

Sähköimpulssimuovaus

Raimo Penttilä
VTT Valmistustekniikka



ISBN 951-38-5083-8

ISSN 1235-0605

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Valmistustekniikka, Konepajatekniikka, Laserkatu 6 C, PL 17021, 53851 LAPPEENRANTA
puh. vaihde (05) 5741, faksi (05) 574 3400

VTT Tillverkningssteknik, Verkstadsteknik, Laserkatu 6 C, PB 17021, 53851 VILMANSTRAND
tel. växel (05) 5741, fax (05) 574 3400

VTT Manufacturing Technology, Production Engineering,
Laserkatu 6 C, P.O.Box 17021, FIN-53851 LAPPEENRANTA, Finland
phone internat. + 358 5 5741, fax + 358 5 574 3400

Tekninen toimitus Leena Ukoski

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1997

Penttilä, Raimo. Sähköimpulssimuovaus. Espoo 1997. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1808. 35 s.

UDK 621.77:537.872:62-415

Avainsanat metal working, forming techniques, electrohydraulic effect, explosive forming, high energy rate forming, magnetic forming, metal plates, equipment

TIIVISTELMÄ

Sähköimpulssimuovaus on yksittäiskappaleiden ja pienten sarjojen valmistukseen soveltuva ohutlevyjen suurnopeusmuovausmenetelmä, jonka etuja ovat edulliset työkalukustannukset, materiaalin hyvä muovattavuus ja erittäin vähäinen takaisinjousto. Muovauksessa tarvittava suurjännitteinen sähköenergia ladataan kondensaattoripakettiin ja puretaan nesteellä täytetyssä tilassa sijaitsevassa elektrodivälissä. Paineaalto ja nesteen liike muovaavat aihion yksipuoleista muottia vasten. Tätä länsimaissa kymmeniä vuosia lähes unohduksissa ollutta menetelmää on tähän asti sovellettu lähinnä lentokone- ja sotatarviketeollisuuden tarpeisiin Venäjällä. Viime vuosina kiinnostus menetelmää kohtaan on herännyt länsimaissakin.

VTT Valmistustekniikka on ottanut käyttöön Suomen ensimmäisen sähköimpulssimuovauslaitteen. Laitteen hankinnassa ja käyttöönotossa on hyödynnetty VTT:n yhteyksiä Pietarin teknilliseen yliopistoon. Koekäyttövaiheessa tutkittiin mm. elektrodivälin, siltalangan ja muovauskammion erilaisten täytteiden vaikutusta muovaukseen.

Laitteella on tehty muovauskokeita teollisuuden esimerkkikappaleille. Koetulokset osoittavat, että sähköimpulssimuovaus on perinteisiin muovausmenetelmiin verrattuna kilpailukykyinen menetelmä mm. protokappaleiden ja -sarjojen valmistukseen, kun tuote on suunniteltu ottaen huomioon tämän muovausmenetelmän rajoitukset mm. levynpaksuuden, kappaleen koon ja muotojen pyöristyssäteiden suhteen.

ALKUSANAT

Tämä työ liittyy vuosina 1995 - 1996 toteutettuun projektiin "Muovattavien kappaleiden nopea ja edullinen piensarjavalmistusmenetelmä", jota rahoittivat Teknologian kehittämiskeskus, teollisuus ja VTT Valmistustekniikka. Tutkimusprojektin johtoryhmään ovat kuuluneet

Pasi Siekkinen, Teräs-Taive Oy, puheenjohtaja

Matti Haakana, Kasettipelti Oy

Ari Piispanen, Konetuote Piispanen Oy

Markku Oikarainen, TEKES

Juha Pyrhönen, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto

Veli Kujanpää, VTT Valmistustekniikka, projektin vastuullinen johtaja

Raimo Penttilä, VTT Valmistustekniikka, projektipäällikkö, sihteeri.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ALKUSANAT	4
1 JOHDANTO	7
2 SUURNOPEUSMUOVAUSMENETELMÄT.....	8
2.1 Räjähdyksimuovaus.....	8
2.2 Magneetti-impulssimuovaus	9
2.3 Sähköimpulssimuovaus.....	11
3 SÄHKÖIMPULSSIMUOVAUSTUTKIMUKSEN JA LAITEKEHITYKSEN NYKYTILA	13
3.1 Sähköimpulssimuovauksen tutkimus ja hyödyntäminen maailmalla.....	13
3.2 Kaupalliset laitteistot.....	13
4 VTT:N LAITTEISTO	15
4.1 Sähkölaitteet	15
4.2 Maadoitus	16
4.3 Muotinsulkupuristin	16
4.4 Muovauskammiot.....	17
4.5 Työkalut	19
5 LAITTEISTON KOEKÄYTTÖ	20
5.1 Eri elektrodiväleillä tarvittava purkausjännite	20
5.2 Elektrodivälin vaikutus muovaukseen	20
5.2.1 Koejärjestely	20
5.2.2 Tulokset	21
5.3 Siltalangan vaikutus muovaukseen	22
5.4 Kumilevyn vaikutus muovaukseen	22
5.4.1 Kumilevy aihion ja muotin välissä	22
5.4.2 Kumilevy aihion ja vesitilan välissä	22
5.5 Kammion täytteen vaikutus muovaukseen.....	23
6 ESIMERKKIKAPPALEIDEN MUOVAUSKOKEIDEN TULOKSIA	24
6.1 Perusmuotti	24
6.2 YIT:n logo	24
6.3 Paistinpannut	26
6.4 Pienet logokuviot	26
6.5 Pyöreä kuppi.....	28
6.6 Taajuusmuuttajan kansi.....	28
6.7 Päätyluokku	30

7 KUSTANNUSVERTAILU MUIHIN MUOVAUSMENETELMIIN	31
8 YHTEENVETO	33
LÄHDELUETTELO	35

1 JOHDANTO

Sähköenergian käyttöön perustuvat suurnopeusmuovausmenetelmät, sähköimpulssi-muovaus ja magneetti-impulssimuovaus, olivat voimakkaan tutkimuksen ja kehityksen kohteena Yhdysvalloissa, Japanissa ja Neuvostoliitossa 1950- ja 1960-luvuilla, mutta viime vuosikymmeninä niiden suosio on vähentynyt. Viime vuosien laitetekniikan kehitys ja suuntaus kohti pienempiä valmistussarjoja ovat taas parantamassa näiden menetelmien kilpailukykyä perinteisiin muovausmenetelmiin verrattuna. /1/

VTT Valmistustekniikka Lappeenrannassa on tutustunut sähköimpulssi-muovaustekniikkaan ensimmäisen kerran Pietarin teknillisessä yliopistossa 1991. Erilaisia ns. uusia muovaustekniikoita sisältäneessä kauppa- ja teollisuusministeriön rahoittamassa esitutkimushankkeessa selvitettiin sähköimpulssimuovauksen periaatteita ja kokeiltiin menetelmän sopivuutta muutamiin esimerkkikappaleisiin. Tulokset olivat lupaavia, joten sähköimpulssimuovauksen tutkimusta jatkettiin TEKESin, VTT:n ja teollisuuden rahoittamalla hankkeella "Muovattavien kappaleiden nopea ja edullinen piensarjavalmistusmenetelmä".

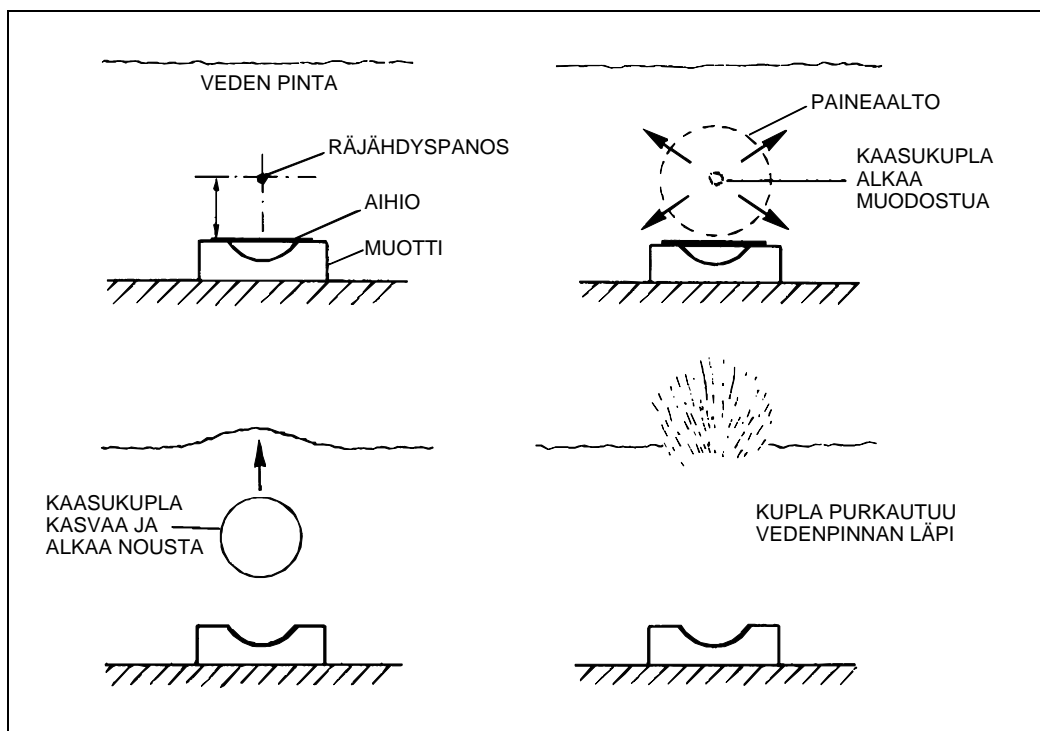
Tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin kehittää piensarjavalmistukseen soveltuva, lyhyen läpäisyajan mahdollistava, edullinen ohutlevyosien muovaustekniikka, joka otetaan käyttöön suomalaisessa ohutlevytuoteollisuudessa ja kaupallistetaan hankkeessa mukana olevien yritysten toimesta.

Sähköimpulssimuovaus soveltuu parhaiten konepajateollisuuden, rakennusteollisuuden, LVI-teollisuuden ja kulkuvälineteollisuuden käyttöön.

2 SUURNOPEUSMUOVAUSMENETELMÄT

2.1 RÄJÄHDYSMUOVAUS

Räjähdyksmuovauksessa (engl. *explosive forming*) käytetään hyväksi räjähdysen synnyttämää paineaaltoa, joka väliaineessa edetessään painaa aihion muottia vasten (kuva 1). Räjähdyksmuovaus on vanhin ja tunnetuin suurnopeusmuovausmenetelmä. Aihio muovautuu nopeudella 100 - 300 m/s, ja paine aihion pinnassa voi nousta jopa arvoon 25 GN/m^2 (250 000 bar). Muovauksessa käytetään väliaineena yleensä vettä, jolloin räjähdyspanos, aihio ja muotti ovat vedessä. Ilman poisto aihion ja muotin välistä varmistetaan ilmanpoistokanavilla ja joskus myös imemällä aihion ja muotin väliin tyhjiö. Räjähteenä voidaan käyttää kemiallisia räjähteitä tai kaasuseosräjähteitä.



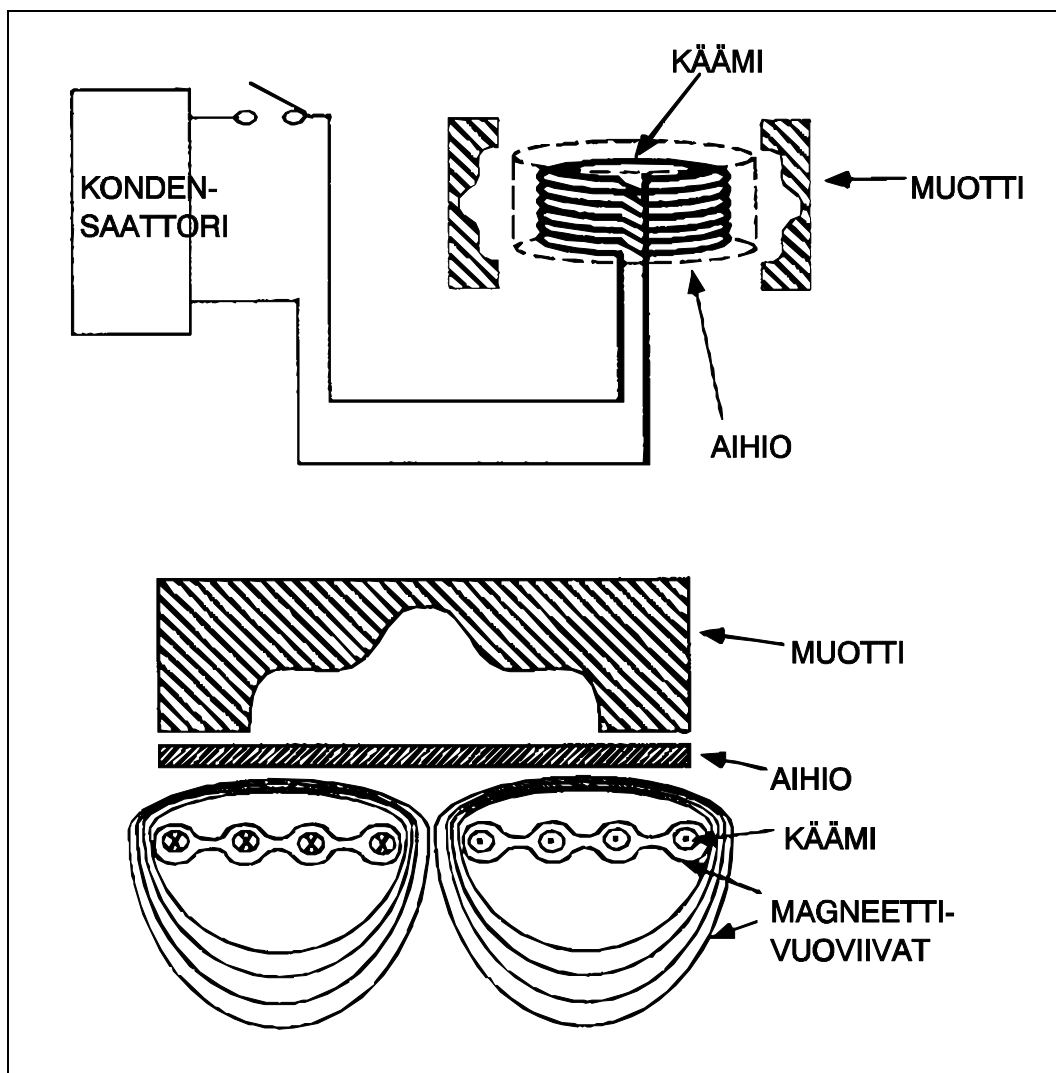
Kuva 1. Räjähdyksmuovaus vedessä /2/.

Erittäin nopean muovauksen takia muoteissa on vältettävä teräviä kulmia, ilmataskujen muodostumista ja hauraita valmistusmateriaaleja. Valmistettavasta kappalemäärästä ja muovattavan aineen lujuudesta riippuen muotti voidaan valmistaa puusta, muovista ja lujitemuovista lähtien aina erikoisteräksiin asti.

Räjähdyksmuovaus soveltuu hyvin suurten ja paksujen levykappaleiden muovaukseen sekä piensarja- ja prototyypin valmistukseen, mutta myös sarjavalmistukseen soveltuvia automaattikoneita on olemassa.

2.2 MAGNEETTI-IMPULSSIMUOVAUS

Magneetti-impulssimuovauksessa (engl. *electromagnetic forming*) kondensaattorin varaus puretaan käämin läpi, jolloin työkappaleen pintaan indusoituu pyörrevirtoja. Käämin ja aihion magneettikentät ovat vastakkaisuuntaiset ja hylkivät toisiaan, joten aihio työntyy käämistä poispäin muottia vastaan (kuva 2). Laitteistoon kuuluu kondensaattoriparisto lataus- ja purkauslaitteineen, työkaluna toimiva käämi ja usein myös muotti. Muovauksen tärkein edellytys on aihiomateriaalin hyvä sähkönjohtavuus. Mitä parempi on aihion sähkönjohtavuus, sitä pienempi on magneettikentän tunkeutumissyvyys ja sitä parempi on muovauksen hyötysuhde.



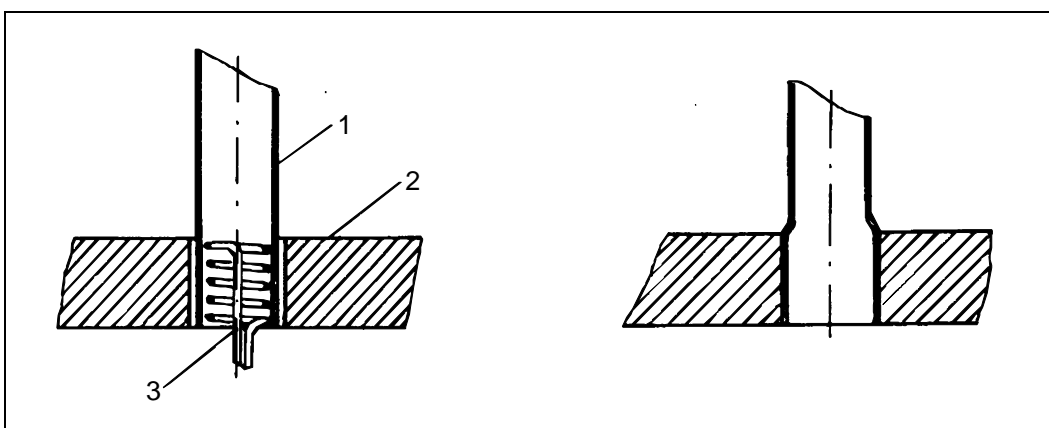
Kuva 2. Magneetti-impulssimuovauksen periaate /1/.

Energiahyötysuhteen kannalta aihion ja käämin pintojen pitää olla mahdollisimman lähellä toisiaan. Tästä syystä yksittäis- ja piensarjavalmistuksessa käytetään yleisesti muovauksessa särkyviä yksinkertaisia kertakäämejä. Toisaalta kestokäämien monikäyttöisyyttä voidaan lisätä sähköä hyvin johtavasta aineesta tehdyillä kentänmuokkaajilla, jotka muotoillaan siten, että magneettikenttä saadaan halutun muotoiseksi.

Magneetti-impulssimuovauksen etuja ovat:

- Nopea menetelmä: muovausnopeus on jopa 300 m/s, joten takaisinjousto on lähes olematonta.
- Tarkka säädettävyys ja hyvä toistotarkkuus.
- Ei vahingoita työkappaleen pintaa.
- Ei haitallista lämpövaikutusta.
- Ei tarvita voitelua.
- Voidaan muovata valmiiksi pinnoitettuja kappaleita.
- Voidaan muovata kappaleita, joihin ei päästä mekaanisesti lainkaan käsiksi (esim. eristeen sisällä tai suojapakkauksessa olevat metalliosat).

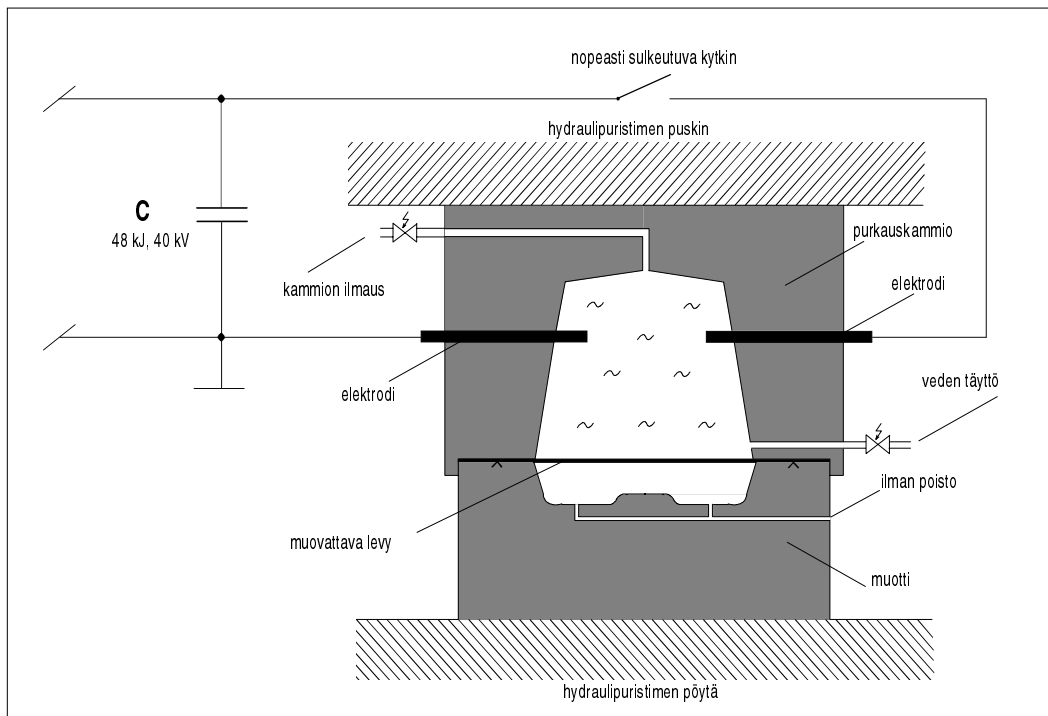
Tyypillisiä magneetti-impulssimuovauksen sovelluskohteita ovat eri materiaaleista tai eri ainepaksuuksista koostuvien osien kokoonpanot (kuva 3) ja kaasutiiviit liitokset, esim. auton bensiinipumppu ja öljynsuodatin, nivelakseli (putken liittäminen niveleen), putkikulake ja suurjännite-eristin (metallipäädyn liittäminen keraamieristeeseen) /3/.



Kuva 3. Putken liittäminen levyyn magneetti-impulssimuovaamalla /2/.
1 = putki, 2 = laippalevy, 3 = käämi.

2.3 SÄHKÖIMPULSSIMUOVAUS

Sähköimpulssimuovaus (engl. *electrohydraulic forming*) muistuttaa periaatteeltaan räjähdysmuovausta, jossa räjähdyspanos on korvattu sähköpurkauksella. Kondensaattoriin varattu sähköenergia puretaan elektrodien välissä nesteellä täytetyssä kammiossa (kuva 4). Nesteeseen, joka useimmin on tavallista vesijohtovettä, syntyy paineaalto ja sitä seuraava nesteen virtaus muovaavat aihion yksipuoleista muottia vasten. Elektrodien välissä voidaan käyttää myös johdelankaa, joka höyrystyy purkauksessa. Materiaalista, aihion paksuudesta ja kappaleen muodosta riippuen tarvitaan yksi tai useampia iskuja kappaleen muovaamiseksi. /4, 5, 6/



Kuva 4. Sähköimpulssimuovauksen periaate /7/.

Kondensaattorin jännite on muutamia kymmeniä kilovoltteja ja maksimivirta muutamia satoja kiloampeereja. Impulssin kesto aika on alle 200 μ s ja tyypillinen muovautumisnopeus 300 m/s. Suuri muovautumisnopeus parantaa materiaalin plastisia ominaisuuksia hitaisiin muovausmenetelmiin verrattuna ja poistaa takaisinjouaston lähes kokonaan.

Impulssivirtayksikköön kuuluu suurjännitemuuntaja, tasasuuntaaja, kondensaattoripaketti, johtimet ja purkauskytkin. Muovausyksikössä on puristin, muovauskammio, vedensyöttölaite ja mahdollinen alipainejärjestelmä. Tuotekohtaisena muovaustyökaluna toimii muotti (tyynyosa). Purkauskammio toimii levynpidättimenä, ja painimen tehtävän suorittaa vesi. Muotissa on reikiä ilman poistamiseksi aihion ja muotin välistä. Joskus ilman poistamista helpotetaan alipaineen avulla.

Sähköimpulssimuovauksella on useita etuja perinteisiin muovausmenetelmiin nähden:

- Menetelmä soveltuu hyvin myös pienille sarjoille ja jopa yksittäiskappaleille.
- Erittäin nopean muovauksen ansiosta ainetta voidaan muovata yhdessä työvaiheessa ilman lämpökäsittelyjä huomattavasti enemmän kuin hitailla menetelmillä (esim. syväveto).
- Menetelmä sallii muotoja, jotka muilla menetelmillä olisivat mahdottomia valmistaa.
- Takaisinjousto on erittäin vähäistä, joten päästään parempaan muototarkkuuteen. Tavallisesti saavutetaan toleranssiaste IT 9.
- Tarvitaan vain yksipuoleinen ja tavallisesti rakenteeltaan yksinkertainen muotti, joten pääomakulut ja läpäisy aika pienenevät. Samaa työkalua voidaan myös käyttää eripaksuisille levyaihioille. /8/
- Muovattavat protokappaleet voidaan valmistaa nopeasti ja edullisesti, joten kynnys koesarjojen valmistukseen madaltuu /8/.
- Muovaukseen voidaan liittää myös muita työvaiheita, kuten lävistystä, rajausta ja kaulustusta.

3 SÄHKÖIMPULSSIMUOVAUSTUTKIMUKSEN JA LAITEKEHITYKSEN NYKYTILA

3.1 SÄHKÖIMPULSSIMUOVAUKSEN TUTKIMUS JA HYÖDYNTÄMINEN MAAILMALLA

Venäjällä sähköimpulssimuovausta on tutkittu viimevuosikymmeninä varsin runsaasti. Pietarin teknillisessä yliopistossa (PYO) on tehty vuosina 1968 - 1995 37 lisensiaatintyötä sähköimpulssimuovauksesta. PYO:n tutkimuslaitteisto on venäläisvalmisteinen 40 kV:n ja 32 kJ:n laite, ja sitä on itse modifioitu. Tutkimuskohteina ovat olleet mm. kammion paine ja lämpötila sekä elektrodien materiaalit ja eristeet.

PYO:ssa on mitattu 200 MPa:n (2 000 bar) painetasoja elektrodien väliin syntyvän sähköpurkauksen (purkaukskanavan) lähellä ja 60 - 70 MPa (600 - 700 bar) aihion pinnassa. Suunnatulla kammiolla on aihion pintaan saatu jopa 1 GPa:n (10 000 bar) paine. Purkaukskanavan lämpötila voi olla 20 000 - 30 000 °C, mutta kammion neste (vesi) ei kuitenkaan olennaisesti lämpene.

Pietarin alueella sähköimpulssimuovaus oli vuonna 1995 käytössä viidessä eri yrityksessä, joissa valmistettiin lentokoneiden ja avaruusaluusten osia sekä muita sotatarviketeollisuuden tuotteita.

Yhdysvalloissa sähköimpulssimuovausta on tutkittu vuosina 1955 - 1970 ja sen jälkeen vasta aivan viime vuosina. Ohio State University (OSU), Columbuksessa, Ohiossa, on juuri käynnistänyt suurnopeusmuovausmenetelmien tutkimuksen. OSU on hankkinut 48 kJ:n ja 10 kV:n laitteiston, jonka on valmistanut Maxwell-Magneform. Tutkimuskohteina ovat olleet mm. elektrodiväljen ja johdelangan paksuuden vaikutus muovaukseen sekä eri materiaalin muovattavuus. /1/

Venäläislähteiden mukaan mm. Apollo-avaruusalusten osia on valmistettu sähköimpulssimuovaamalla.

Myös Japanissa on tutkittu sähköimpulssimuovausta ja valmistettu laitteita.

3.2 KAUPALLISET LAITTEISTOT

Sähköimpulssimuovauslaitteita on saatavissa ainakin Yhdysvalloista ja Venäjältä. Maxwell-Magneform Yhdysvalloissa valmistaa magneetti-impulssimuovauslaitteita sarjatuotteina, ja sieltä on saatavissa myös sähköimpulssimuovauslaitteiden sähkölaitteistoja. Japanissa laitevalmistus on lopetettu. Neuvostoliitossa sähköimpulssimuovauslaitteita on valmistettu useita eri kokoja ja tyyppisiä, joista esimerkkinä on venäläisestä kirjallisuudesta peräisin oleva taulukko 1.

Taulukko 1. Sähköimpulssimuovauspuristimia /5/.

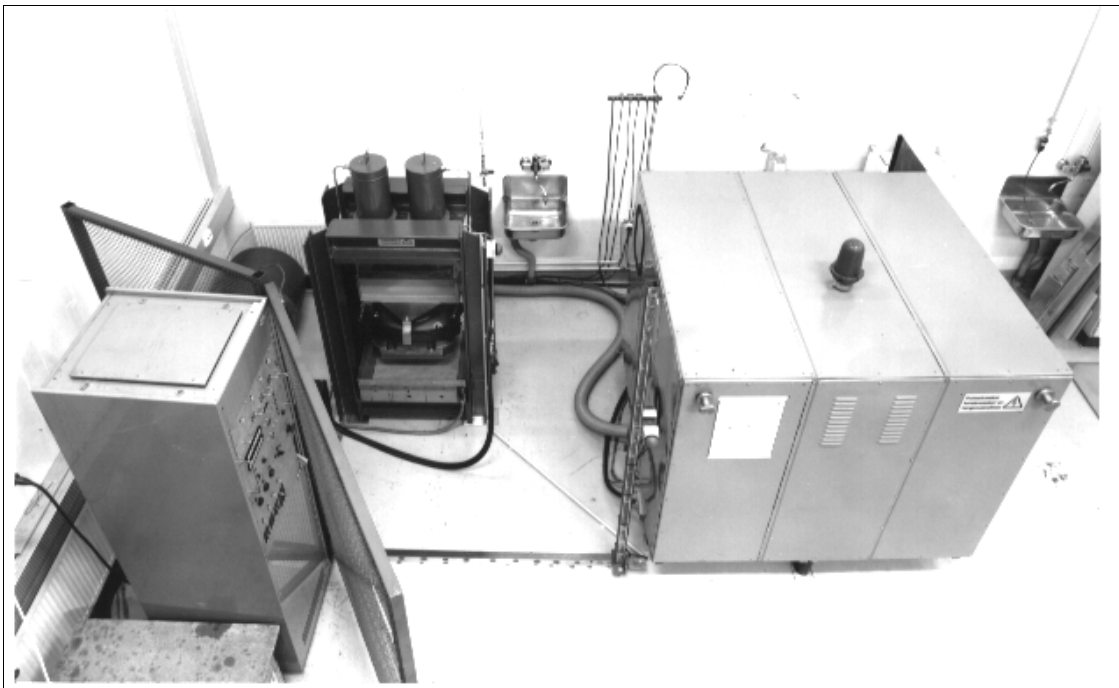
	Udar-1	Udar-11	T1231	T123	PF-50 (japanil.)
Suurin impulssienergia [kJ]	12,5	150	128	20	100
Suurin käyttöjännite [kV]	10	50	40	-	6
Tasokappaleen suurin koko [mm]	2500 x 1200	2000 x 2000	1200 x 1200	650 x 650	-

Sähkölaitteiston kriittisimpiä komponentteja ovat impulssikondensaattorit, joiden valmistajia on varsin vähän. Kondensaattoreita valmistetaan ainakin Yhdysvalloissa (Maxwell-Magnetron) ja Venäjällä (Serpuhovin tehdas, NOVIK). Kaikki muut komponentit saadaan esimerkiksi sähkönjakelutekniikan komponenttivalikoimasta.

4 VTT:N LAITTEISTO

4.1 SÄHKÖLAITTEET

VTT:n sähköimpulssimuovauslaitteen (kuva 5) impulssivirtalähteen lähtöarvot määritettiin yhdessä Pietarin teknillisen yliopiston asiantuntijoiden kanssa. Tavoitteeksi asetettiin laitteiston soveltuvuus enintään 500 x 500 mm:n kokoisten kappaleiden muovaamiseen enintään 2 mm:n kylmävalssatusta teräslevystä. Muovauskammiossa käytettäisiin väliaineena vettä, ja elektrodien välissä ei tavallisesti käytettäisi siltalankaa. Laitteen muovaustehon pitäisi olla vähintään Pietarin teknillisen yliopiston laitteen luokkaa.



Kuva 5. VTT:n sähköimpulssimuovauslaite. Vasemmalla ohjaus- ja säätöyksikkö, keskellä muotinsulkupuristin muovauskammioineen, oikealla suurjänniteyksikkö.

Impulssivirtalähde hankittiin Pietarin lähistöllä sijaitsevasta NIEFA-tutkimuskeskukseen kuuluvasta SINTEZ-yksiköstä. Sähkölaitteiston pääosat ovat kolmivaihemuuntaja, tasasuuntaaja, kondensaattorit, purkauskytkimet sekä ohjaus- ja turvalaitteet. Kondensaattorit on valmistettu Serpuhovin tehtaalla.

Impulssivirtalähteen suurin käyttöjännite on 40 kV, suurin impulssienergia 48 kJ, impulssitaajuus 0,2 Hz, suurin purkausvirta 200 kA ja verkkoliityntäteho 25 kW. Laite painaa noin kolme tonnia. Laitteisto on rakennettu kahteen yksikköön

(suurjänniteyksikkö ja ohjausyksikkö), joiden välillä on valokaapeliyhteys mittausta ja ohjausta varten. Lisäksi laitteistoon on varattu liittymämahdollisuus mikrotietokoneelle.

4.2 MAADOITUS

Työturvallisuuden varmistamiseksi sähkölaitteelle rakennettiin erillinen maadoitus. Maadoituskaapeli kytkettiin sähköyhtiön syöttöjohtimen mukana olevaan yleismaadoitukseen suoraan kiinteistön sähköliittymään. Lisäksi maadoitusjohtimeen lähelle sähkölaitetta kytkettiin kolme pystyelektrodia. Maadoitusvastuksen arvoksi mitattiin alle 4 ohmia.

4.3 MUOTINSULKUPURISTIN

Puristin (kuva 6) koostuu I-palkeista kootusta kehästä ja kahdesta vierekkäin asennetusta hydraulisylinteristä, joilla saadaan yhteensä 1,2 MN:n sulkuvoima. Sylinterien käyttövoima saadaan siirrettävästä hydrauliyksiköstä. Muotin sulkemiseen voitaisiin yhtä hyvin käyttää myös tavallista hydraulipuristinta tai esimerkiksi ruuvijärjestelmää.



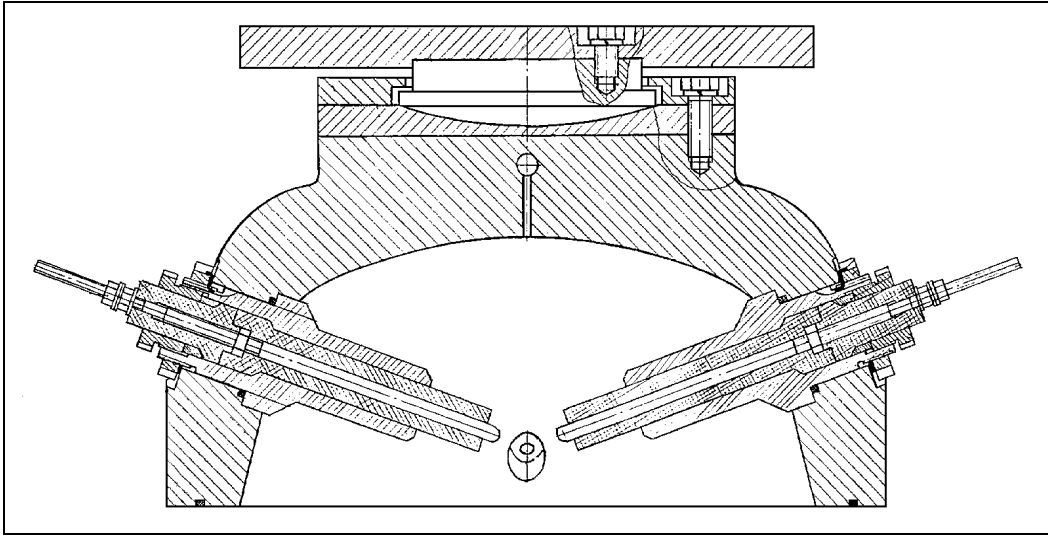
Kuva 6. Muotinsulkupuristin.

4.4 MUOVAUSKAMMIOT

Laitteistoon hankittiin kolme erikokoista muovauskammiota, joiden aukon koot ovat 400 x 400 mm, Ø 200 mm ja Ø 100 mm. Pyöreillä kammioilla on yhteinen runko, johon voidaan asentaa aukoltaan joko Ø 200 mm:n tai Ø 100 mm:n kammio-osat. Kammiot (kuvat 7 ja 8) suunniteltiin PYO:ssa ja valmistettiin Suomessa.

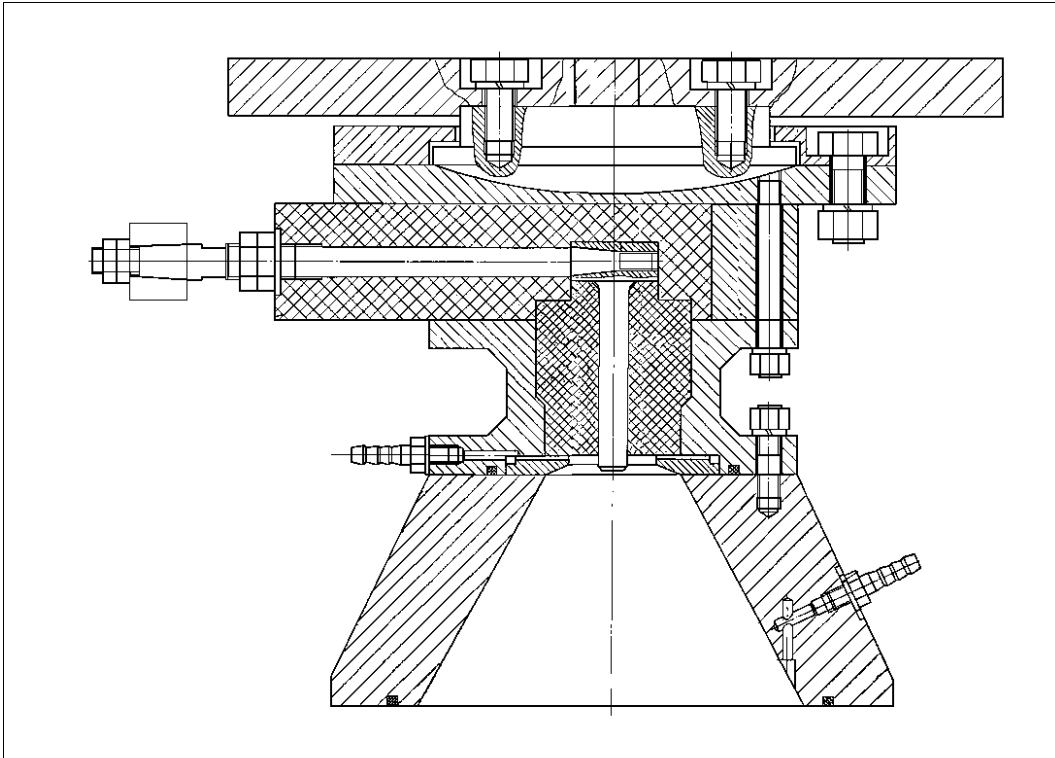
Ison kammion (kuva 7) molemmat elektrodisauvat on eristetty rungosta. Elektrodiväliä voidaan säätää välillä 0 - 50 mm. Elektrodien pystysuora etäisyys kammion alareunan tiivistystasosta on elektrodivälistä riippuen noin 40 mm. Elektrodien etäisyyttä aihion voidaan parhaiten säätää asettamalla kammion ja aihion väliin halutun paksuisia välilevyjä. Muotoiltujen välilevyjen avulla kammion aukkoa voidaan pienentää tai

suurentaa kokoon 500 x 500 mm asti, jota pidetään suurimpana yhdellä elektrodiparilla muovattavissa olevana kappalekokona.



Kuva 7. Neliöaukkoinen muovauskammio, jonka aukon koko on 400 x 400 mm.

Pyöreän kammion (kuva 8) rengasmaisen miinuselektrodi on kytketty kammion runkoon. Vesitilan yläosassa sijaitseva elektrodiväli on kiinteä (15 mm), ja sitä voi muuttaa vain vaihtamalla toinen tai molemmat elektrodit. Ø 200 mm:n kammiossa elektrodien pystysuora etäisyys tiivistystasosta (aihiosta) on 120 mm ja Ø 100 mm:n kammiossa 50 mm. Elektrodien ja aihion välistä etäisyyttä samoin kuin aukon muotoa voidaan muuttaa käyttämällä välilevyjä kammion ja aihion välissä.



Kuva 8. Pyöreäaukkoinen muovauskammio, jonka aukon kooksi voidaan vaihtaa \varnothing 200 mm tai \varnothing 100 mm.

4.5 TYÖKALUT

Käytetyt työkalut olivat kappalekohtaisia muotteja. Muotteja esitellään luvussa 6 esimerkkikappaleiden muovauskokeiden ja niiden tulosten esittelyn yhteydessä.

5 LAITTEISTON KOEKÄYTTÖ

5.1 ERI ELEKTRODIVÄLEILLÄ TARVITTAVA PURKAUSJÄNNITE

Muovausimpulssin voimakkuutta tietyllä elektrodivälillä voidaan säätää vain purkausjännitteen eli kondensaattorien latausjännitteen avulla, koska kondensaattoripaketin kapasitanssi pysyy vakiona. Hallitun sähköpurkauksen syntyminen edellyttää riittävän korkeaa purkausjännitettä, joka riippuu mm. elektrodivälistä, elektrodien koosta ja muodosta sekä kammiossa käytetystä nesteestä. Liian alhainen purkausjännite voi aiheuttaa purkauksen täydellisen ta osittaisen epäonnistumisen: Purkaus ei ehkä ehdi käynnistyä lainkaan oikosulkukytkimen kytkentäaikaan tai turvajärjestelmään säädetyssä ajassa, purkauksen viivästyminen voi aiheuttaa jännitteen alenemisen oikosulkuvastusten ja kammionesteen läpi kulkevan häviövirran takia, tai kondensaattorit voivat purkautua vain osittain.

Ensimmäisten kokeiden tulosten perusteella hallitun purkauksen varmistamiseksi veteen lisättiin 0,1 % ruokasuolaa. Purkauksen onnistumisen todennäköisyys tässä suolaliuoksessa eri elektrodiväleillä mitattiin ns. up & down -menetelmällä, jossa onnistuneen purkauksen jälkeen purkausjännitettä pienennetään ja epäonnistuneen purkauksen jälkeen suurennetaan vakiomäärällä. Koetuloksista voidaan laskea tarvittava purkausjännite eri onnistumistodennäköisyyksillä. Taulukossa 2 on 50 %:n onnistumistodennäköisyys 5 mm:n, 10 mm:n ja 15 mm:n elektrodiväleillä.

Taulukko 2. Tarvittava purkausjännite 50 %:n onnistumistodennäköisyydellä eri elektrodiväleillä /9/.

Elektrodiväli [mm]	5	10	15
Purkausjännite 50 %:n onnistumistodennäköisyydellä [kV]	8,2	8,6	9,8

Haluttaessa käyttää alemmaa purkausjännitettä elektrodien väliin on kytkettävä siltalanka. Liuoksen suolapitoisuuden lisääminen suuremmaksi kuin 0,1 % ei alenna tarvittavaa purkausjännitettä.

5.2 ELEKTRODIVÄLIN VAIKUTUS MUOVAUKSEEN

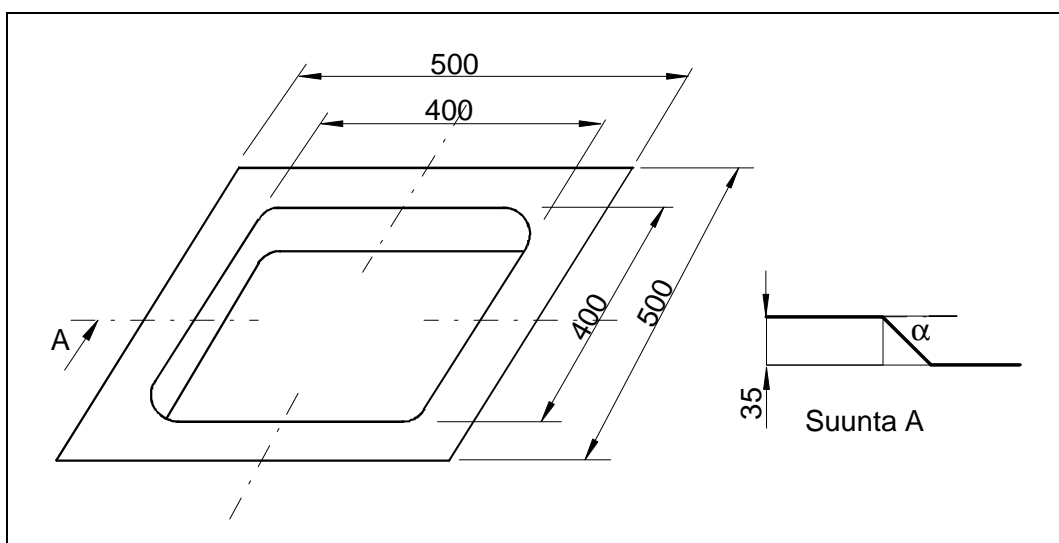
5.2.1 Koejärjestely

Elektrodivälin vaikutusta muovauksen tehokkuuteen selvitettiin tekemällä muovauskokeita isolla muovauskammioilla (aukko 400 x 400 mm) elektrodiväleillä 5 mm, 10 mm, 15 mm ja 20 mm. Elektrodiväli oli vesitilan keskellä 60 mm aihion yläpuolella. Kondensaattorit ladattiin vakiojännitteeseen 20 kV. Aihiona oli 500 x 500

mm:n kokoinen 1 mm:n pinnoittamaton peruslaatuinen kylmävalssattu teräslevy (CR2) ja muottina kammion aukon kokoinen ja muotoinen sekä 35 mm syvä muotti. Kullakin elektrodivälillä muovattiin kolme neliön muotoista kappaletta, joista mitattiin kappaleeseen muovautuneen kupin reunan kulma kaikkien sivujen keskeltä. (kuva 9)

5.2.2 Tulokset

Muovauskokeiden tulokset eri elektrodiväleillä on koottu taulukkoon 3. Tuloksista nähdään, että muovausaste paranee selvästi 15 mm:n elektrodiväliin asti, mutta ei olennaisesti enää suurennettaessa väliä 20 mm:iin. /9/



Kuva 9. Muovauskoekappale. Muodon (syvyys 35 mm) reunan muovautumiskulma α mitattiin sivujen keskikohdilta (katkoviivat).

Purkausvirran värähtely vaimenee nopeammin elektrodivälin kasvaessa, koska elektrodivälin resistanssi tällöin suurenee. Ilmeisesti 15 - 20 mm:n elektrodivälillä saavutetaan purkausvirran optimaalinen vaimennus muovaustehokkuuden kannalta.

Taulukko 3. Elektrodivälin vaikutus muovaustehokkuuteen.

Elektrodiväli [mm]	5	10	15	20
Muovauskulman keskiarvo [°]	21,8	23,7	38,1	38,2

5.3 SILTALANGAN VAIKUTUS MUOVAUKSEEN

Kytkemällä elektrodien väliin purkauksessa ainakin osittain höyrystyvä siltalanka voidaan varmistaa purkauksen syntyminen myös pienillä purkausjännitteillä, suurilla elektrodiväleillä tai käytettäessä muovauskammiossa huonosti sähköä johtavaa nestettä. Elektrodien välille kytketyn siltalangan (0,2 mm:n kuparilanka) vaikutusta muovaukseen selvitettiin 5 mm:n, 15 mm:n ja 20 mm:n elektrodiväleillä samanlaisella koejärjestelyllä kuin kohdassa 5.1. Tulokset on koottu taulukkoon 4.

Siltalangan käyttö pienentää selvästi muovaustehokkuutta 15 mm:n ja 20 mm:n elektrodiväleillä. Siltalanka pitää elektrodivälin resistanssin vakiona. Tällöin purkausvirran värähtelyaika pysyy lähes vakiona elektrodivälistä riippumatta, ja purkausvirran vaimenemisnopeus on suurellakin elektrodivälillä muovaustehokkuuden kannalta optimaalista pienempi.

Taulukko 4. Elektrodivälin vaikutus muovausasteeseen käytettäessä siltalankaa.

Elektrodiväli [mm]	5	15	20
Muovauskulman keskiarvo [°]	21,5	22,4	23,0

5.4 KUMILEVYN VAIKUTUS MUOVAUKSEEN

Aihioon kohdistuvaa impulssia voidaan vaimentaa paikallisesti asettamalla haluttuihin kohtiin aihion päälle joustavaa vaimennusmateriaalia, esimerkiksi kumia. Toisaalta muotin ja aihion väliin asetetulla lisämateriaalilla voidaan muuttaa muotin geometriaa myös paikallisesti tai tilapäisesti.

Kumilevyn vaikutusta muovaukseen tutkittiin asentamalla 2 mm paksu kumilevy toisaalta aihion ja muotin väliin ja toisaalta aihion ja vesitilan väliin. Muovauskammiona käytettiin pyöreää Ø 200 mm:n kammiota ja purkausjännitteenä 15 kV:a. Aihiona oli 0,75 mm:n pinnoittamaton peruslaatuinen kylmävalssattu teräslevy (CR2) ja muottina VTT:n logo, jossa on pohjalevyn päälle asetettu 2 mm korkea kuvio.

5.4.1 Kumilevy aihion ja muotin välissä

Aihion ja muotin väliin asennettu 2 mm paksu kumilevy suurentaa voimakkaasti sekä ulkopuolisia että sisäpuolisia pyörityssäteitä.

5.4.2 Kumilevy aihion ja vesitilan välissä

Aihion ja vesitilan väliin asennettu 2 mm paksu kumilevy vaimentaa impulssia, eli saadaan sama muovaustulos kuin pienemmällä purkausjännitteellä. Varsinkin sisäpuoliset pyörityssäteet suurenevät.

5.5 KAMMION TÄYTTEEN VAIKUTUS MUOVAUKSEEN

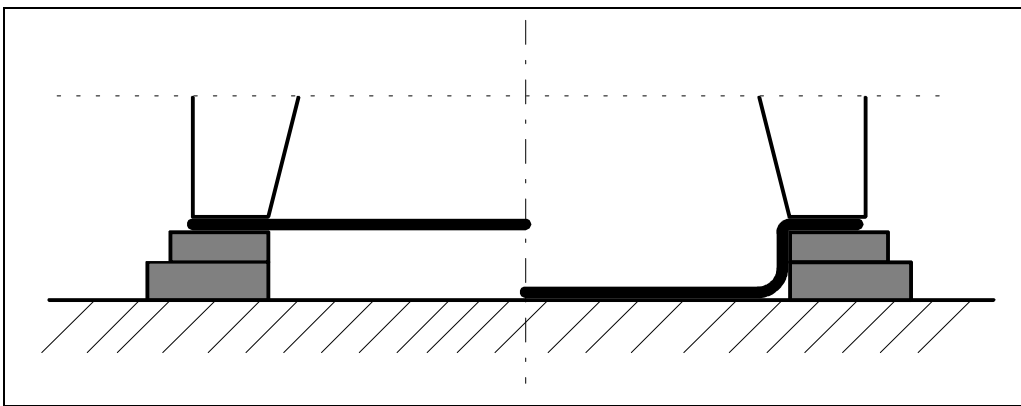
Kammion täytemateriaalin vaikutusta muovaukseen selvitettiin asentamalla Ø 200 mm:n muovauskammioon vanerirengas, joka pienensi kammion aukon halkaisijan 120 mm:iin. Aihiona oli 0,5 mm:n kuumasinkitty teräslevy ja muottina 3 mm paksu reikälevy, jossa oli Ø 30 mm:n reikiä matriisissa, jonka sekä pysty- että vaakarivien etäisyys toisistaan oli 35 mm.

Muovauskokeiden perusteella voidaan sanoa, että täytemateriaali pienentää tehokkaan muovauksen alueen likimain muodostuneen aukon kokoiseksi. Aihio muovautuu jonkin verran myös täytemateriaalin alta varsinkin, jos muotin reiät ulottuvat aukkoon asti. Muovauksen voimakkuudessa aukon kohdalla ei havaittu eroa ilman täytepala muovattuihin aihioihin verrattuna.

6 ESIMERKKIKAPPALEIDEN MUOVAUSKOKEIDEN TULOKSIA

6.1 PERUSMUOTTI

Perusmuotti on ison muovauskammion kokoinen ja muotoinen muotti. Ahiota vasten tulee 12 mm paksu teräslevy, ja muotin pohjana on ehyt teräslevy. Reunoiltaan pyöristetyn pintalevyn ja pohjalevyn väliin voidaan lisätä täytelevyjä (kuva 10). Pinta- ja täytelevyissä on 400 mm x 400 mm:n aukko, jonka nurkkien pyöristyssäde on 65 mm. Ilma poistuu pohjalevyn ja sen yläpuolella olevan levyn välistä. Täytelevyjen materiaalina kokeiltiin menestyksellisesti tavallista havuvaneria. Muotin valmistuskustannukset materiaaleineen ovat alle 1 000 mk.



Kuva 10. Muovaus ison kammion perusmuotilla. Vasemmalla tilanne ennen muovausta ja oikealla muovauksen jälkeen.

Esimerkkinä perusmuotilla muovatusta kappaleesta on 46 mm syvä "pullapelti", joka on muovattu 0,75 mm:n CR2:sta 600 x 600 mm:n ahiosta. Muovauksessa tarvittiin 15 impulssia (13 kV - 30 kV) 15 mm:n elektrodivälillä. Kappaleen pohjan pyöristyssäteeksi tuli 15 mm sivun keskellä ja 50 mm nurkissa.

Perusmuotilla tehtiin muovauskokeita myös muilla materiaaleilla. Mm. 0,5 mm:n rei'itettyä teräslevyä muovattiin 12 mm syvään muottiin käyttämällä 2 mm:n kumilevyä tiivisteenä reikälevyaihion ja vesitilan välissä.

Perusmuottikappaleen suurehkon tasoalueen keskelle muodostuu helposti ympyrämäisiä aaltoja, jos syvää kappaletta aletaan muovata materiaaliin ja levynpaksuuteen nähden liian suurilla impulsseilla.

6.2 YIT:N LOGO

Muotti on valmistettu kahdesta 2 mm:n teräslevystä (kuva 11). Pintalevyyn on leikattu muovattavan logon kuvio, ja pohjalevyyn on liimattu logon irto-osat sekä leikattu ilmanpoistourat. Muotin valmistuskustannukset materiaaleineen ovat alle 500 mk. Muotin valmisti Kasettipelti Oy.



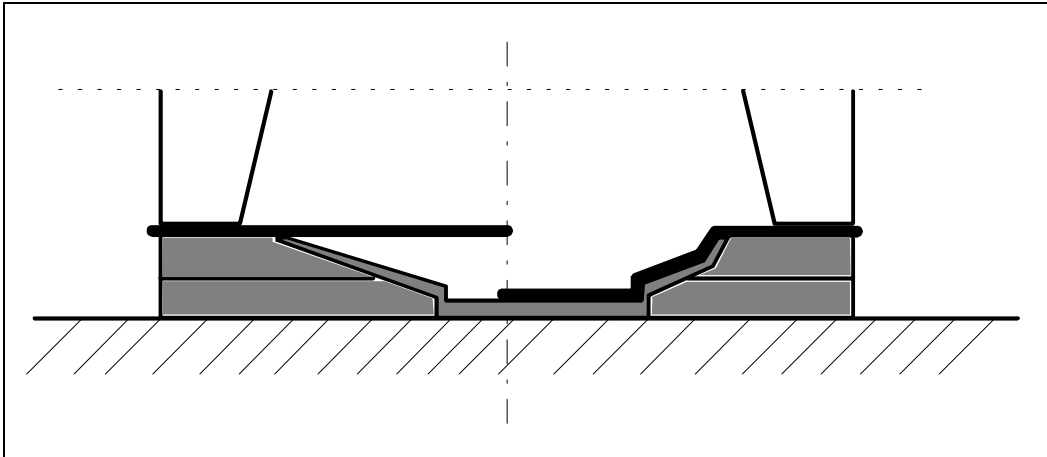
Kuva 11. Levyrakenteinen logomuotti ja sillä muovattu kappale.

Matalien muotojen muovaamiseen riittää tavallisesti yksi impulssi. Logoja muovattiin eri materiaaleista, mm. pinnoittamattomasta, sinkitystä, muovipinnoitetusta ja rei'itetystä teräksestä, alumiinista, messingistä. Reikälevyjen muovaus on mahdollista usein ilman kumilevyä, jos reikälevyn ehyt suojamuovi jätetään levyn pintaan muovauksen ajaksi.

Tällä periaatteella tehty muotti todettiin soveltuvaksi esimerkiksi yksilöllisten kuvioiden muovaamiseen rakennusten julkisivujen metallipintoihin. Muotin logokuvio ei sen sijaan ole sähköimpulssimuovauksen kannalta edullinen, sillä aihiota ei saada sähköimpulssimuovaamalla pakotettua syväälle muodon teräviin kärkiin logossa äärimmäisinä vasemmalla, oikealla ja ylhäällä (kuva 11). Näiden kohtien muoto jää vajaaksi, koska kiinteää paininta ei ole.

6.3 PAISTINPANNUT

Muotit tehtiin upottamalla alumiininen paistinpannu vanerilevyistä koottuun runkoon. Muotti suljetaan vanerirunkoa vasten, joten alumiinimuottiin ei kohdistu muita voimia kuin itse muovauksesta aiheutuvat voimat. Toinen muotti tehtiin epäsymmetrisestä pannusta (Wingpan) isolle muovauskammiolle (kuva 12) ja toinen symmetrisestä neliömuotoisesta pannusta 200 mm:n kammiolle. Yhden muotin valmistuskustannukset ovat noin 500 mk.



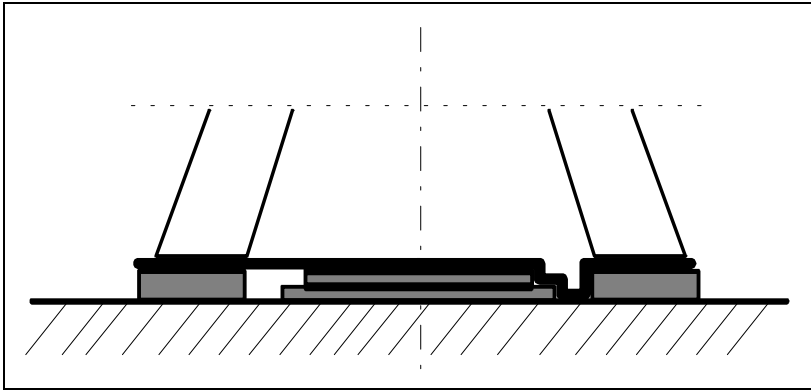
Kuva 12. Paistinpannusta tehty muotti. Vasemmalla tilanne ennen muovausta ja oikealla muovauksen jälkeen.

Muovauskokeita tehtiin 0,5 mm:n ja 0,75 mm:n kylmävalssatulle peruslaatuiselle teräslevylle (CR2) sekä 0,6 mm:n ja 1,5 mm:n puolikovalle alumiinille. Näistä materiaaleista onnistuttiin muovaamaan ehyitä pannun muotoisia kappaleita.

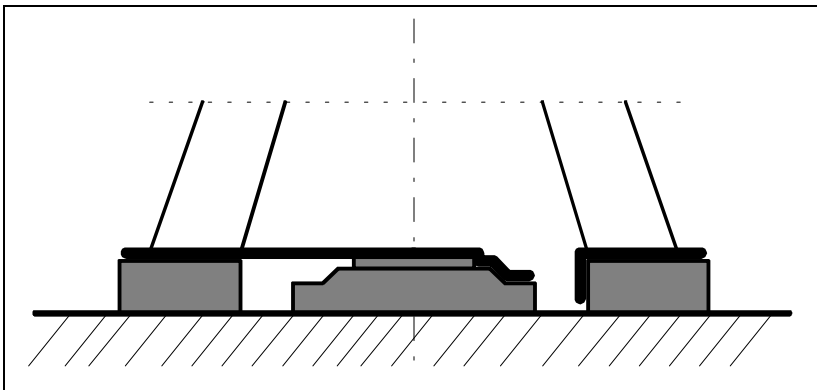
6.4 PIENET LOGOKUVIOT

Pyöreille kammioille (halkaisijat 200 mm ja 100 mm) tehtiin erilaisia logomuotteja, joiden valmistuskustannukset vaihtelevat muutamasta markasta satoihin markkoihin:

- VTT:n logo 2 mm:n teräslevystä Ø 200 mm:n kammiolle (kuva 13)
- kuviota ja tekstejä pahvista ja muovista Ø 200 mm:n kammiolle
- aihion irtileikkaava muotti Ø 100 mm:n kammiolla (kuva 14).



Kuva 13. Muovaus VTT:n logomuotilla. Vasemmalla tilanne ennen muovausta ja oikealla muovauksen jälkeen.



Kuva 14. Muovaus irtileikkaavalla muotilla. Vasemmalla tilanne ennen muovausta ja oikealla muovauksen jälkeen.

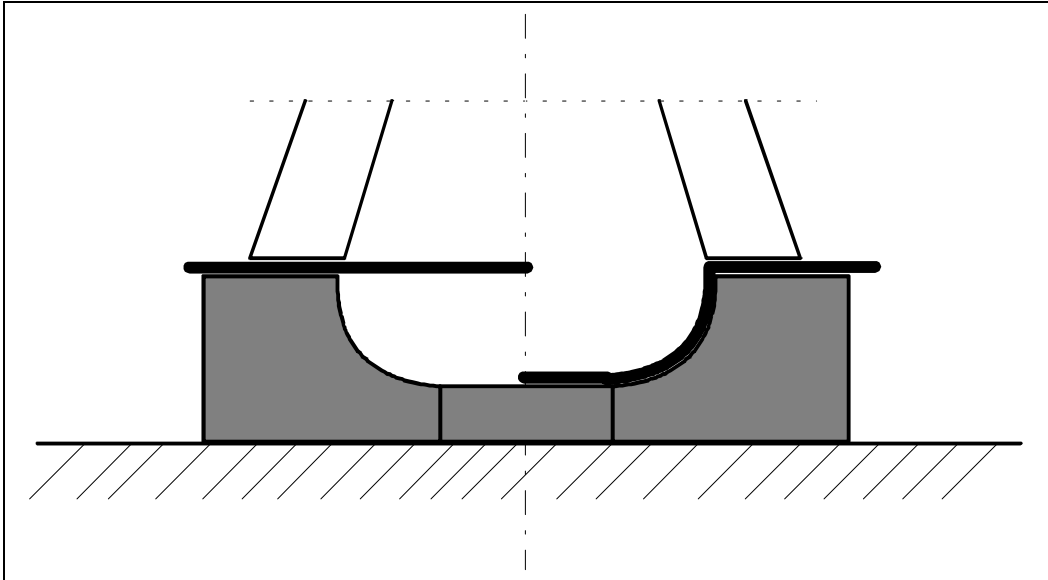
Kuviot liimattiin tai teipattiin kiinni muotin pohjaan. Logot ja kuviot muovattiin yhdellä impulssilla. Ahiomateriaaleina käytettiin 0,5 - 0,75 mm:n paksuista pinnoittamatonta, kuumasinkittyä ja muovipinnoitettua terästä sekä alumiinia, messinkiä ja ruostumatonta terästä.

Teräskuviot soveltuvat kaikille em. materiaaleille myös usean kappaleen sarjalle. Pehmeät pahiset ja muoviset kuviot soveltuvat lähinnä alumiinin muovaukseen yhdelle tai muutamalle kappaleelle. Mainittakoon, että teipattujen kuvioiden kiinnittämiseen käytetyn toimistoteipin jälki näkyy selvästi muovatussa alumiinikappaleessa.

Ahion irtileikkaus voidaan yhdistää muovaukseen, jos voidaan käyttää riittävän suurta impulssienergiaa. Tällöin muovauksen ja irtileikkauksen on tapahduttava yhdellä impulssilla.

6.5 PYÖREÄ KUPPI

Muottina käytettiin vierintämuovaukseen tehtyä pyöreän kupin teräsmuottia, johon tehtiin sähköimpulssimuovaukseen soveltuva pohja ilmanpoistokanavineen vanerista (kuva 15). Kupin halkaisija oli 200 mm ja syvyys 50 mm. Sorvatun muotin valmistuskustannukset ovat noin 1 000 mk.



Kuva 15. Pyöreän kupin muotti. Vasemmalla tilanne ennen muovausta ja oikealla muovauksen jälkeen.

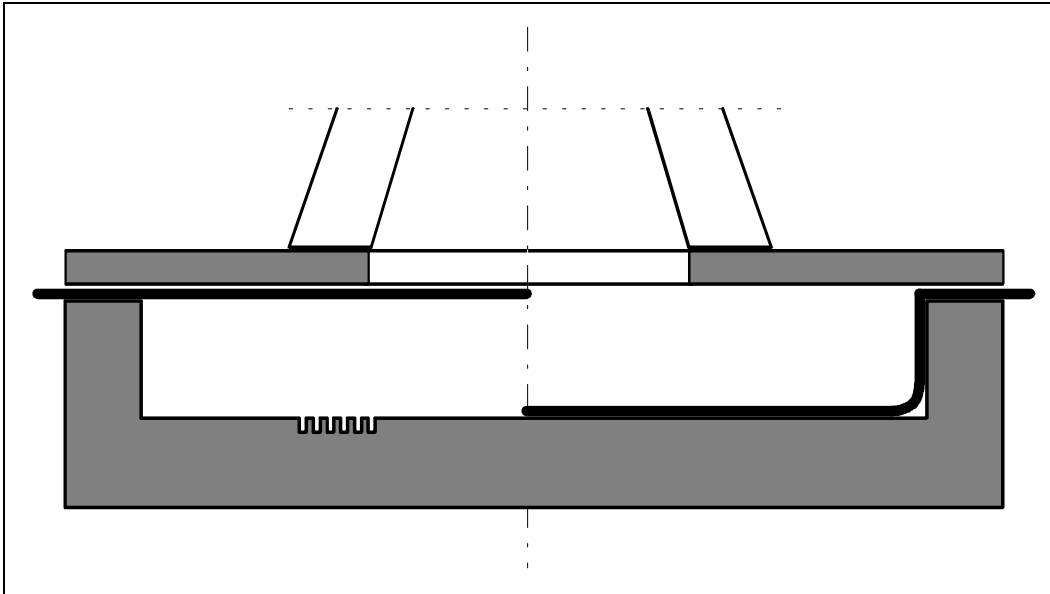
Kupin muoto on muovausystävällinen ja soveltuu monille levymateriaaleille, joista kokeita tehtiin mm. 0,5 - 3 mm:n kylmävalssatulla teräksellä ja 0,6 - 1,5 mm:n alumiinilla. Tällä muotilla muovattiin kuppi paksuimmillaan 3 mm:n CR2:sta! Myös 1 mm:n polykarbonaattilevy soveltui aihiomateriaaliksi.

6.6 TAAJUUSMUUTTAJAN KANSI

Työkalun muutostyö

ABB Industry Oy toimitti VTT:lle kokeita varten alumiinijauhetäytteisestä epoksimuovista valmistetun muovivalumuotin, jota oli käytetty muovisten taajuusmuuttajan kansien valamiseen. Sähköimpulssimuovaukseen kokeita varten muotin naarasosan jakotaso koneistettiin tasaiseksi, jakotasoon lisättiin teräslevy (3 mm), muottiin lisättiin vaneriset päätylevyt ja muotista poistettiin terävät ulokkeet. Kokeissa käytettiin romutettavaksi tuomittua vanhaa muottia, jonka muutuskustannukset sähköimpulssimuovaukseen soveltuvaksi olivat noin 3 000 mk.

Muovauskammioon kiinnitettiin muotin sulkemiseksi 26 mm paksu ja muotin jakotason kokoinen teräslevy (kuva 16).



Kuva 16. Taajuusmuuttajan kannen suorakaiteen muotoinen työkalu. Vasemmalla tilanne ennen muovausta ja oikealla muovauksen jälkeen.

Muovauskokeet

Muovauskokeissa käytettiin muovauskammiota, jonka sisähalkaisija on 200 mm ja ulkohalkaisija 290 mm. Suorakaiteen muotoinen muotti suljettiin em. Teräslevyllä.

Muovauskokeita tehtiin seuraavilla levymateriaaleilla:

- 0,75 mm:n peruslaatuinen teräslevy (CR2)
- 0,7 mm:n syvävetolaatuinen alusinkitty teräslevy
- 0,6 mm:n syvävetolaatuinen teräslevy
- 0,5 mm:n muovipinnoitettu teräslevy.

Muovauskokeissa muovattiin 23 levyaihiota, joihin käytettiin yhteensä 484 impulssia.

Tulokset

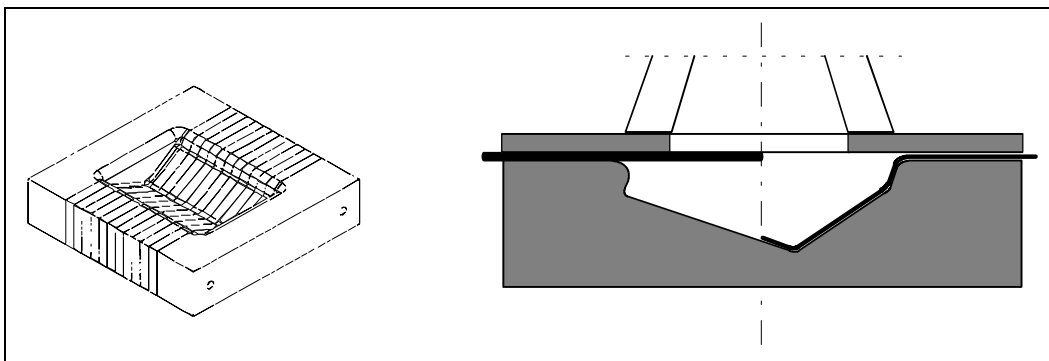
Alumiiniepoxsimuotti kesti 23 kappaleen muovaamisen yhteensä 484 impulssilla. Suunnilleen koesarjan puolivälissä alkoi esiintyä hiushalkeamia, jotka eivät vaikuttaneet muotin käytettävyyteen. Viimeistä kappaletta muovattaessa muotin päädyt alkoivat irrota (levitä). Irtoaminen voitaisiin estää vahvistamalla muottia ulkopuolelta.

Muotin sisäpuolisten nurkkien pyörityssäde jäi varsin suureksi (yli 50 mm). Pyöreää muovauskammio kohdistaa muovauksen pääasiassa muotin keskiosaan, jossa kappale muovautui varsin hyvin muotin muotoon.

Kappaleen nurkkiin ja aihion tasoon syntyi poimuja, jotka estävät levyn virtausta muottiin. Lisäksi poimut aiheuttavat tiivistysongelmia muovauskammion ja aihion välillä. Muotti on liian kapea kappaleen syvyyteen nähden: osa muottiin virtaavasta levystä jää muovauksen alussa vapaaksi muotin ulkopuolelle. Työkalu on liian yksinkertainen: levyn virtaus muottiin ei ole hallittavissa riittävän hyvin.

6.7 PÄÄTYLUUKKU

Orion-yhtymä Oy Soredex valmisti muovauskokeita varten pystyyn asetetuista MDF-levyistä kootun ja koneistamalla valmistetun päätyluukun kannen muotin (kuva 17). MDF-levyä (engl. *medium density fiber board*, keskitiheä kuitulevy) käytetään yleisesti mm. huonekaluteollisuudessa, jossa tyypillisiä MDF-levyn käyttökohteita ovat kaapinovien rungot. Muotin ylätasopintaan lisättiin 3 mm:n teräslevy. Muovauskammiona käytettiin 200 mm:n kammiota. Kammion ja muotin väliin lisättiin 26 mm:n teräslevy muotin sulkemista varten. Muotin valmistuskustannukset ovat noin 5 000 mk.



Kuva 17. Päätyluukun muotti ja muovausjärjestelyt. Keskiviivan vasemmalla puolella on tilanne ennen muovausta ja oikealla puolella muovauksen jälkeen.

Muovauskokeita tehtiin seuraavilla materiaaleilla:

- 0,75 mm:n CR2
- 0,7 mm:n alusinkitty syvävetolaatuinen teräslevy
- 0,5 mm:n muovipinnoitettu teräslevy.

Muotilla muovattiin 10 kappaletta yhteensä 193 impulssilla, ja muotin pinnoissa alkoi esiintyä kulumia.

Paras muovaustulos saavutettiin 0,7 ja 0,75 mm:n levyillä. Muovatus kappaleen pohjan pyörityssäteet särmien risteyskohdissa jäivät kuitenkin varsin suuriksi (30 - 50 mm). Muotin pohjasärmien pyörityssäde oli 15 mm. Lisäksi aihion ylänurkkiin syntyi poimuja. Muotin levyjen saumat jäivät heikosti näkymään muovattuun kappaleeseen. 0,5 mm:n levy repeytyi muovauskokeissa.

7 KUSTANNUSVERTAILU MUIHIN MUOVAUSMENETELMIIN

Sähköimpulssimuovauksen työkalut ovat hyvin edullisia verrattuna muihin muovausmenetelmiin, kuten esimerkiksi syvävetoon, koska toispuoleinen työkalu riittää ja koska voidaan käyttää edullisia ja helposti työstettäviä muottimateriaaleja. Lisäksi sähköimpulssimuovaustyökalujen valmistaminen on nopeaa, koska työkalumateriaaleja on helppo työstää ja esimerkiksi karkaisua ei yleensä tarvita. Työkalun nopean valmistuksen ansiosta koko protokappaleen tai -sarjan läpäisy aika on lyhyt, sillä suurin osa protonvalmistusprosessiin kuluva ajasta tarvitaan työkalujen valmistamiseen.

Toisaalta varsinainen muovaus on melko hidasta lähinnä veden täytön ja tyhjennyksen takia, vaikka veden käsittelyä voidaankin tarvittaessa nopeuttaa mm. suurilla paineilla ja suurilla putkikokoilla käyttämällä. Sähköimpulssimuovausta kannattaakin tavallisesti käyttää vain yksittäiskappaleiden ja pienten sarjojen valmistukseen, jolloin kappaleen valmistuskustannukset koostuvat pääosin työkalukustannuksista. Lyhyillä sarjoilla myös syvävetopuristimien asetusajat ovat pitkiä, joten muovaustyönkin osalta sähköimpulssimuovaus on kilpailukykyinen menetelmä. Joissakin tapauksissa sähköimpulssimuovaus tai räjähdysmuovaus voivat lisäksi olla ainoita mahdollisia valmistusmenetelmiä

Taulukossa 5 on arvioitu luvun 6 esimerkkikappaleiden sähköimpulssimuovaus-työkalujen ja vastaavien puristintyökalujen hintoja.

Sähköimpulssimuovauslaitteisto maksaa noin 500 000 mk. Laitteiden hankinta kannattaa, jos työkalukustannuksissa säästetään riittävän suuri summa riittävän nopeasti. Esimerkiksi jos työkalukustannusten säästö on 50 000 mk kappaleelta, pitäisi vaadittavan takaisinmaksuajan kuluessa valmistaa vähintään kymmenen erilaista protokappaletta tai -sarjaa. Sähköimpulssimuovaus soveltuu hyvin keskisuuren tai suuren yrityksen tuotekehityksen työkaluksi tai muille yrityksille muovauspalveluja tarjoavan alihankintakonepajan tuotantokoneeksi.

Taulukko 5. Työkalujen hinta-arvioita. Kappaleiden nimet viittaavat luvun 6 esimerkkikappaleisiin.

Kappale	Sähköimpulssi- muovaustyökalu	Perinteinen puristintyökalu
"Pullapelti" (ks. kohta 6.1) (500 x 500 x 50 mm)	1 000 mk	50 000 mk
YIT:n logo (ks. 6.2) (Ø300 mm)	500 mk	20 000 mk
VTT:n logo (ks. 6.4) (Ø200 mm)	300 mk	20 000 mk
Irtileikattu logo (ks. 6.4) (Ø80 mm)	300 mk	20 000 mk
Pyöreä kuppi (ks. 6.5) (Ø200 x 50 mm)	1 000 mk	30 000 mk
Taajuusmuuttajan kansi (ks. 6.6) (200 x 300 x 100 mm)	3 000 mk	50 000 mk
Päätyluukku (ks. 6.7) (200 x 300 x 100 mm)	5 000 mk	40 000 mk

8 YHTEENVETO

Sähköimpulssimenetelmällä muovataan ohutlevykappaleita käyttäen muovaavana aineena ("painimena") veden liikettä ja painetta (kuva 4). Kondensaattoripakettiin varattu sähköenergia puretaan elektrodien välissä vedellä täytetyssä purkauskammiossa, jossa syntyvä paineaalto ja sitä seuraava nesteen virtaus muovaavat työkappaleen toispuoleista muottia vasten. Muovaustapahtuma on erittäin nopea, ja kappale ei lämpene muovauksen aikana. Materiaalista, levynpaksuudesta ja kappaleen muodosta riippuen tarvitaan yksi tai useampi purkaus kappaleen muovaamiseksi.

Sähköimpulssimuovauksen tekniikka poikkeaa perinteisistä muovaustekniikoista nimenomaan työkalujen osalta. Vain yksipuoleinen työkalu tarvitaan, ja sen materiaali voi olla lyhyillä sarjoilla helposti työstettävää ainetta, esimerkiksi puuta, muovia, betonia, alumiinia tai karkaisematonta terästä. Toisaalta työkalu voi sisältää pistimiä reikien leikkaamiseksi tai kappaleen rajaamiseksi samassa työvaiheessa. Kappaleessa voi olla negatiivisia päästöjä, joiden valmistus esimerkiksi syvävetämällä on mahdotonta. Tarvittaessa työkalu voidaan koota useasta osasta, joten tuotteen mittoja voidaan helposti muuttaa moduulityökaluilla. Purkauskammion sisämuotoa ja tilavuutta voidaan muuttaa täytepaloilla. Tällöin muovausprosessia voidaan suunnata esim. muotin nurkkiin.

Sähköimpulssimuovaamalla voidaan valmistaa samankaltaisia tuotteita kuin muillakin muovausmenetelmillä, mutta myös sellaisia muotoja, jotka muilla menetelmillä olisivat teknistaloudellisesti kannattamattomia. Prototyyppikappaleita voidaan tehdä nopeasti edullisilla työkaluilla. Menetelmä mahdollistaa pienilläkin sarjoilla sellaisten tuotteiden valmistamisen yhdessä vaiheessa, jotka muilla menetelmillä vaatisivat useita muovaus- ja leikkausvaiheita sekä liittämistä.

Menetelmälle on tunnusomaista

- nopea muovausprosessi, josta seuraa minimaalinen takaisinjousto ja hyvä tarkkuus
- työvaiheiden väheneminen
- raaka-aineen säästö
- soveltuminen myös pienille tuotantosarjoille
- soveltuminen eri metalleille ja erityyppisille raaka-aineille
- asennusmahdollisuus lisälaitteena myös pienehköön hydraulipuristimeen.

VTT Valmistustekniikassa toteutettiin vuosina 1995 - 1996 pääosin julkisrahoitteinen tutkimushanke sähköimpulssimuovauksen teknologian siirtämiseksi Suomeen. Tässä yhteydessä VTT on hankkinut valmiudet palvella asiakkaitaan sähköimpulssimuovaukseen liittyvissä kysymyksissä myös toimeksiantopohjalta. Tyypillisiä toimeksiantoja ovat tapaukset, joissa suunnitellaan ja kehitetään sähköimpulssimuovausprosessi tuotekehityksen kohteena olevalle kappaleelle. Työn lopputuloksena saadaan valmis suunnitelma osan valmistamiseksi muovaamalla: työkalupiirustukset, suunnitelma tarvittavasta muovauslaitteistosta sekä optimoidut työstöparametrit.

Laitteiston koekäyttövaiheessa tutkittiin elektrodivälin, siltalangan, vaimennusmateriaalin ja kammion täytepalojen vaikutusta muovaukseen. Tulokset osoittautuivat samansuuntaisiksi kuin kirjallisuudessa esitetyt tulokset.

Useille esimerkkituotteille, joista osa oli teollisuuden todellisia kappaleita, tehtiin muovauskokeita. Koetulokset vahvistivat menetelmän soveltuvan hyvin ohutlevytuotteiden protokappaleiden ja -sarjojen muovaukseen.

LÄHDELUETTELO

1. Daehn, G. S., Altynova, M., Balanethiram, V. S., Fenton, G., Padmanabhan, M., Tamhane, A. & Winnard, E. High Velocity Sheet Metal Forming - An Old Technology Addresses Current Problems. Journal of Metals (JOM), July 1995.
2. Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki M. & Sihvonen, P. Valmistustekniikka. Espoo: Otakustantamo, 1985. S. 359 - 365.
3. Magneform Corporation. Innovation with Magneform. Esitevideo. San Diego.
4. Penttilä, R., Savinainen, T., Varis, J. & Kujanpää, V. Muovattavien kappaleiden edullinen piensarjavalmistusmenetelmä. Ohutlevyuutiset, 1995. Nro 1, s. 31 - 32.
5. Varis, J. & Savinainen, T. Sähköimpulssimuovaus (SIM). Työraportti. VTT, Konepajan tuotantotekniikan laboratorio, Lappeenranta, 10.6.1992. 14 s.
6. Laurila, L., Pyrhönen, J., Penttilä, R. & Kujanpää, V. Sähköimpulssimuovaus. Sähkö & Tele, 1996. Nro 5, s. 23 - 26.
7. Penttilä, R. Ohutlevyosia nopeasti sähköimpulssimuovaamalla. Ohutlevy, 1996. Nro 1, s. 35.
8. Varis, J. Ohutlevykappaleiden nopea ja edullinen piensarja- ja protovalmistus. Ohutlevy, 1996. Nro 1, s. 36 - 37.
9. Laurila, L. Sähköimpulssimuovaus. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, 1996. 63 s. (Diplomityö.)