikan tarpeisiin. Tässä raportissa mikroaktuaattorilla tarkoitetaan toimilaitetta, jonka koko on alle 10x10x10 mm.

Projektissa tarkasteltiin tyypillisiä aktiivimateriaaleja liikkeen tuottamisen kannalta [9]. Kirjallisuuden ja käytännön kokemusten perusteella päädyttiin siihen, että erityisesti case-sovelluksia ajatellen Mikromasina-projektissa parhaimmat aktuaattoriehdokkaat ovat pietsokeraamit (PZT), muistimetallit (SMA) ja elektroaktiiviset polymeerit (EAP), taulukko 4.

Taulukko 4. Yleisiä mikroaktuaattorille asetettavia vaatimuksia Mikromasina -projektissa ja tyypillisten aktiivimateriaalien tarjoamat mahdollisuudet. PZT: pietsokeraamit, MS: magnetostriktiiviset materiaalit, SMA: muistimetallit, MSM: magneettiset muistimetallit ja EAP: elektroaktiiviset polymeerit.

Mikroaktuaattori	PZT	MS	SMA	MSM	EAP
Suurin koko 10x10x10mm	kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä
Edullinen yksikköhinta	kyllä	ehkä	kyllä	ehkä	kyllä
Hyvä saatavuus	kyllä	ehkä	kyllä	ehkä	ehkä
Liike lineaarista ja toistettavaa	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
Liike taipumista ja toistettavaa (optio)	kyllä	ei	kyllä	kyllä	kyllä
On valmistettavissa pinnoitteena (optio)	kyllä	ehkä	ehkä	ei	kyllä

8 WP6. Yritysten case / demo -sovellukset

8.1 Abloy-case - Mikromekaniikkaan soveltuvat toimilaitteet ja niiden kriittiset parametrit liikkeen tuottamisessa

Abloy Oy:lle tehdyn case-tutkimuksen tarkoitus oli selvittää uusien älykkäiden funktionaalisten materiaalien päivän tilanne ja kehitystrendit sekä mahdollisuudet näiden materiaalien käyttämiseen Abloy Oy:n uuden sukupolven sähkömekaanisten lukkorunkojen toimilaitteena [10].

Abloy Oy:lle sopivan toimilaitteen tuli täyttää ainakin seuraavanlaiset päävaatimukset:

- aktuaattorina varsi, jonka liike on 2 mm (sallitaan 6°:en kierto),
- voiman tuotto 5 N koko matkan ajan,
- liikeaika 0,15 s,
- energian käyttö 70 mJ,
- toimintaympäristönä sisä- ja ulko-ovet. Aktuaattorin täytyy toimia lämpötilassa -35...+70 °C,
- rakenteen täytyy kestää toistoja 500 000 sykliä,
- käytettävissä on tila 28 * 40 * 100 mm³ (paksuus, so. oven paksuus * kolon syvyys * korkeus) (käytännössä mieluiten kahden ensimmäisen mitan tulisi olla 17 mm * 27 mm).

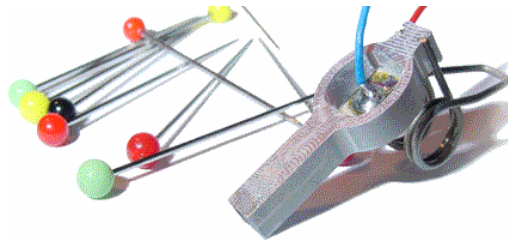
Työssä vertailtiin neljää potentiaalista aktuaattorivaihtoehtoa: Dielectric EAP (elektroaktiivinen polymeeri), SMA-lanka (muistimetallilanka), Elliptec (lineaariliikkeen pietsomoottori), Shinsei (pyörivä pietsomoottori) ja referenssinä soveltuvin osin perinteinen miniatyyrikokoinen sähkömoottori. Toimilaittevertailun tuloksena laitettiin aktuaattorit paremmuusjärjestykseen ilman painotettuja pisteityksiä. Yleisesti voidaan todeta, että aktiivimateriaaliaktuaattorien integrointi rakenteeseen vaatii yleensä aina perusteellista tutkimusta, vaikka aktuaattori olisi jo kaupallistettu, kuten esim. tapauksissa Dielectric EAP ja Elliptec.

Dielectric EAP:n kehitystyön on tehnyt SRI International, USA ja sitä tuotteistaa yhtiö nimeltä Artificial Muscle, Inc. (AMI), USA [www.artificialmuscle.com]. Dielectric EAP puristuu kasaan ja laajenee kahden elektrodin välissä, sillä erivarauksiset elektrodit vetävät toisiaan puoleensa. Dielectric EAP:n toimintaperiaate on erittäin yksinkertainen. Dielectric EAP on joustava ja elastinen. Sen venymä on erittäin suuri, jopa yli 300 %, kun se on ensin esijännitetty. Siksi Dielectric EAP:stä käytetään nimitystä Artificial Muscle - keinotekoinen lihas. Näin suurta liikettä ei tarvitse vahvistaa, joten erilaiset vipuvarret ja voimansiirrot ovat tarpeettomia. Liikkeen suunta on muotoilusta kiinni, kuva 17.



Kuva 17. Kuvassa oleva tankomainen Dielectric EAP -aktuaattori on muotoiltu siten, että se taipuu haluttuun suuntaan [10].

Elliptec perustuu noin 0,1 % laajenevaan pietsoelementtiin, joka yksin tuottaa suuren voiman, mutta aivan liian pienen mikroliikkeen toimiakseen moottorina. Ideana Elliptecin moottorissa on ohjata pietsoelementtiä ultraäänitaajuisella jännitteellä ja saattaa näin koko alumiinista valmistettu erikoismuotoiltu runko värähtelemään siten, että rungon kärki muodostaa elliptisen liikkeen, kuva 18.



Kuva 18. Elliptec-pietsomoottori [10].

Kun rungon kärki painetaan (käytetään hyväksi Elliptecissä mukana olevaa joustaa) liikuttamaan elementtiin, se liikkuu jokaisella kärjen kierroksella muutaman mikrometrin. Nämä mikroliikkeet ovat niin pieniä ja nopeita, että saadaan aikaan suhteellisen tasainen liike. Elliptec liikkuu eteenpäin, kun taajuus on noin 85 kHz ja taaksepäin, kun taajuus on noin 95 kHz.

Moottorin nopeuden säätämiseen ei tarvita yleensä vaihteistoa. Elliptec-moottorilla saadaan suoraan aikaan nopeudet 0-300 mm/s säätämällä kontrollielektronikan parametreja. Jokaisella moottorin kärjen oskillaatiolla Elliptec-moottori työntää kohdetta muutaman mikrometrin. Moottorilla voidaan askeltaa yksittäisiä askelia 10 - 20 mikrometrin tarkkuudella.

Elliptec-moottori on 2 cm pitkä ja 3 mm leveä. Elliptec painaa vain 1,2 g, joten se sopii hyvin kannettaviin laitteisiin. Elliptec pystyy toimimaan äänettömästi, toimintataajuus on 100 kHz:n alueella.

8.2 Arctic-case & demonstraatio - Selvitystyö mikrofluidistiikan komponenttien liittämismenetelmistä

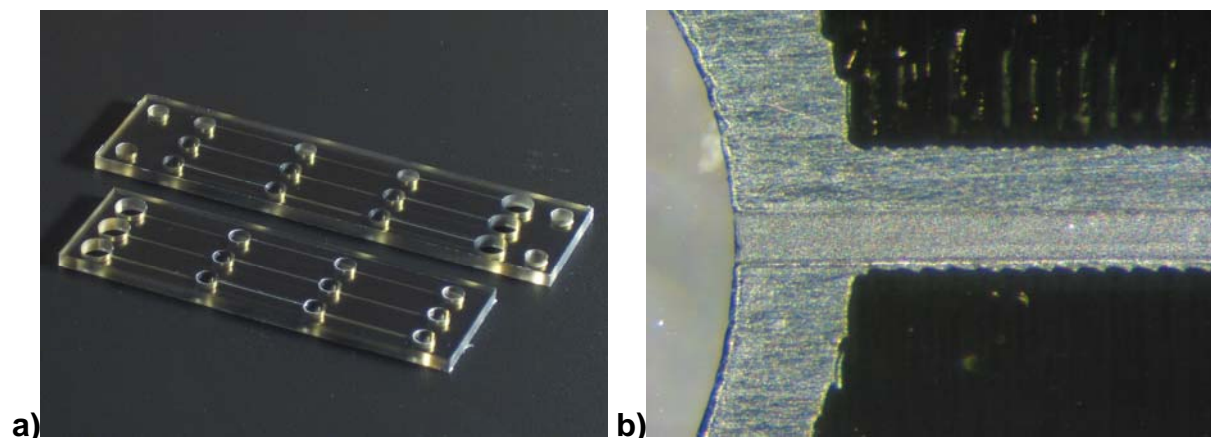
Arctic Diagnostics:n case-sovellukseen liittyvissä tutkimuksissa selvitettiin kokeellisesti ns. fluidistiikkachipin pohjan ja kannen liittämiseen soveltuvia menetelmiä.

Tehdyissä liitoskokeissa käytettiin periaatteeltaan neljää erilaista liittämismenetelmää: liimausta, liimakalvon avulla tapahtuvaa liittämistä, termistä liittämistä ja laserhitausta. Liiman levitykseen käytettiin useita erilaisia menetelmiä manuaalisesta dispensauskuksesta Spin-Coating -tekniikkaan. Liitettävänä materiaaleina käytettiin kaupallisia näytekaivomatriiseja (materiaaleina PS ja PPo+PS) ja projektin aikana ideoituja ja valmistettuja proto-chippejä (materiaalina PC). Kansimateriaaleina käytettiin useita erilaisia optisilta ominaisuuksiltaan laadukkaita muovi- (PS, PC, COC) ja lasilevyjä.

Parhaisiin tuloksiin päästiin laserhitausta käyttäen, kuva 19. Laserhitsatut PC-muoviliitokset olivat täysin tiiviitä ja erittäin lujia. Hitsaamalla liitetty proto-chip osoittautui tehdyissä kokeissa toimivaksi; sen kaikki hitsisaumat olivat tiiviitä ja nesteen läpivirtaus toimi siinä halutulla tavalla. Myös projektin lopussa tehdyt termiset liitokset vaikuttivat erittäin hyviltä, vaikka niitä ei ehditty tarkemmin testaamaan.

Laserhitauksen käytön edellytys on riittävän tarkkaan paikoitukseen pystyvä ja muovien läpäisyliitostekniikkaan soveltuva laserhitauslaitteisto. Sopivia lasereita ovat lähes kaikki 800-1100 nm:n aallonpituusalueella toimivat jatkuvatoimiset laserit (diodi-, Nd:YAG- ja kuitulaserit). Laserhitauksen käyttö on otettava huomioon myös materiaalinvalinnassa. Edullisinta on valita samaa polymeeriä (esim. PC, PS, PMMA) oleva kansi- ja pohjalevy niin, että pohjalevy on mustaa lasersädettä absorboivaa materiaalia ja kasilevy puolestaan läpinäkyvää. Hitsauksen onnistuminen edellyttää myös hitsattavilta kappaleilta hyvää mittatarkkuutta ja liitospinnoilta tasomaisuutta.

Liimauskokeet osoittivat, että minkään kokeillun liimaustekniikan tuonti tuotantomittakaavaan soveltuvaksi liittämismenetelmäksi ei ole helposti ratkaistavissa. Liimaliitoksissa ilmenneitä ongelmia olivat mm. liimakerroksen epätasaisuus, liiman taipumus tukkia kanavat ja liitosten heikohko lujuus. Sinänsä lähes kaikki tehdyt liimaliitokset olivat tiiviitä. Liimausta käytettäessä joudutaan myös aina ottamaan huomioon liimojen ja nesteiden välinen yhteensopivuus sekä liimakerroksen aiheuttama tilavuusmuutos nestekanavissa.



Kuva 19. a) Arcticin casen-sovelluksen yhteydessä ideoitu polykarbonaatista työstämällä valmistettu proto-chip, jota käytettiin selvittäessä fluidistiikkachipin valmistettavuutta ja tutkittaessa kannen liittämiseen soveltuvia menetelmiä. b) Laserhitauksella proto-chipin päälle liitetty kansi. Kanavan leveys 150 μm [11].

8.3 Innotrac-case - Selvitystyö miniatyrisoidun näytekasetin valmistettavuudesta & Demonstraatio - Yksinkertaisten venttiilien valmistus koviin muoveihin

Innotrac Diagnostics Oy:n case-sovellukseen liittyen selvitettiin lääketieteen diagnostiikassa käytettävän miniatyrisoidun ja kertakäyttöisen näytekasetin valmistettavuutta. Lähtökohtana selvitystyölle oli yrityksen nykyinen AIO-analyysimenetelmä, jota varten haluttiin nyt ideoida ja kehittää uusi ja pienempikokoinen laite. Näytekasetti on ko. laitteen keskeinen osa ja siinä haluttiin nyt mahdollisuuksien mukaan soveltaa mikrofluidistiikkaan perustuvia tekniikoita.

Selvitystyössä keskityttiin aluksi näytekasetin perustoimintojen, kuten näytteen tuonti kasettiin, sen siirto ja annostelu kasetissa, ideointiin. Projektin kuluessa aloitettiin yhteistyö TTY:n vastaavien projektien kanssa. Tällöin Mikromasinassa tehdyn kehitystyön painopiste vaihtui materiaalinvalintaan, valmistettavuuden selvittämiseen ja yksinkertaisen venttiilirakenteen kehittämiseen.

Materiaalivalinnassa keskityttiin projektissa valitun linjan mukaisesti polymeereihin. Tarkempaa materiaalinvalintaa varten kerättiin yksityiskohtaiset tiedot viiden tarkasteluun valitun materiaalin mekaanisista ominaisuuksista, fysikaalisista ominaisuuksista, valmistettavuudesta, liitettävyydestä ja valmistuskustannuksista. Materiaalinvalinnassa olivat mukana seuraavat materiaalit: polypropeeni (PP), polystyreeni (PS), polykarbonaatti (PC), elastomeeri (SEBS) ja silikonikumi (PDMS). Elastiset materiaalit (SEBS ja PDMS) osoittautuivat valmistettavuudeltaan selvästi huonommiksi kuin ns. "kovat muovit". Erityisesti silikonin ja elastomeerin kaasun- ja höyrynläpäisevyydet havaittiin niin suuriksi, että ko. materiaalien soveltuvuus nesteiden varastointiin tai kosteudelle alttiiden alueiden valmistaminen niihin todettiin erittäin epävarmaksi. Lopulta koemateriaaliksi valittiin polystyreeni sen valmistettavuuden, hinnan ja kohtuullisten kaasun- ja höyrynläpäisevyysominaisuuksien ansiosta. Polystyreenin valintaa puolsi myös vanha näytekaivo, joka on valmistettu polystyreenistä.

Näytekasetin valmistettavuutta selvitettiin samanaikaisesti materiaalinvalinnan kanssa. Kun materiaalinvalinnassa päädyttiin termoplastisten polymeerien ryhmään, supistui samalla myös valmistukseen soveltuvien menetelmien määrä käytännössä vain muutama. Lopullinen valmistusmenetelmän valinta tehtiin ruiskuvalun ja Hot Embossing -menetelmän välillä. Ruiskuvalun todettiin olevan nopea, edullinen ja suurillekin sarjakooille sopiva. Lisäksi ruiskuvalutekniikka on Suomessa laajasti käytössä, joten mahdollisuudet nestekasetin valmistamiseksi kotimaassa ruiskuvalutekniikalla ovat hyvät. Hot Embossing -menetelmä on selvästi ruiskuvalua hitaampi ja se ei siten sovellu suursarjatuotantoon. Tämän menetelmän saatavuus on myös varsin huono, eikä laitteita tai osaamista juurikaan löydy Suomesta.

Osavalmistuksen lisäksi liittäminen on oleellinen osa toimivan nestekasetin valmistamista. Projektin muissa case-sovelluksissa ja demonstraatioissa tutkittiin liittämistä varsin laajasti. Näiden tutkimusten pohjalta päädyttiin käyttämään laserhitausta näytekasetin kannen ja fluidistiikkaosan liittämiseen.

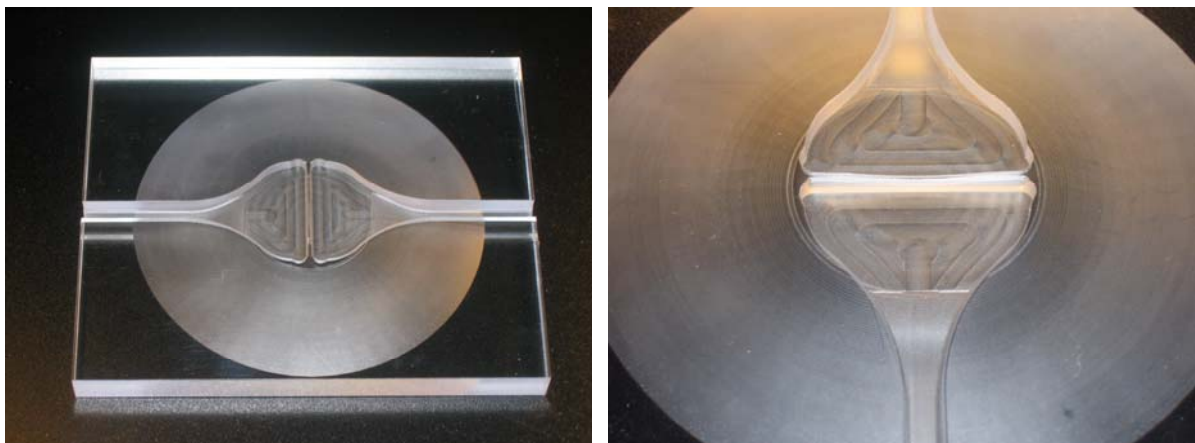
Venttiiliratkaisut ovat erittäin oleellinen osa näytekasetin toimintoja. Venttiilien toteuttaminen edullisesti on haaste sekä tuotesuunnittelulle että valmistustekniikalle. Valmistuskustannuksien minimoinnissa oleellista on pyrkiä välttämään lisäosia, mikä venttiilin tapauksessa tarkoittaa äärimmillään sitä, että näytekasetti ei tarvitse yhtään lisäosaa venttiileiden takia. Tämä asetettiin kehitystyölle tavoitteeksi.

Yksinkertaisin tapa on toteuttaa venttiilit ns. passiiviventtiileillä, joissa hyödynnetään pintailmiöitä kanavassa tapahtuvan merkittävän kavennuksen tai laajennuksen kohdalla. Niissä hyödynnetään nesteiden hydrofiilisyyttä ja hydrofobisuutta kasettimateriaaleihin nähden. Passiiviventtiilit tarvitsevat yleensä avautuakseen tietyn kynnyspaineen, jonka jälkeen virtaus alkaa ja jatkuu huolimatta paineen vaihteluista. Näytekasetin toimintojen toteuttamisessa ne tarjoavat kuitenkin melko rajoitetut mahdollisuudet. Projektissa toteutettujen pienimuotoisten kokeiden perusteella demonstraatioon valitulla kasettimateriaalilla, iskunkestävällä polystyreenillä, passiiviventtiilitoimintoja ei havaittu. Materiaalien kostutuskulmamittaukset tukivat ajatusta, että käytetty materiaali on pintaominaisuksiltaan niin neutraalia, että passiiviventtiilitoiminnon aikaansaaminen edellyttää materiaalin pintaominaisuuksien merkittävää muuttamista esimerkiksi pinnoittamalla.

Hyvin yksinkertainen ratkaisu on käyttää kantena pehmeää materiaalia, jos se vain muuten on mahdollista. Tällöin kansi ei välttämättä ole kauttaaltaan liitetty pohjaan, vaan sitä puristetaan prosessin aikana. Venttiilitoiminto voidaan toteuttaa tällöin painamalla kantta sopivasti kanavan kohdalta. Tiiveyttä voidaan parantaa kanavan muotoilulla. Kannen pehmeys täytyy valita tarvittavan paineensietokyvyn, valmistusvirheiden kompensointikyvyn ja venttiilitoiminnon toteuttamisen lähtökohdista. Pienimuotoisten testien pohjalta tämä lähestymistapa vaikuttaa potentiaaliselta, joskin vaatii vielä runsaasti lisätutkimuksia.

Pääpaino kehitystyössä oli kovista materiaaleista tehtyjen yksinkertaisten miniatyyriventtiilien kehittämisessä. Varsin haastava tehtävä oli toteuttaa kovista materiaaleista ilman lisäosia sellainen venttiilikonstruktio, että muodonmuutokset eivät vaurioita rakennetta, kappaleet ovat valmistettavissa ja venttiili toimii. Projektissa toteutettiin kaksi suurennettua prototyyppiä, jotka osoittivat ideoidut toimintaperiaatteet toimiviksi. Venttiilien suunnittelussa jouduttiin turvautumaan melko tarkkaan muodonmuutosten FEM-laskentaan ja valmistuksessa suurehkoihin valmistarkkuuksiin. Yksinkertaisempi ratkaisu valmistettiin myös luonnollisessa (mikro)koossa. Se saatiin toimimaan nesteellä, mutta venttiilin saaminen täysin vuodottomaksi paineisella kaasulla vaatii vielä jonkun verran valmistusmenetelmien ja ehkä myös konstruktion hiomista. Yksinkertaisten venttiilien kriittinen työvaiheeksi osoittautui kannen liittäminen, jossa laserhitsaus vaikuttaa potentiaaliselta valmistusmenetelmältä.

Kuvassa 20 on testaukseen käytetty protoventtiili.



Kuva 20. Polykarbonaatista työstämällä valmistettu protoventtiili, jota käytettiin venttiilin toiminnan testaamiseen. Venttiili valmistettiin kymmenkertaiseen kokoon lopulliseen rakenteeseen verrattuna [12].

Yksinkertaisten venttiilien kehitystyöstä ja prototyypikappaleille tehtyjen testausten pohjalta näyttää siltä, että venttiilikonstruktioita kannattaa kehittää erityisesti robustisuuden lähtökohdista (huomioiden varsinkin valmistuksen epätarkkuudet).

Tässä projektissa kehitetyt ratkaisut mahdollistanevat onnistuneen edullisen aktiiviventtiilitoiminnon, jonka avulla näytekasetin toteuttamiseen tulee monipuoliset mahdollisuudet.

8.4 Demonstraatio - Muovien pintaominaisuuksien modifiointi pintakäsittelyjen avulla

Projektin kuluessa todettiin, että materiaalien pintaominaisuudet ja niiden hallittu modifiointi ovat keskeisiä tekijöitä mikrofluidistiikkaa hyödyntävien tuotteiden valmistuksessa. Asian tärkeyden sekä kattavan ja vertailukelpoisen tiedon puutteen takia pintakäsittelymenetelmiä päätettiin demonstroida kokeellisesti. Demonstraation tarkoituksena oli tutustua erilaisiin muovien pintakäsittelymenetelmiin sekä selvittää millaisiin kostutusominaisuuksien muutoksiin niillä voidaan päästä valittujen muovimateriaalien kohdalla. Lisäksi selvitettiin kuinka modifioitujen pintojen ominaisuudet käyttäytyvät ajan funktiona. Kokeen tarkoituksena oli selvittää kuinka pintakäsittelyn tuotteen ominaisuudet muuttuvat valmistuksen jälkeen ennen kuin asiakas ottaa sen käyttöön.

Kokeissa käytetyt materiaalit valittiin tukemaan projektin muissa case- ja demo-tutkimuksissa tehtävää työtä. Kokeisiin valittiin iskunkestävä polystyreeni ja polypropeeni.

Projektin aikana tehtyjen selvitysten pohjalta kokeiltavaksi valittiin seuraavat mikrofluidistiikan sovelluksissa yleisesti käytetyt muovipintojen modifiointimenetelmät:

- Plasmakäsittelyt – plasmasputterointi, plasma-aktivointi ja plasmapolymerointi
- Laserkäsittely – Excimer-laser 193 nm, 248 nm ja 308 nm
- Kemialliset liuoskäsittelyt – kaikkiaan kahdeksan erilaista käsittelyliuosta.

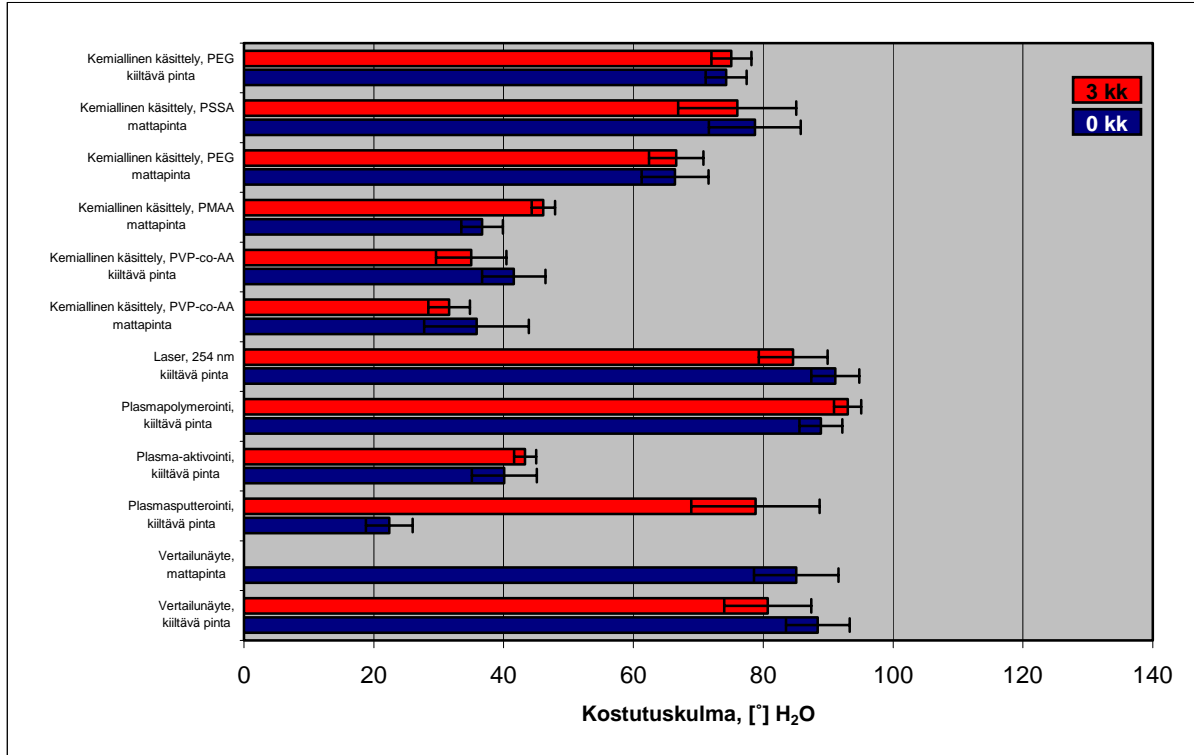
Kunkin menetelmän kohdalla oli käytössä erilaisia variaatioita niin, että erilaisten käsittelyiden kokonaismäärä oli lopulta 25 kpl.

Pintakäsitteltyjä näytteitä karsittiin aluksi yksinkertaisten staattisten kostutuskokeiden avulla ns. "sessile drop" -menetelmää käyttäen. Parhaille näytteille tehtiin tämän jälkeen sekä staattiset että dynaamiset kostutuskokeet ja koetulosten pohjalta laskettiin niiden pintaenergiat. Vastaavat kokeet toistettiin 3 kk:n varastointiajan (+6°C, ~15% RH) jälkeen. Käsittelyjen vaikutusta materiaalien pinnakarheuteen tutkittiin AFM-mittauksilla.

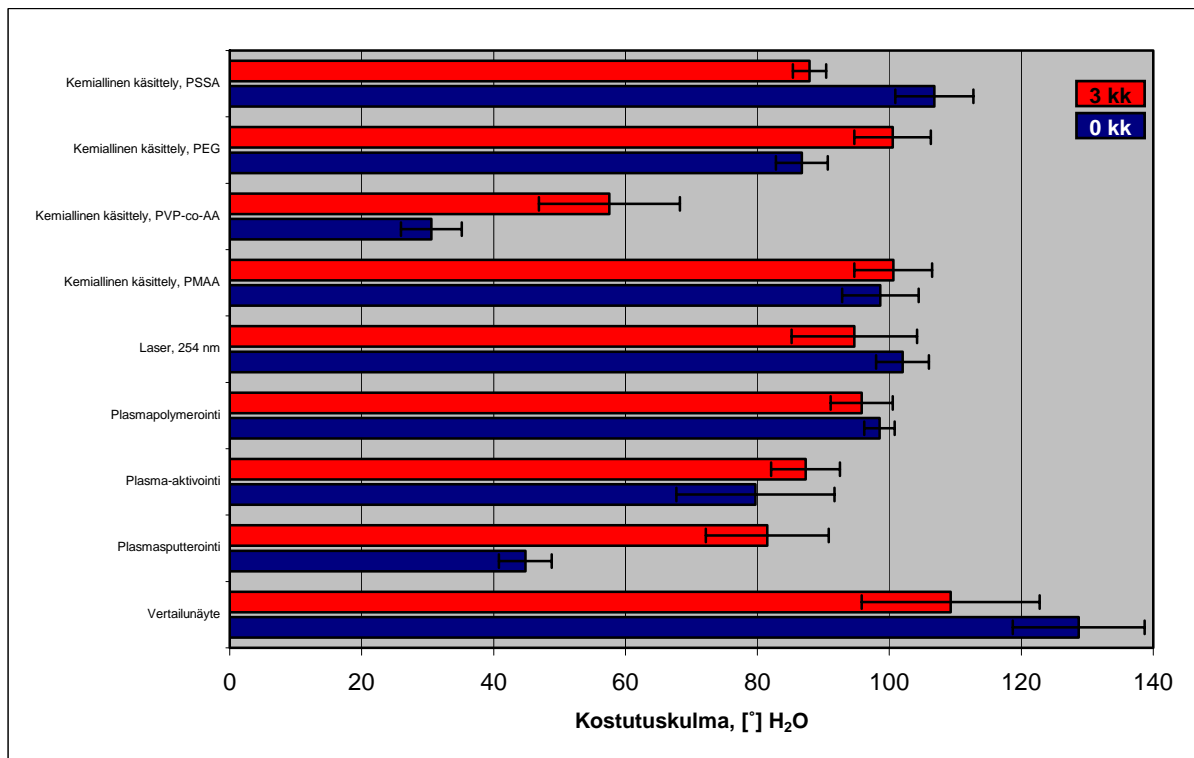
Tutkituilla menetelmillä polystyreenin kostutuskulmaa vedellä pystyttiin modifioimaan välillä 20°-95°, kun itse perusmateriaalin kostutuskulma oli n. 90°, kuva 21 a). Vastaavasti polypropeenin kostutuskulmaa vedellä onnistuttiin modifioimaan välillä 30°-105°, kun perusmateriaalin kostutuskulma oli n. 120°, kuva 21 b). Pintojen modifiointi hydrofiiliseen suuntaan onnistui siis suhteellisen hyvin, kun taas hydrofobiseen suuntaan ei juuri päästy.

Parhaat tulokset saavutettiin kemiallisilla käsittelyillä. Kemiallisesti muovipintoja pystyttiin modifioimaan hydrofiiliseen suuntaan varsin laajalla alueella. Vanhennuskokeessa todettiin, että kemialliset käsittelyt ovat myös varsin stabiileja. Plasmasputteroidut näytteet olivat heti käsittelyn jälkeen erittäin hydrofiilisiä. Käsittely ei kuitenkaan ollut vakaa, vaan materiaalin ominaisuudet palautuivat varastoinnissa lähelle lähtötilaansa. Tutkituista plasmakäsittelyistä

kokonaisuutena arvioiden parhaaksi todettiin plasma-aktivointi. Laserkäsittelyillä materiaalien kostutusominaisuuksia ei käytännössä pystytty modifioimaan. Yhteenvedo kokeiden aikana kertyneistä kokemuksista sekä tutkittujen menetelmien soveltuvuudesta mikrofluidistiikka-komponenttien pintakäsittelyyn on koottu taulukkoon 5 [13].



a)



b)

Kuva 21. Yhteenvedo vedellä tehtyjen kostutuskokeiden tuloksista: a) polystyreeninäytteiden tulokset, b) polypropeeninäytteiden tulokset [13].

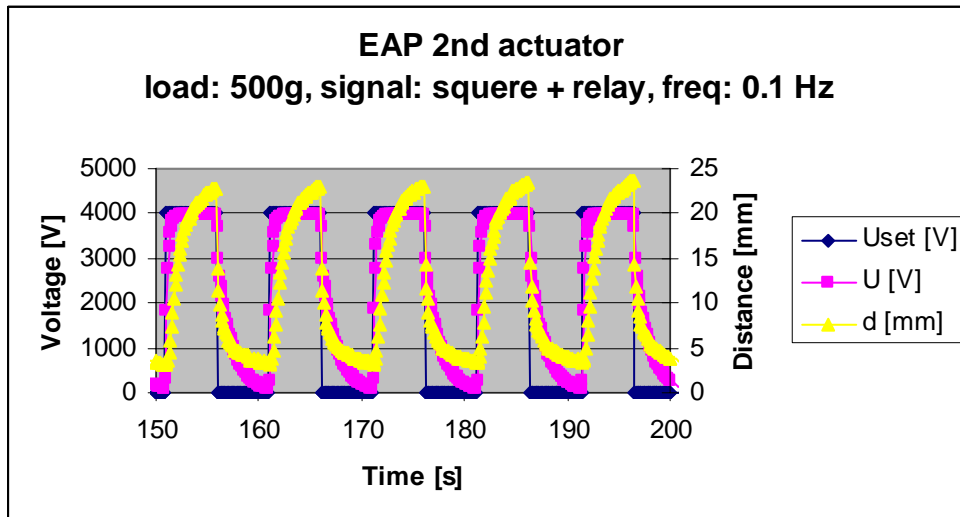
Taulukko 5. Yhteenveto tutkittujen pintakäsittelymenetelmien ominaisuuksista ja soveltuvuudesta mikrofluidistiikkakomponenttien pintojen modifiointiin [13].

	Plasma-sputterointi	Plasma-aktivointi	Plasma-polymerointi	Laser-käsittely	Kemiallinen käsittely
Kostutuksen modifiointi: (onnistuu - ei onnistu)					
- Hydrofiiliseen suuntaan	+++	++	+	+	+++
- Hydrofobiseen suuntaan	---	---	+	--	+
Pintakäsittelyn stabiilius (stabiili - epästabiili)	---	+	+	+	++
Tekniikan kehitysaste (tunnettua tekniikkaa - uutta tekniikkaa)	+	++	+	--	++
Menetelmän saatavuus (hyvin saatavilla - saatavuus heikko)	+	+++	++	--	-
Tarvittavat laitteet (yksinkertaiset ja halvat - monimutkaiset ja kalliit)	--	-	--	-	+++
Tarvittava osaaminen (ei vaadi erityisosaamista - vaatii erityisosaamista)	--	-	--	--	+
Soveltuvuus sarjatuotantoon (soveltuu - ei sovellu)	+	++	+	+	++
Pintakäsittelyn hinta (edullinen - kallis)	-	+	-	+	++

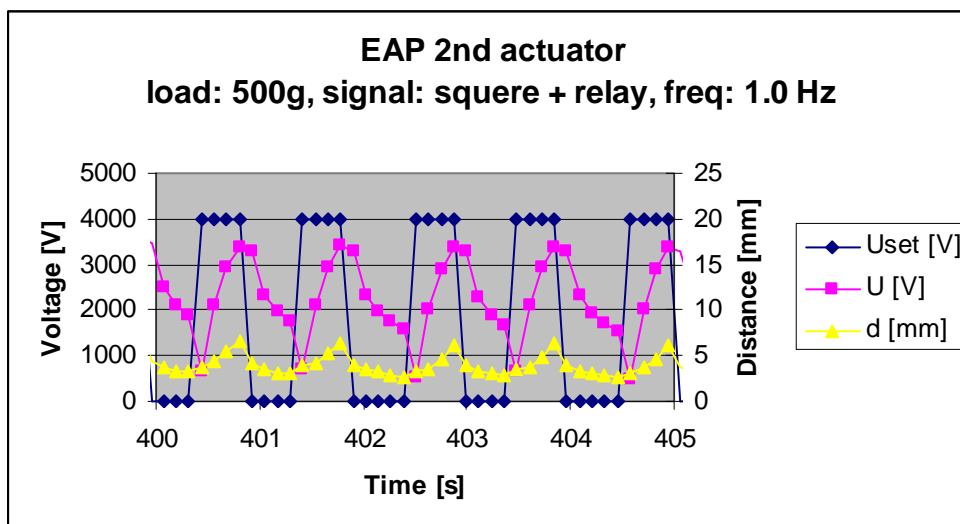
8.5 Demonstraatio - Liikkeen tuottaminen EAP-aktuaattorilla

Dielectric EAP -aktuaattori demonstroitiin onnistuneesti usealle kiinnostuneelle taholle ja demonstraation yhteyteen liitetyn intensiivisen tutkimustyön seurauksena saatiin aikaan maailmalajuisesti ainutkertaisia tuloksia. Aktuaattorin on valmistanut EMPA, kansallinen laboratorio Sveitsistä. Demonstraatio osaltaan lisäsi ja syvensi merkittävästi EMPA:n ja VTT:n välistä tutkimusyhteistyötä.

Vaikka Dielectric EAP -aktuaattorissa ei ole liikkuvia osia, niin tulosten perusteella sillä on silti suuri syklinen liike, ainakin 23 % aktiivisen osan pituudesta. Aktuaattori kykenee liikuttamaan painoansa nähden merkittäviä kuormia, ainakin 500 g, kuva 22. Sen syklinopeus riippuu hyvin paljon käytettävästä elektroniikasta, mutta on vähintään 1 Hz, kun syklinen liike on 6 %, kuva 23. Aktuaattorin tarvitsema energia, lämpötila-alue ja toistojen määrä tarvitsevat vielä lisätutkimusta. Kiinnostavaa olisi myös tutkia, voiko käyttöjännitettä alentaa merkittävästi materiaaliteknisin ratkaisuin. [14]



Kuva 22. Ohjausjännite (U_{set}), toteutunut jännite (U) ja aktuaattorin siirtymä (d), kun syklinopeus oli 0.1 Hz ja kuorma 500 g.



Kuva 23. Ohjausjännite (U_{set}), toteutunut jännite (U) ja aktuaattorin siirtymä (d), kun syklinopeus oli 1.0 Hz ja kuorma 500 g.

9 Lähdeviitteet

9.1 Projektin osaraportit

1. Jokinen, A., Koskinen, J., Kosonen, T., Saarinen, M., Salmi, T. & Väätäinen, O. Mikromekaniikka - Nykytila, haasteet & visiot. Raportti TUO27-033070. Espoo, 2004. 156 s.
2. Muukkonen, T. Vierailut materiaaliosajien luona. Raportti TUO25-044605. Espoo, 2004. 9 s.
3. Väätäinen, O. Mikrokokoisten tuotteiden tai osien suunnittelu. Raportti TUO27-044283. Espoo, 2004. 14 s.

4. Heilala, J. Designing micromechanical products: Systematic methodologies, methods and tools for dimensional and geometrical accuracy management and design. Raportti BTUO24-041278. Espoo, 2005. 34 s.
5. Kosonen, T. & Lahtinen, R. Pienten kappaleiden valmistusmenetelmät ja -materiaalit. Raportti TUO27-044192. Espoo, 2004. 62 s.
6. Kosonen, T. Mikrofluidistiikan komponenttien erityisominaisuudet ja niiden määrittämien. Raportti TUO27-055516. Espoo, 2005. 29 s.
7. Salmi, T. & Väätäinen, O. Mikromekaanisten tuotteiden kokoonpanon laiteratkaisuja. Raportti TUO24-056271. Espoo, 2005. 121 s.
8. Saarinen, M. Pienten ja mikroskooppisten osien asemointi konenäöllä. Raportti TUO52-045144. Espoo, 2004. 17 s.
9. Muukkonen, T. Potentiaalisten aktiivimateriaalien arviointi. Raportti TUO25-044606. Espoo 2004. 7 s. + liitt.
10. Muukkonen, T. & Väätäinen, O. Mikromekaniikkaan soveltuvat toimilaitteet ja niiden kriittiset parametrit liikkeen tuottamisessa. Raportti TUO25-055515. Espoo, 2005. 64 s. + liitt.
11. Kosonen, T. Arctic-Case & Demonstraatio - Selvitystyö mikrofluidistiikan komponenttien liittämismenetelmistä. Raportti TUO27-056395. Espoo, 2006. 33 s.
12. Kosonen, T., Salmi, T. & Jokinen, A. Innotracc-Case - Selvitystyö miniatyrisoidun näytekasetin valmistettavuudesta & Demonstraatio – Yksinkertaisten venttiilien valmistus koviin muoveihin. Raportti TUO27-056394. Espoo, 2006. nn s.
13. Kosonen, T. Demonstraatio - Muovien pintaominaisuuksien modifiointi mikrofluidistiikan sovelluksissa. Raportti VTT-R-05076-06. Espoo, 2006. 35 s.
14. Muukkonen, T., Väätäinen, O. Dielectric EAP -aktuaattorin demonstraatio. Raportti VTT-R-00724-06. Espoo, 2006. 15 s.

9.2 Konferenssiesitelmät

15. Heilala, Juhani; Väätäinen, Otso; Keränen, Kimmo; Mäkinen, Jukka-Tapani; Kautio, Kari; Ollila, Jyrki; Petäjä, Jarno; Karppinen, Mikko; Heikkinen, Veli; Karioja, Pentti; Design for photonics modules - combining optical geometrical and assembly process tolerance simulation in concept creation; IPAS 2004 International Precision Assembly Seminar, Bad Hofgastein, 11-13 Febr. 2004 (2004), ss. 199 - 204.
16. Eskilander, Stephan; Salmi, Timo. 2004. Are traditional DFA methods valid in micro assembly?. Proceedings of the International Precision Assembly Seminar (IPAS2004), Bad Hofgastein, 11-13 Febr. 2004. The Precision Manufacturing Group, School of Mechanic, Materials, Manufacturing Engineering and Management, The University of Nottingham, ss. 19 - 26.
17. Salmi, Timo; Lempiäinen, Juhani. 2006. First Steps in Integrating Micro-assembly Features into Industrially Used Software. Precision Assembly Technologies for Mini and Micro Products; Bad Hofgastein, Austria, 19-22th February 2006. The University of Nottingham, Springer Publishers.

10 Liitteet

LIITE 1. Lista matkakertomuksista

MIKROMASINA -PROJEKTIN MATKAT

Vierailut *AIST:lla* ja *Wasedan yliopistolla* sekä osallistuminen *Micromachine 2003* -messuille ja symposiumiin. Tsukuba ja Tokio, Japani. 11. - 14.11.2003.

Osallistuminen "*Nanotechnology and Smart Materials for Medical Devices*" -konferenssiin. Edinburgh, Englanti. 1. - 2.12.2003.

Osallistuminen kansainväliseen konferenssiin "*The 1st International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structure Technology*". Hawaii, USA. 12. - 14.1.2004.

Osallistuminen kurssille: *Electroactive Polymer Actuators and Devices*. SPIE Education Services. Short Course. San Diego, USA. 12. - 14.3.2004.

Osallistuminen *Medtec*-messuille Stuttgartissa ja vierailu Karlsruhen tutkimuskeskuksessa Karlsruhessa. 9. - 11.3.2004

Vierailu *Berkeley Sensor & Actuator Center*. University of California, Berkeley. 2.6.2004.

Osallistuminen *Hannoverin teollisuusmessuille*. 19. - 23.4.2004.

Osallistuminen Masina teknologiaohjelman *Japani ekskursionille*. 29.5. - 6.6.2004.

Osallistuminen *Actuator 2004* & Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems -tilaisuuteen. Bremen, Saksa. 14. - 16.6.2004.

Osallistuminen "*Micro Total Analysis Systems 2004*" -konferenssiin (μ TAS 2004). Malmö, Ruotsi. 26. - 30.9.2004.

Osallistuminen "*MICRONORA 2004*" -messuille, Besangon, Ranska. 29.9. - 2.10.2004.

Osallistuminen "*4th International Workshop on Microfactories (IWMF)*" -konferenssiin. Shanghai, Kiina. 14. - 17.10.2004.

Osallistuminen *Motek 2004* (Montage- und Handhabungstechnik) -messuille. Sinnsheim, Saksa. 23. - 24.9.2004.

Osallistuminen "*Medica 2004*" messuille, Düsseldorf, Saksa. 24. - 26.11.2004.

Vierailu *EMPA* Sveitsi, Zurich. Verkottuminen ja neuvottelut yhteistyön aloittamisesta aktiivimateriaali Dielectric EAP -asiantuntijoiden kanssa. 28.2. - 1.3.2005.

Vierailu *Jenoptik Mikrotechnik GmbH*:lla ja osallistuminen mikrofluidistiikan "*Competence Center*" -kokoukseen. Frankfurt, Saksa. 14. - 15.3.2005.

Osallistuminen *Hannoverin teollisuusmessuille* 11. - 15.4.2005.

Vierailu *Artificial Muscle, Inc (AMI)* ja osallistuminen *Industrial Affiliates Meeting*. Stanford University. 23. - 30.4.2005.

Osallistuminen "*Micro Total Analysis Systems 2005*" -konferenssiin (μ TAS 2005). Boston, MA, USA. 9. - 13.10.2005.

Osallistuminen "*Medica 2005*" -messuille. Düsseldorf, Saksa. 16. - 18.11.2005.

Osallistuminen "*Euromold 2005*"-messuille. Frankfurt, Saksa. 1. - 2.12.2005.