

Syvävedon voiteluaineet

Syvävedon kehittäminen uusien voiteluaineiden avulla

Kaisa Oinonen

Opinnäytetyö

Toukokuu 2017

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma

Tuotantotekniikka

Tekijä(t) Oinonen, Kaisa	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2017
	Sivumäärä 121	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Syvävedon voiteluaineet Syvävedon kehittäminen uusien voiteluaineiden avulla		
Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Miikka Parviainen Harri Tuukkanen		
Toimeksiantaja(t) Meconet Oy, Äänekoski		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Meconet Oy:n Äänekosken tehdas, joka on erikoistunut ohutlevyn syvävetotuotteiden valmistamiseen ja simulointiin.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli syvävedon voitelun kehittäminen, jolloin yrityksessä voidaan parantaa myös laatua ja tuottavuutta. Työssä selvitettiin syvävedon nykyaikaisia voiteluaineita ja niiden ominaisuuksia. Työn tavoitteena oli saada tehtyä testitulosten perusteella suosituksia uusista voiteluaineista yrityksen käyttöön. Tavoitteena oli myös perehtyä voiteluaineiden käytön yhteydessä esiintyviin työterveys- ja turvallisuusnäkökohtiin. Meconetilla on tulevaisuudessa tavoitteena automatisoida yksi syvävetopuristin, jolloin myös voitelu suoritettaisiin automatisoidusti. Opinnäytetyössä testattavat voiteluaineet luovat pohjan automatisoidun voitelun suunnitteluun.</p> <p>Opinnäytetyössä selvitettiin voiteluaineiden ominaisuuksiin ja itse voiteluun vaikuttavia tekijöitä. Uusien voiteluaineiden testaukseen valittiin tuotteita haihtuvista, öljymäisistä ja pastamaisista voiteluaineista. Uusien voiteluaineiden testaus suoritettiin kahdelle erilaiselle tuotteelle, joiden materiaali ja materiaalipaksuudet olivat erilaiset. Testausvaiheita olivat syväveto, hitsaus, pesu ja maalaus. Testien aikana havainnointiin myös mahdollisia terveydellisiä vaikutuksia.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena löydettiin potentiaalisia vaihtoehtoja yrityksessä käytettyjen voiteluaineiden tilalle tai rinnalle. Testauksessa saatiin selkeitä eroja voiteluaineiden ominaisuuksista.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Syväveto, ohutlevyn muovaus, voitelu, voiteluaineet, kitka, työterveys, työturvallisuus		
Muut tiedot Opinnäytetyön osat testaus ja tulokset (luvut 9-13), tulostentarkastelu (luvut 14-15) sekä liitteet 2-4 on luokiteltu liikesalaisuudeksi. (Julkisuuslaki kohta 17 ja 20)		

Author(s) Oinonen, Kaisa	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2017 Language of publication: Finnish
	Number of pages 121	Permission for web publication: x
Title of publication Deep drawing lubricants Developing deep drawing with modern lubricants		
Degree programme Degree Programme in Mechanical and Production Engineering		
Supervisor(s) Parviainen, Miikka Tuukkanen, Harri		
Assigned by Meconet Oy, Äänekoski		
Abstract <p>This bachelor's thesis was assigned by Meconet Oy in Äänekoski. The company manufactures sheet steel deep drawing products and has specialized on deep drawing simulation.</p> <p>The aim of the study was to develop lubrication of deep drawing which affect quality and productivity. Properties of new modern deep drawing lubricants and the health risks of their chemicals were examined. Company wanted to know if a more effective lubricant than the one currently in use could be found. The aim was to recommend new lubricants based on the test results. Meconet is going to use more automation in production. The lubrication would be performed automatically also. This study is a good foundation for the plans.</p> <p>After the theoretical research of the properties of the lubricants and finding the lubricant factors, three kinds of lubricants were chosen to testing: volatile, oil based and paste type lubricants. These lubricants were tested with two different kind of products. The material, thickness and deep drawing severity were different. The testing phase were: deep drawing, welding, washing and painting. Health effects were observed through the test period.</p> <p>As a result of the thesis, a few high potential lubricants were to recommend for the company. The lubricants can be used with or replace the previously used lubricants. In testing, there were clear differences between the different lubricant types.</p>		
Keywords/tags (subjects) Deep drawing, sheet metal forming, lubrication, friction, work safety		
Miscellaneous Following parts has been set confidential: test and results (parts 9-15) and attachment 2-4. Based on law of publicity sections 17 and 20.		

Sisältö

1	Opinnäytetyön lähtökohdat ja tavoitteet	10
1.1	Tiedon- ja aineistonkeruumenetelmät.....	11
1.2	Tutkimusmenetelmät	11
2	Meconet Oy	12
3	Syväveto	14
3.1	Syvävetotyökalut	15
3.2	Aihion koon määrittäminen	22
3.3	Vetosuhde	22
3.4	Muovauksessa tarvittavat voimat	25
3.5	Vetonopeus	27
3.6	Vetovirheet.....	28
4	Syvävedon voiteluun vaikuttavat tekijät	31
4.1	Metallipinnan ominaisuudet ja pinnankarheus	31
4.2	Tahmutuminen	32
4.3	Kitka ja kitkakerroin.....	34
5	Voiteluaineet	37
5.1	Voiteluaineen viskositeetti	37
5.2	Voitelumekanismit	39
5.2.1	Paksukalvo- eli hydrodynaaminen voitelu.....	41
5.2.2	Ohutkalvovoitelu	42
5.2.3	Rajavoitelu	42
5.2.4	Sekavoitelu	45
5.3	Voiteluaineiden jaottelu.....	46
5.4	Lisäaineet.....	51
5.5	Voiteluaineelle asetettavat vaatimukset	56
6	Voiteluaineen levittäminen ja poisto	57
7	Muut kitkan hallintamenetelmät	60

7.1	Voitelukangas	60
7.2	CO ₂ -voitelumenetelmä	61
8	Työterveys ja -turvallisuus	62
8.1	HTP-pitoisuudet ja altistumisen arviointi.....	63
8.2	Työstönesteiden käyttö, altistuminen ja terveyshaitat	64
8.3	Metallintyöstössä esiintyviä ilman epäpuhtauksia ja HTP-raja-arvoja	65
8.4	Metallintyöstönesteissä esiintyvät kemikaalit ja niiden käyttötarkoitus	67
8.5	Suojautuminen	68
	Lähteet	71

Kuviot

Kuvio 1.	Meconetin toimipisteet.....	13
Kuvio 2.	Syvävedon periaate.	14
Kuvio 3.	Syvävetotyökalu	15
Kuvio 4.	Kaksitoiminen puristin.....	16
Kuvio 5.	Yksitoiminen puristin ja vetotyyny.	17
Kuvio 6.	Yksitoiminen puristin ja aktiivinen vetotyyny.	18
Kuvio 7.	Painimen ja vetorenkaan pyöritykset (r_p ja r_v).....	19
Kuvio 8.	Vetotyyny (vas.) sekä vetoporras (oik.).....	21
Kuvio 9.	Vetokynnykset.....	21
Kuvio 10.	Rajamuovattavuuspiirros	24
Kuvio 11.	Kappaleeseen vaikuttavat voimat syvävedossa.	25
Kuvio 12.	Syvävedossa esiintyviä vetovirheitä.....	29
Kuvio 13.	Ilman kanssa kosketuksissa olevan metallipinnan rakenne.....	31
Kuvio 14.	Pinnankarheuden muotoja sekä metallipintojen profiili kuormituksen alaisena.....	32
Kuvio 15.	Kylmähitsin muodostuminen	33
Kuvio 16.	Kitkaan ja voiteluun vaikuttavia tekijöitä.....	35
Kuvio 17.	Kitkavoimat.....	36

Kuvio 18. Voiteluaineen rakenne viskositeetin määrittelemiseksi Newtonin mukaan.	37
Kuvio 19. Voiteluainemekanismit	39
Kuvio 20. Stribeck- käyrä ja voiteluainemekanismit.	41
Kuvio 21. Pitkäketjuisen polaarisen hiilivedyn (alkoholi) kiinnittyminen metallipintaan fysikaalisen adsorption avulla.	43
Kuvio 22. Kemiallinen adsorptio - rautaoksidin ja steariinihapon muodostama rautasteariittikerros.	44
Kuvio 23. Kemiallinen reaktio rautasulfidikalvon muodostumisesta.....	45
Kuvio 24. Paineenkestolisäaineiden toiminta- ja aktivoitumisalueet.....	54
Kuvio 25. EP-lisäainepitoisuuden kasvun vaikutus öljyn muihin tärkeisiin ominaisuuksiin.....	55
Kuvio 26. Viskositeetti-indeksin parantajana toimivan polymeerin toiminta	56
Kuvio 27. Liusketestissä käytetty muokattu työkalu hiilidioksidivoitelulle.....	61
Kuvio 28. Prosessikaavio CO ₂ -voitelusta.	62

Taulukot

Taulukko 1. Eri materiaalien rajavetosuhteita	23
Taulukko 2. Eri materiaalien vetonopeuksia.	28
Taulukko 3. Eri voitelumekanismien kitkakertoimia	41
Taulukko 4. Synteettisten nesteiden vertailu mineraaliöljyihin.	47
Taulukko 5. Voiteluaineelta haluttuja ja ei-haluttuja ominaisuuksia.	56
Taulukko 6. Voiteluaineen poistettavuus työn vaativuuden ja voiteluaineen koostumuksen mukaan.	59
Taulukko 7. Metallintyöstönesteiden ilmaan vapautuvia kemiallisia altisteita ja niiden HTP-arvot.....	67

Sanasto

Adheesio	Kahden eri aineen välinen vetovoima (tartuntavoima).
Adsorptio	Ohuen neste- tai kaasukalvon muodostuminen kiinteän aineen pintaan.
Alkanoliamiinit	Yhteisnimitys mono-, di- ja trietanoliamiinien yhdisteistä.
Alkoholiryhmä	Alkoholit ovat orgaanisten yhdisteiden ryhmä, jossa hydroksyyli-ryhmä (-OH) on kiinnittynyt hiiliatomiin. Primääriset alkoholit hapettuvat aldehydeiksi ja aldehydit edelleen karboksyylihapoiksi.
Amiini, amidi	Amiinit ovat ammoniakkin (NH_3) kaltaisia yhdisteitä, joissa yhden, kahden tai kolmen vetyatomin tilalla on jokin orgaaninen ryhmä. Amidit ovat karboksyylihappojen johdannaisia, joissa alkoholiryhmä (-OH) on korvattu amiinilla tai ammoniakilla.
Anisotrooppisuus	Materiaalin ominaisuuksien riippuvuus suunnasta.
AW-lisäaine	Kulumisenestolisäaine (anti wear).
Biosidi	Työstöliuosten bakteerikasvua estävä aine.
Emulsio	Kahden luonnostaan toisiinsa sekoittumattoman nesteen seos. Nesteet saadaan sekoittumaan keskenään emulgattorin avulla. Seos ei ole homogeeninen.
EP-lisäaine	Korkeapainelisäaine (extreme pressure).
Esterit	Esterit ovat orgaanisia yhdisteitä. Estereitä valmistetaan yleensä alkoholista ja karboksyylihapoista.
FM-lisäaine	Kitkan alentajalisäaine (friction modifier).
Hiilivety	Orgaaninen yhdiste, joka koostuu hiilestä ja vedystä. Avoketjuisten alkaanien yleinen kaava on $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$.
HTP-arvo	Haitalliseksi tunnettu pitoisuus. Sosiaali- ja terveysministeriön arvioima pienin ilman kemikaalipitoisuus, joka voi aiheuttaa haittaa tai vaaraa työntekijän terveydelle. Yksikkö ppm tai mg/m^3 .
Karboksyylihapo	Orgaanisia yhdisteitä, joiden funktionaalisenä ryhmänä on karboksyyli-ryhmä -COOH. Heikko happo.
Koheesio	Saman aineen sisäinen (molekyylien välinen) vetovoima.
Kompleksiyhdiste	Molekyyli, joka on muodostunut keskusatomista ja sitä ympäröivistä ioneista, molekyyleistä tai atomeista.

Kontaminaatio	Ei-toivotun osatekijän läsnäolo, pilaantuminen, likaantuminen, saastuminen.
Levynpidätyspaine	Levynpidätysvoima jaettuna levynpidättimen pidätyspinta-alalla.
Levynpidätysvoima	Voima, jolla levynpidätin puristaa aihiota.
Oksidikalvo	Hapettumisen seurauksena muodostunut erittäin ohut kalvo metallin pinnalla.
PAH-yhdisteet	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt. PAH-yhdisteet ovat karsinogeenisiä tai mutageenisiä eli syöpää tai geenivirheitä aiheuttavia yhdisteitä.
PAO	Polyalfaolefiini. Synteettinen perusöljy.
PE-muovi	Polyeteeni. Yksinkertainen polymeeri. Käytetyin muovin polymeerinen raaka-aine.
Polaarinen molekyyli	Molekyylin elektronitiheyden jakautumista, siten että siihen syntyy negatiivisesti ja positiivisesti varautuneet päät.
Polymeeri	Monomeerien eli pienten molekyylien polymeeraatiossa syntynyt yhteenliittymä. Polymeereja on sekä synteettisiä että luonnossa esiintyviä.
PVC-muovi	Polyvinyylikloridi. Kloorin takia PVC-muovin hävittäminen ongelmallista.
R _a -arvo	Aritmeettinen keskimääräinen pinnankarheusarvo.
Rasvahappo	Pitkaketjuisia karboksyylihappoja, joissa on parillinen määrä hiiliatomeja. Rasvahappojen rakenne on CH ₃ (CH ₂) _x COOH.
Rms-arvo	Pintaprofiilin neliöllinen keskipoikkeama (root mean square).
Saippua	Kemialliselta koostumukseltaan rasvahappojen natriumsuola. Rakenne on CH ₃ (CH ₂) _x COONa. Metallisaippuassa metalli-ionina on esim. raskasmetalli (esim. lyijy, tina) tai sinkki.
Tasoanisotropia	Materiaalin ominaisuuksien vaihtelua levyn tason eri suunnissa.
TVOC	Haihtuvien orgaanisten aineiden kokonaispitoisuus (total volatile organic compound).
van der Waals -voimat	Molekyylien välinen, heikko, sähkövarauksista johtuva voima. Kutsutaan myös dispersiovoimaksi.

Vetojarru	Aihion materiaalin virtauseste.
Vetosuhde	Aihion ja painimen halkaisijoiden välinen suhde.
Vetovoima	Painimen kautta muovauksen aikana vaikuttava voima.
VI-lisäaine	Viskositeetti-indeksin parantaja, vähentää voiteluaineen viskositeetin riippuvuutta lämpötilasta.
Viskositeetti	Nesteen sisäinen kitka. Tunnus μ , η tai v .
VOC-yhdiste	Haihtuva orgaaninen yhdiste (volatile organic compound).

1 Opinnäytetyön lähtökohdat ja tavoitteet

Voitelun merkitys syvävedon onnistumiselle on merkittävä. Tehokkaalla voiteluaineella ja siihen sopivalla levitysmenetelmällä voidaan tuotannon toimintaa tehostaa pienillä muutoksilla. Sopivilla voiteluaineilla voidaan myös parantaa tuotteiden laatua.

Opinnäytetyön tavoitteena on löytää tehokkaita nykyaikaisia voiteluaineita syvävetotuotteiden valmistamiseen sekä perehtyä niiden sisältämien kemikaalien käyttöturvallisuuteen. Opinnäytetyössä arvioidaan voiteluaineiden eri ominaisuuksia syvävedossa. Autoteollisuus on edelläkävijä syvävetomenetelmien kehittämisessä. Se on pitkään kehittänyt mm. uusia voiteluaineita ja -menetelmiä osavalmistuksen käyttöön tavoitteena nopeuttaa tuotantoa heikentämättä laatua. Jo pienillä toiminnan tehostamisilla ja ylimääräisten kustannusten minimoinnilla voidaan nostaa yrityksen tuottavuutta.

Tarve voiteluaineiden tutkimiselle Meconetilla lähti halusta automatisoida ja tehostaa tuotantoa. Yhtenä opinnäytetyön tavoitteena on saada nopeutettua kappaleiden valmistusta, esimerkiksi selvittämällä, voiko haihtuvien aineiden käytöllä jättää pesuvaiheen kokonaan pois. Työvaiheen poisjäänti toisi yritykselle merkittäviä säästöjä tuotteiden valmistuksessa.

Opinnäytetyössä selvitetään perinteisten öljypohjaisten voiteluaineiden lisäksi autoteollisuudessa käytettävien vahamaisten sekä haihtuvien aineiden käyttömahdollisuuksia. Yrityksen tavoitteena on saada opinnäytetyön tuloksena suosituksia uusista voiteluaineista, joilla voidaan parantaa mm. laatua ja tuottavuutta. Opinnäytetyössä arvioidaan voiteluaineiden ominaisuuksia syvävedossa sekä selvitetään vetoainejäämien vaikutukset syvävetoa seuraaviin työvaiheisiin kuten pesuun ja maalaukseen.

Voitelutuotteet sisältävät paljon kemikaaleja, jolloin voiteluaineiden terveydelliset näkökohdat tulee huomioida. Uusimpien tutkimustulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että terveydelliset seikat on otettu monessa asiassa huomioon. Kuitenkin huolimattomalla käytöllä voi olla riski terveydellisiin altistumisiin ja mahdollisiin sairauksiin.

Syvävetoon vaikuttaa monet asiat, mutta opinnäytetyössä keskitytään pelkästään voiteluaineiden ominaisuuksien tutkimiseen ja voitelun vaikutusten havainnointiin kappaleessa ja työympäristössä. Esimerkiksi syvävedossa käytettävien puristimien ominaisuuksiin ja säätöihin eikä materiaalin ominaisuuksiin vaikuteta.

1.1 Tiedon- ja aineistonkeruumenetelmät

Opinnäytetyön tiedonlähteinä käytetään syvävetoon liittyviä tutkimuksia ja perustetoksia. Voiteluainetoimittajien kautta pyritään saamaan tietoa nykyaikaisista voiteluaineista sekä referenssiä voiteluaineiden käyttäjistä ja käyttökohteista. Voiteluaineiden käyttöturvatiiedoista saadaan selville kemikaaliturvallisuus ja mahdollinen ympäristön haitallisuus. Testausvaiheessa ainestoa kerätään yhdessä työntekijöiden kanssa.

Voiteluaineiden käyttö ja toimivuus syvävedossa ovat usein yritysten salassa pidettävää tietoa, eikä niistä näin ollen ole saatavilla suoraan lähdemateriaalia.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Tutkimustoiminta voidaan jakaa empiiriseen ja teoreettiseen tutkimukseen. Empiirissä tutkimuksessa voidaan testata teoreettisen aineiston perusteella johdetun hypoteesin (oletamus) toimivuus. Empiirinen tutkimus voidaan edelleen jakaa kvantitatiivisiin (määrällinen) ja kvalitatiivisiin (laadullinen) tutkimuksiin. Kvantitatiivisia tutkimusmenetelmiä ovat mm. erilaiset kokeelliset tutkimukset ja systemaattinen havainnointi. Määrällisessä tutkimuksessa pyritään kuvaamaan asioita numeeristen suureiden avulla. Tuloksia voidaan havainnollistaa erilaisten taulukoiden ja kuvioiden avulla. (Heikkilä 2014, 13, 15.)

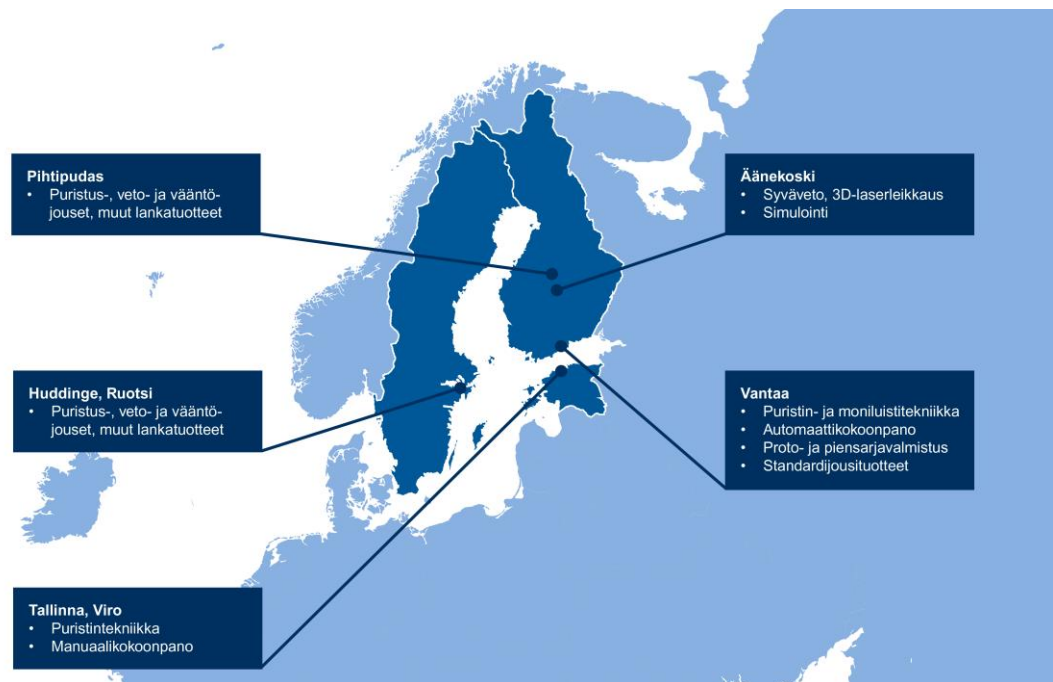
Kvalitatiivisia tutkimusmenetelmiä on mm. erilaiset haastattelu menetelmät. Kvalitatiivisen tutkimuksen aineisto on yleensä tekstimuotoista. Laadullinen tutkimus pyrkii vastaamaan kysymyksiin: miten, miksi ja millainen. Se pyrkii ymmärtämään ilmiötä ns. pehmeän tiedon pohjalta. (Heikkilä 2014, 13, 15.)

Opinnäytetyössä kerätyn teorian tiedon ja referenssien pohjalta valitaan testattavat voiteluaineet. Testausvaiheessa käytetään sekä kvalitatiivisia että kvantitatiivisia tutkimusmenetelmiä. Suurin osa työstä on työn luonteen takia laadullista tutkimusta, josta ei pystytä saamaan tilastollista aineistoa vaan tulokset ovat lähinnä tilannetta kuvaavia sekä visuaalisia havaintoja. Testausvaiheessa kvantitatiivista aineistoa saadaan voiteluainemääristä sekä pesuvaiheessa kappaleen puhtauden määrittämisestä. Opinnäytetyön tutkimusasetelma on intensiivinen eli siinä pyritään tutkimaan muutamaa ainetta mahdollisimman perusteellisesti. Tutkimusmuotona on osin kartoitettava tutkimus, osin kausaalinen eli selittävä tutkimus, mutta myös eksperimentaalinen eli kokeellinen tutkimus, sillä opinnäytetyössä valitaan käytännössä testattavat voiteluaineet kerätyn aineiston pohjalta. Testaustuloksia pyritään vertaamaan ja selittämään kerätyn teorian perusteella.

2 Meconet Oy

Meconet on suomalaisomisteinen perheyhtiö, jolla on yli 120 vuoden historia syvävedosta ja yli 75 vuoden kokemus jousivalmistuksesta. Yritys valmistaa jousia sekä lanka-, meisto- ja syvävetotuotteita sekä tekee niihin liittyviä kokoonpanoja. Yrityksen toimipisteet ovat Vantaalla, Äänekoskella, Pihtiputaalla, Tallinnassa, Tukholmassa sekä Pietarissa (ks. kuvio 1). (Meconet 2017.)

Meconet on kansainvälisesti toimiva alihankintayritys, joka toimittaa tuotteita maailmanlaajuisesti. Konsernin liikevaihto oli vuonna 2016 38 M€. Yritys työllistää noin 230 metallialan ammattilaista. Yritys on aina ollut edelläkävijä syvävetotekniikassa. (Meconet 2017.)



Kuvio 1. Meconetin toimipisteet.
(Meconet Group-yritysesittely, 2016.)

Tuotteet

Syvävetomenetelmällä voidaan valmistaa mm. muotoiltuja, jäykkiä ja tiiviitä ohutlevykoteloita ilman hitsauksen tarvetta. Tuote- ja työkalusuunnittelua helpottaa Autoform simulointi-ohjelmisto. 3D-lasertekniikalla voidaan tuotteisiin tehdä aukotuksia ja rajauksia, jolloin pieni volyymin sarjojen valmistaminen on kustannustehokasta. Meconetilla on nopeat ja joustavat toimitukset syvävetotuotteissa. Syväveto-osille on tyypillistä monipuoliset ja haastavat muodot sekä pienet ja keskisuuret sarjat. (Meconet 2017.)

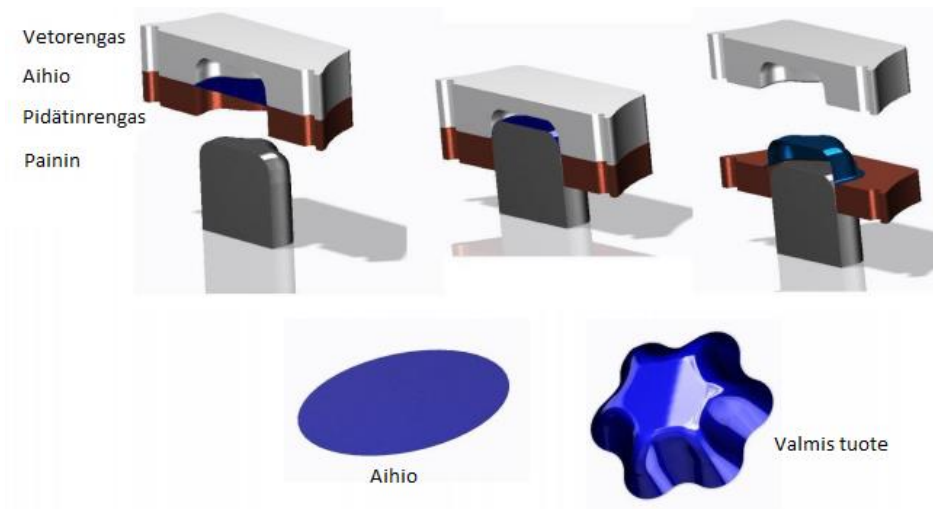
Meconetilla on kattava valikoima jousia ja jousikomponentteja, joita tehdään niin pienissä kuin suurissakin sarjoissa. Tuotevalikoimassa on useita erilaisia jousia, kuten puristusjousia, vetojousia ja vääntöjousia. Meconetilla on yli 8000 standardijousituotteen varasto, josta löytyy mm. kierrejousia ja työkalujousia. (Meconet 2017.)

Meistotuotteita ovat mm. kotelot, häiriösuojat ja erilaiset sähkötekniset ohutlevyosat. Moniulisti-automaateilla valmistetaan erilaisia kiinnittimiä ja liittimiä mm. sähkötuote- ja elektroniikkateollisuudelle. (Meconet 2017.)

Meconetin asiakkaina toimivat useat alansa johtavat kotimaiset ja kansainväliset yritykset. Asiakkaiden toimialoja on mm. sähkötuote-, tietoliikenne-, elektroniikka-, rakennus-, terveys- ja kulkuvälineteollisuudessa. Meconetin tuotteita siis löytyy mm. pistorasioista, kytkimistä, matkapuhelimista, lukituslaitteista, lääkeannostelijoista, autoista ja työkoneista. (Meconet 2017.)

3 Syväveto

Syväveto on levyn muovausmenetelmä, jossa aihio muokkautuu puristuksen ja vedon alaisena syvävetotyökalun avulla. Syvävedossa levyaihion seinämän paksuus ei juurikaan muutu. Aihio asetetaan pidätinrenkaan ja vetoreenkaan väliin, josta se liukuu painimen avulla vetoreenkaan yli muovautuen sylinterimäiseksi kappaleeksi (ks. kuvio 2). Pidätin- ja vetoreenkaan oikea puristusaine tukee aihiota ja estää laipan rypyttymisen. (Mäki-Mantila 2001, 22; Metal forming handbook 1998, 11.)



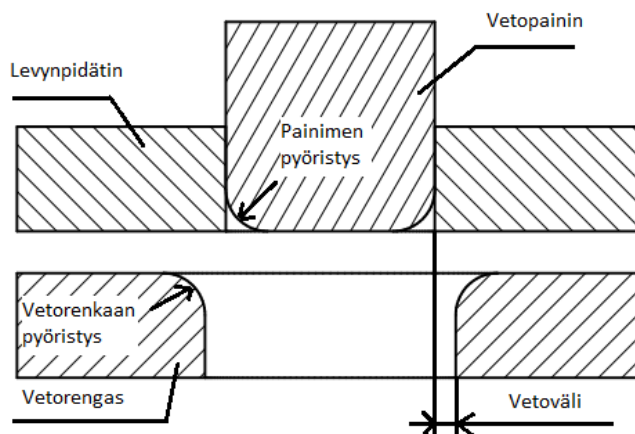
Kuvio 2. Syvävedon periaate.
(Syväveto tuotesuunnittelussa, 2016.)

Syvävedon onnistuvuuteen vaikuttaa mm. materiaalin muovausominaisuudet ja paksuus, vetonopeus, vetosuhte sekä kitka ja voitelu. Työkalusta tulevia vaikutuksia ve-

don onnistumiseen ovat mm. painimen ja vetorengaan pyöritykset, vetoväli, työkalun pinnanlaatu sekä levyn pidätysvoima. (Mäki-Mantila 2001, 22; Sheet steel forming handbook 1998, 4:17.)

3.1 Syvävetotyökalut

Syvävetotyökalujen mitoituksessa on huomioitava useita eri seikkoja. Syvävedossa työkalu siirtää muovauksessa tarvittavat voimat aihioon sekä määrää kappaleen muodon. Työkalun suunnittelua edeltää kappaleen aihion alustava määrittely (mitat ja muoto) sekä vetovaiheiden suunnittelu. Syvävetotyökalun osiin kuuluu vetorengas, vetopainin sekä pidätinrenkas (ks. kuvio 3).



Kuvio 3. Syvävetotyökalu
(Ohutlevyn syväveto 1981, 2, muokattu.)

Puristimet

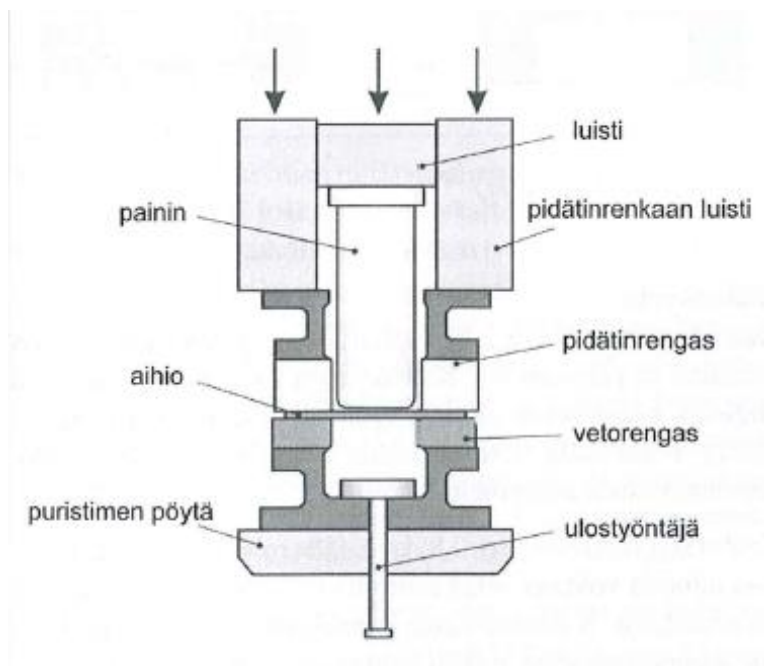
Vetotyökalujen konstruktion vaikuttaa mm. käytettävän puristimen rakenne ja työkalun koko ja muoto. Tarvittavan muovaus- ja pidätysvoiman saamiseen on käytössä seuraavat ratkaisut:

- syväveto kaksitoimisella puristimella
- syväveto yksitoimisella puristimella ja vetotyynyllä (draw cushion) sekä
- syväveto yksitoimisella puristimella ja aktiivisella vetotyynyllä.

(Mäki-Mantila 2001, 22-23; Ohutlevyn syväveto 1981, 18.)

Kaksitoimisessa puristimessa (ks. kuvio 4) muovaus tapahtuu liikkuvan painimen ja paikallaan pysyvän levynpidättimen avulla. Muovauksen aikana pidätinrenkas puristaa aihiota vetorengaaseen ja painin suorittaa varsinaisen muokkauksen. (Mäki-Mantila 2001, 23.)

Syväveto kaksitoimisella puristimella on vanha menetelmä, joka ei enää nykyisin ole juuri käytössä. Muovauksen jälkeen kappale on suuaukko ylöspäin.

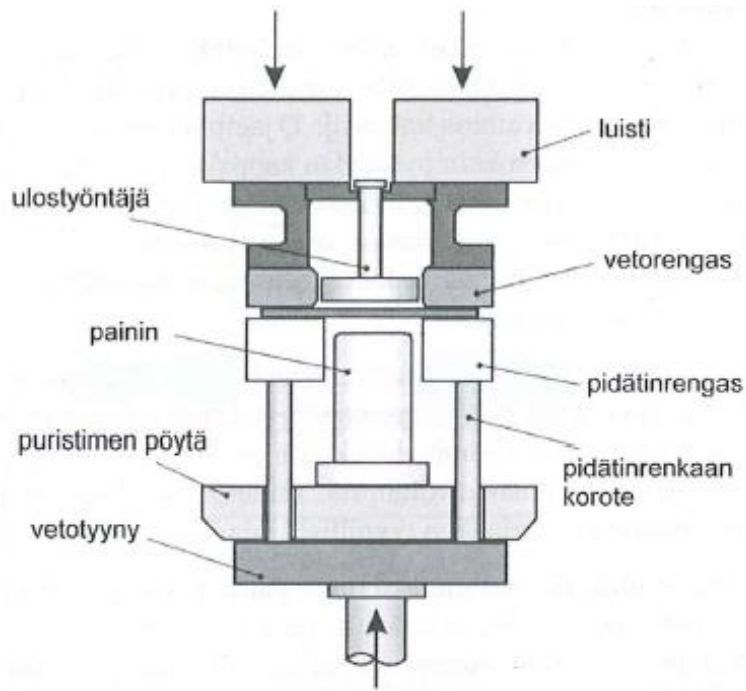


Muovauksessa:
Painin liikkuu
Levynpidätin ei liiku

Kuvio 4. Kaksitoiminen puristin.
(Mäki-Mantila 2001, 23.)

Yksitoimisessa puristimessa, jossa on vetotyyny, puristimen yläpuolen luisti tuottaa muovaavan voiman (ks. kuvio 5). Vetotyyny tuottaa levynpidätyksen vastavoiman. Levynpidätysvoima saadaan aikaiseksi, kun puristimen luisti painaa vetorengaan pidätinrengasta vasten. Vetotyyny antaa periksi luistinvoimalle ja pidätinrenkas painuu alaspäin. Muovaus suoritetaan paikallaan pysyvän painimen ja veto- ja pidätinrenkaan alaspäin suutautuvan liikkeen avulla. (Mäki-Mantila 2001, 23.)

Syväveto yksitoimisella puristimella ja vetotyynyllä on yleisin käytössä oleva menetelmä. Muovauksen jälkeen kappale on suuaukko alaspäin.

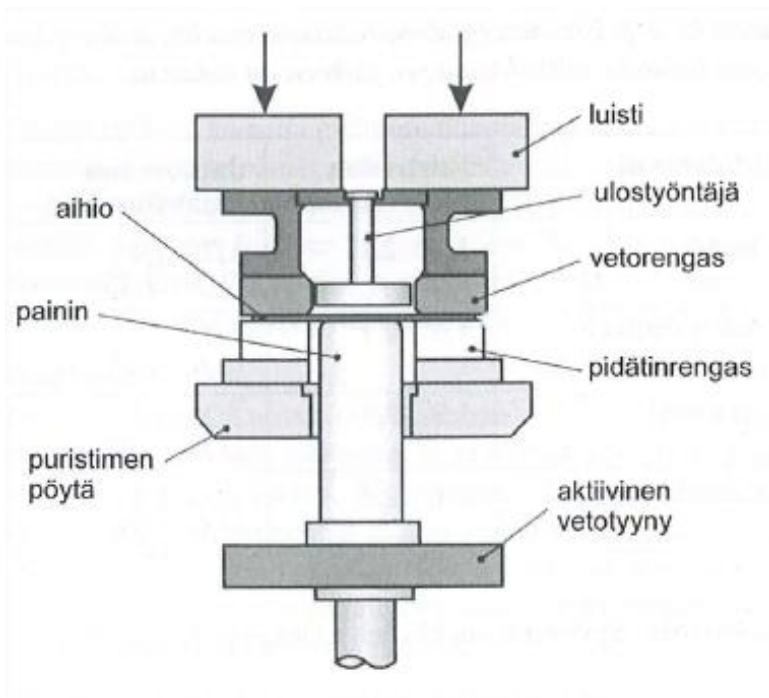


Muovauksessa:
Painin ei liiku
Levynpidätin liikkuu
Vetorengas liikkuu

Kuvio 5. Yksitoiminen puristin ja vetotyyny.
(Mäki-Mantila 2001, 23.)

Syväveto yksitoimisella puristimella ja aktiivisella vetotyynyllä on menetelmältään samanlainen kuin edellä kuvattu menetelmä. Poikkeuksena on, että tässä menetelmässä vetotyyny vaikuttaa muovattavaan painimeen. Puristimen yläpuolen luisti vastaa levynpidätysvoimasta (ks. kuvio 6). Menetelmässä on pienemmät muovausvoimat kuin kahdessa edeltävässä menetelmässä. (Mäki-Mantila 2001, 23.)

Syväveto yksitoimisella puristimella ja aktiivisella vetotyynyllä on lähinnä erikoismenetelmä. Muovausvoimat ovat pienempiä kuin kahdessa edellä mainitussa menetelmässä. Muovauksen jälkeen kappale on suuaukko alaspäin.



Muovauksessa:
 Painin liikkuu
 Vetorengas liikkuu
 Pidätinrennas ei liiku

Kuvio 6. Yksitoiminen puristin ja aktiivinen vetotyyny.
 (Mäki-Mantila 2001, 23.)

Vetorenkkaan pyöristyssäde

Vetorenkkaaseen kohdistuu suuria rasituksia ja tästä syystä sen on oltava riittävän tukeva. Erityisesti ruostumatonta terästä vedettäessä vetovoimat ovat suuria. Tästä johtuen vetorengas on mitoitettava kaksinkertaiseksi perinteisen teräksen muovauksen käytettyyn vetorenkkaaseen verrattuna. Vetorenkkaan pyöristyssäde vaikuttaa rajavetosuhteeseen. Mitä suurempi pyöristyssäde, sitä parempi rajavetosuhde. Tällöin kuitenkin rypyttymisvaara kasvaa, sillä suuri osa laipasta jää ilman levynpidättimen tukea. Vetorenkkaan pyöristyssäde r_v voidaan laskea kaavasta 1. Usein se on kuitenkin 4-7 kertaa levynpaksuus.

$$r_v = 0,8 * \sqrt{(D - d) * s} \quad (1)$$

missä D = aihion halkaisija

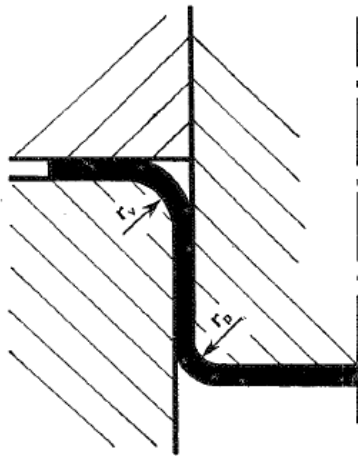
d = painimen halkaisija

s = levynpaksuus.

Pyöristyssäde voi olla pienimmillään 0,6 kertaa levynpaksuus, jos vetosuhte on enintään 1,2. Jatkovedoissa pyöristyssäde voi olla 0,6-0,8 kertainen edelliseen vaiheeseen verrattuna. (Ohutlevyn syväveto 1981, 19.)

Painimen pyöristyssäde

Painimen pieni pyöristyssäde r_p (ks. kuvio 7) aiheuttaa levyn leikkautumisvaaran. Jos halutaan pieni pyöristyssäde, voidaan käyttää erillistä viimeistelyvetoa. Yleensä painimen pyöristyssäde on vähintään 3-4 kertaa levynpaksuus. Jos kappaleessa on useita jatkovetoja, pyöristys usein korvataan kartiolla. (Ohutlevyn syväveto 1981, 20.)



Kuvio 7. Painimen ja vetorenkään pyöristykset (r_p ja r_v).
(Ohutlevyn syväveto 1981, 20.)

Vetoväli

Vetorenkään ja painimen välinen vetoväli on yleensä 1,1 – 1,5 kertaa aihionpaksuus. Liian ahtaassa vetovälissä aihio puristuu paksuussuunnassa, liian suuri vetoväli puolestaan heikentää kappaleen mittatarkkuutta. Vetoväli (u) voidaan laskea kaavalla 2.

$$\begin{aligned}
 u &= s + 0,07 a \sqrt{10s} && \text{kylmävalssattu teräs} \\
 u &= s + 0,02 a \sqrt{10s} && \text{pehmeä alumiini} \\
 u &= s + 0,04 a \sqrt{10s} && \text{muut ei-rautametallit} \\
 u &= s + 0,08 a \sqrt{10s} && \text{austeniittinen ruostumaton teräs}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

missä s = levyn paksuus

$$a = D / (d * \beta_{100})$$

β_{100} = rajavetosuhde painimen halkaisijalla 100 mm ja levynpaksuudella 1 mm

d = painimen halkaisija

D = aihion halkaisija.

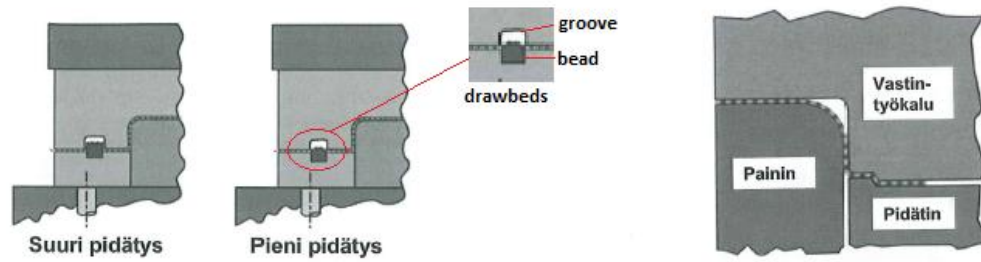
(Ohutlevyn syväveto 1981, 20-21.)

Pinnoitettujen levyjen vetovälissä huomioidaan pinnoitteen paksuus. Neliskulmaisten kappaleiden valmistuksessa, alussa vetoväli on levynpaksuuden suuruinen ja sitä kasvatetaan tarpeen mukaan. Jos näin ei voida menetellä, lasketaan alustava vetoväli kaavan 2 mukaisesti, ja levynpaksuuden ylimenevä arvo kaksinkertaistetaan nurkkien kohdalla. (Ohutlevyn syväveto 1981, 21.)

Pidätyksen hallinta, vetoesteet

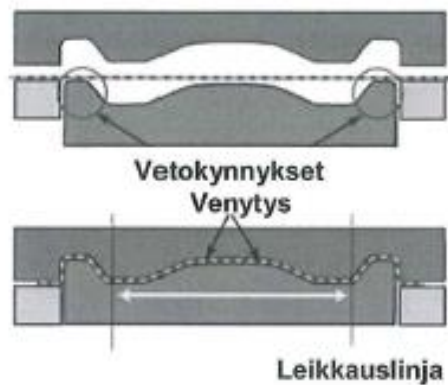
Aihion materiaalin virtauksen hallinta pidätyksen ja erilaisten vetoesteiden avulla on avainasemassa virheettömän tuotteen valmistuksessa. Materiaalin virtauksen hallinnassa voidaan käyttää ns. vetojarruja, joita ovat vetotyyny (drawbeds), vetoportaat (drawsteps) ja vetokynnykset (drawbars). Valmistettavan kappaleen muoto määrittää vetoesteiden paikan. (Korhonen & Larkiola 2012, 142.)

Vetotyyny ja vetoporras (ks. kuvio 8) hidastavat materiaalin virtausta. Vetotyynyn muodolla ja pyöristyssäteellä on suuri merkitys virtaukseen. Vetoporras on muotoaan erilainen kuin vetotyyny. Vetoporras sijaitsee vetorenkaan vieressä. Vetoportaan käyttö vähentää materiaalin muokkauslujittumista. (Korhonen & Larkiola 2012, 142-143.)



Kuvio 8. Vetotyyny (vas.) sekä vetoporras (oik.).
(Korhonen & Larkiola 2012, 143.)

Vetokynnykset ovat erityyppisiä materiaalin virtausesteitä kuin vetotyyny ja vetoporrastat. Vetokynnykset sijaitsevat usein painimessa, toisin kuin vetotyyny ja vetoporrastat, jotka sijaitsevat pidätyksen alueella. Vetokynnyksiä käytetään usein viimeistelyvaiheessa. Tässä menetelmässä aihion koko on suurempi, kuin muissa menetelmissä, sillä valmis tuote leikataan leikkauslinjan kohdalta (ks. kuvio 9). Vetokynnyksiä käytettäessä materiaali venyy painimen keskellä. Vetokynnyksiä käytetään usein autoteollisuuden tuotteissa. (Korhonen & Larkiola 2012, 144.)



Kuvio 9. Vetokynnykset.
(Korhonen & Larkiola 2012, 144.)

3.2 Aihion koon määrittäminen

Aihion koon määrittäminen vaikuttaa vetovaiheiden lukumäärään sekä työkalun suunnitteluun. Pyöreitä aihioita käytetään pyörähdyssymmetristen kappaleiden valmistuksessa. Niiden halkaisijat pystytään arvioimaan helposti, sillä aihion pinta-ala on suunnilleen sama kuin valmiin tuotteen. On kuitenkin huomioitava, että vedossa syntävää venymäjakaumaa, venymistä ja tyssäytymistä, ei tiedetä tarkkaan. Usein aihioon huomioidaan myös leikkausvara reunojen tasoittamista varten. (Metal forming handbook 1998, 162; Sheet steel forming handbook 1998, 5:11.)

Pyörähdyssymmetristen kappaleiden aihion koko pystytään laskemaan liitteessä 1 esitettyjen kaavojen mukaisesti. Monimutkaisissa kappaleissa tuote voidaan jakaa aksisymmetrisiin osiin ja laskea aihion koko (D) osien summana (kaava 3). Nykyisin käytetään usein tietokoneohjelmia aihion koon määrittämiseen. (Metal forming handbook 1998, 162; Sheet steel forming handbook 1998, 5:11.)

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} (A_1 + A_2 + \dots + A_n)} \quad (3)$$

missä D = monimutkaisen kappaleen aihion halkaisija

A:t = kappaleen elementtien pinta-aloja.

(Ohutlevyn syväveto 1981, 11.)

3.3 Vetosuhde

Vetosuhde D/d määrittää tarvittavien vetojen määrän ympyrämaisilla kappaleilla. Jos kappaleen vetosuhde ylittää rajavetosuhteen arvon (taulukko 1), tulee veto tehdä useammassa vaiheessa. Rajavetosuhteella kuvataan suurinta mahdollista aihion halkaisijan (D) ja painimen halkaisijan (d) suhdetta, jonka kappale kestää repeämättä.

Rajavetosuhteeseen vaikuttaa:

- materiaalin mekaaniset ominaisuudet
- työkalun vetosäde
- työkalun materiaali ja pinnanlaatu
- voitelu
- vetoaste
- pidätysvoima.

(Metal forming handbook 1998, 166; Mäki-Mantila 2001, 22-24; Sheet steel forming handbook 1998, 4:17.)

Taulukko 1. Eri materiaalien rajavetosuhteita

(Ohutlevyn syväveto 1981, 9; Sheet steel forming handbook 1998, 4:18.)

Materiaali	Rajavetosuhde β	
	ensiveto	jatkoveto
DC 01	1,5 - 1,8	1,15
DC 04	1,7 - 1,8	1,2 - 1,25
DC 05	1,9 - 2,1	1,2 - 1,35
Ruostumaton teräs (austeniittinen)	1,8 - 2,1	1,2
Alumiini	1,8 - 2,1	1,2 - 1,4
Kuparimetallit	2,1 - 2,2	1,3 - 1,4

Rajavetosuhteen arvoon vaikuttaa myös monet muut huomioon otettavat seikat kuten materiaalin ominaisuudet, levyn paksuus, työkalun muoto ja voitelu. Suurinta rajavetosuhteen arvoa voidaan käyttää vain optimi olosuhteissa hyvällä voitelulla.

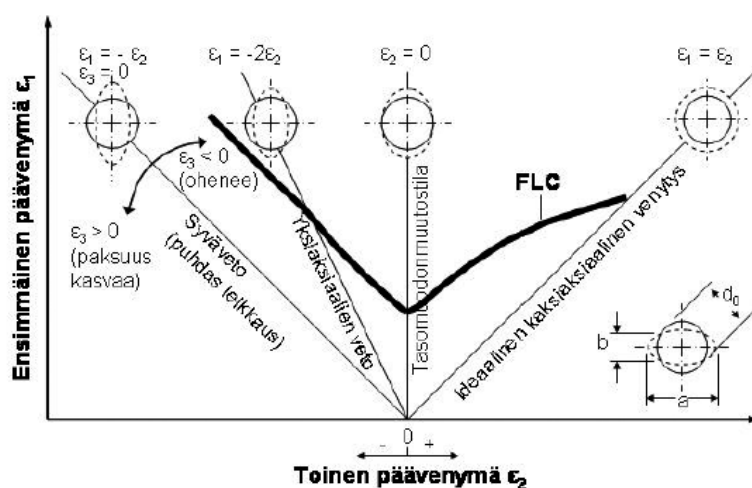
(Mäki-Mantila 2001, 24; Metal forming handbook 1998, 168, 179; Sheet steel forming handbook 1998, 5:14.)

Muovattavuuden arviointi ja testaus

Martikainen (2006) käsittelee Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiirroksen avulla -artikkelissa ohutlevyn kylmämuovattavuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä kuinka niitä voidaan testata. Artikkelissa määritellään ohutlevyn kylmämuovattavuus ohutlevyn kyvyksi kestää muovaus halutuksi kappaleeksi vaurioitumatta. Kylmämuovattavuuden määrittämiseksi käytetään materiaalikokeista saatuja

tuloksia. Muovaustilanteita simuloivat kokeet jaetaan muovaustyyppin mukaisesti venytysmuovaus- ja syvävetokokeisiin. Martikainen mainitsee käytetyimmäksi syvävetoa jäljitteleväksi kokeeksi ns. kupinvetokokeen, josta saadaan syvävedettävyyttä kuvaava parametri. Tunnetuin kupinvetokoe on Swiftin vetokoe, jossa haetaan suurin ympyrän muotoinen aihio, joka voidaan vetää ehjäksi kupiksi. Kokeen tuloksena saadaan rajavetosuhteen arvo. Martikainen mainitsee kuitenkin, että kokeisiin perustuvat yksittäiset parametrit antavat kuvan muovattavuudesta, mutta ne eivät välttämättä ole riittäviä arvioimaan todellista muovaustapahtuman onnistumista. (Martikainen 2006, 52-56.)

Rajamuovattavuuspiirros (ks. kuvio 10) kuvaa ohutlevyn muovattavuuden rajoja tason suuntaisten venymien avulla erityyppisissä muovausolosuhteissa. Artikkelissa mainitaan, että materiaalikokeista tavallisin on yksiakselialinen vetokoe, jolla voidaan määrittää ohutlevyn jännitysvenymäyhteys, josta puolestaan saadaan materiaalin myötö- ja murtolujuus sekä tasa- ja murtovenymä. Venytysmuovauskokeiden koejärjestelyä ei kuitenkaan ole standardisoitu tarkasti, joten eri laboratorioissa suoritetuissa kokeissa saattaa rajamuovattavuuskäyrien asema vaihdella jopa 40%. Martikainen mainitsee, että nykyisin yleisimmät koemenetelmät ovat Nakazima- ja Marciniak -koejärjestelyt. Koejärjestelyiden muovaamat koekappaleet mitataan venymämittausjärjestelmän avulla. (Martikainen 2006, 52-56.)

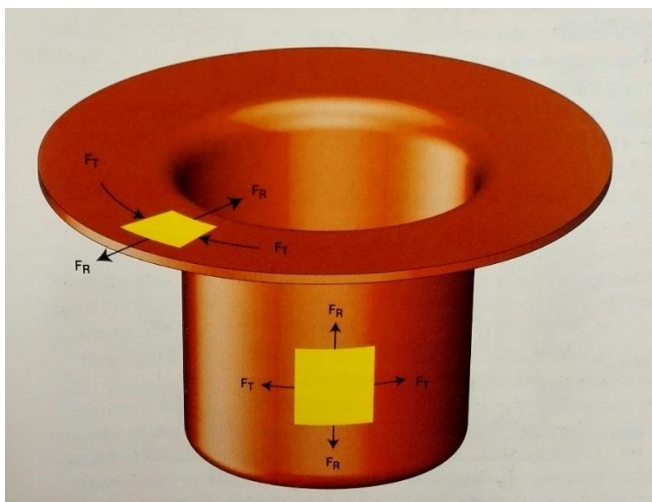


Kuvio 10. Rajamuovattavuuspiirros (Martikainen 2006, 52.)

Rajamuovattavuuspiirrokseen saadaan rajavenymäkäyrä sijoittamalla ympyräverkko-
mittausmenetelmästä saadut tulokset päävenymäkoordinaatistoon. Rajavenymä-
käyrän alapuoliset venymät ovat turvallisia ja yläpuoliset arvot kuvaavat murtumaan
johtavaa venymää. Yleensä venymät ovat suurempia valssaussuunnassa kuin poikit-
taissuunnassa. Tätä tietoa voidaan hyödyntää muovauksessa asettamalla aihion vals-
saussuunta yhtymään muovauksen vaativimpaan suuntaan. Kuviossa 10 voidaan
erottaa aito syväveto ts. levyn paksuuden suuntainen venymä ϵ_3 häviää, ohutlevyssä
ei tapahdu paksuuden muuttumista. Tällöin päävenymien välillä on suhde $\epsilon_1/\epsilon_2 = -1$.
Ohutlevy ohenee suoran oikealla puolella olevilla venymäsuhteilla ja paksune-
emmalla puolella olevilla suhteilla. (Martikainen 2006, 52-56; Ohutlevyn muovauk-
sen suunnittelu ja simulointi 2002, 15; Ohutlevyn syväveto 1980, 9.)

3.4 Muovauksessa tarvittavat voimat

Syvävedossa aihion eri kohtiin kohdistuu erilaisia voimia. Kuviossa 11 on kuvattu kap-
paleeseen kohdistuvat voimat laipassa ja seinämässä; radiaalinen jännitysvoima F_R ja
tangentialinen puristusvoima F_T . Aihion säteen pienenemisestä johtuen aihion laip-
paan kohdistuu puristusrasitusta kehän suunnassa sekä vetorasitusta säteensuun-
nassa ja näin ollen ahiolla on taipumus paksuuntua. Aihion seinämään kohdistuu ta-
sojännitys, jolloin ahiolla on taipumus ohentua. (Korhonen & Larkiola 2012, 140.)



Kuvio 11. Kappaleeseen vaikuttavat voimat syvävedossa.
(Metal forming handbook 1998, 157.)

Vetovoima

Yksinkertaistetuilla yhtälöillä voidaan laskea muovauksessa tarvittavan vetovoiman suuruus. Liian suuren voiman käyttö voi särkeä työkalun ja puristimen. Yhdellä vedolla tehtävien pyörähdyssymmetristen kappaleiden vetovoima F_U voidaan laskea kaavalla 4.

$$F_U = \pi * (d_1 + s) * s * R_m * 1,2 * \frac{\beta^{-1}}{\beta_{max}^{-1}} [N] \quad (4)$$

missä d_1 = painimen halkaisija
 s = levyn paksuus
 R_m = levyn murtolujuus
 β = käytettävä vetosuhte
 β_{max} = rajavetosuhde

(Metal forming handbook 1998, 168; Ohutlevyn syväveto 1981, 16.)

Murtumiseen tarvittava voima (F_{Vmax}), kappaleen muodosta riippumatta, voidaan laskea kaavalla 5. F_{Vmax} kuvaa suurinta mahdollista vetovoiman arvoa, jonka jälkeen levy murtuu vetorengaan pyörityksen luona.

$$F_{Vmax} = 1,15L * s * R_m \quad (5)$$

missä L = vetorengaan sisäreunan ympärysmitta
 s = levyn paksuus
 R_m = levyn murtolujuus.

(Ohutlevyn syväveto 1981, 16.)

Levynpidätysvoima

Syvävedossa laippaan kohdistuu tangentialista puristusjännitystä. Tämän seurauksena levy pyrkii rypyttymään, jos se jää ilman kunnollista tuentaa työkalun pinnoilta. Rypyttymistä voidaan estää puristamalla aihion laippaa vetorengasta vasten. Veto epäonnistuu liian suuren tai pienen puristusvoiman takia. Liian suuri pidätysvoima

estää laipan liukumista ja liian pieni pidätysvoima aiheuttaa aihion rypyttymisen pidättimen alla. Levynpidätysvoima F_1 voidaan laskea kaavan 6 avulla.

$$F_1 = A * p_1 \quad (6)$$

missä A = levynpidätyspinnan ala

p_1 = levynpidätyspaine, joka saadaan laskettua kaavalla 7.

$$p_1 = (0,002 \dots 0,003) \left[(\beta - 1)^2 + 0,005 * \frac{d}{s} \right] * R_m \quad (7)$$

missä β = käytettävä vetosuhte

d = painimen halkaisija

s = levyn paksuus

R_m = levyn murtolujuus

(Ohutlevyn syväveto 1980, 11; Ohutlevyn syväveto 1981, 17.)

Levynpidätyspaine on teräslevyillä 1,5 ... 2,5 N/mm² ja austeniittisillä ruostumattomilla teräksillä jopa 8 N/mm². Ilmoitettu pidätyspaine pätee vain vedon alussa tapahtuvaan pidätykseen, sillä pidätettävä pinta-ala pienenee vedon edetessä ja näin ollen todellinen paine kasvaa, vaikka voima pysyisi ennallaan. Pidätyspaine yleensä suunnitellaankin niin, että vedon edetessä voima pienenee. (Larkiola n.d. 66; Ohutlevyn syväveto 1981, 17.)

3.5 Vetonopeus

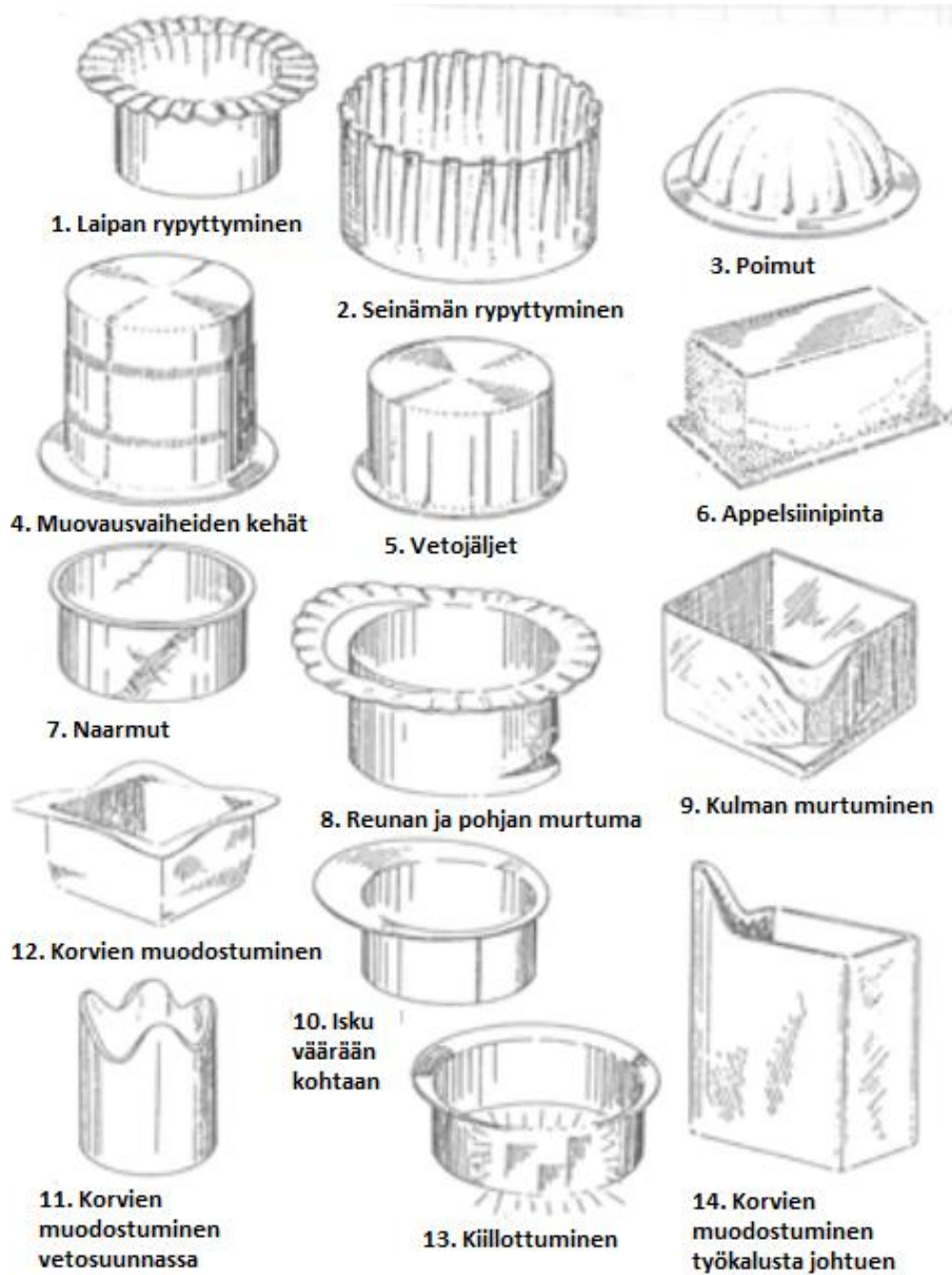
Muokkausnopeus vaikuttaa materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin, etenkin muodonmuutoslujuuteen. Tällä on suora yhteys jännitys-venymäkäyttäytymiseen, joka vaikuttaa materiaalin muovattavuuteen. Vetonopeus vaikuttaa myös rajavetosuhteeseen. Vetonopeuden rajan (taulukko 2) ylitys voi heikentää tuotteen laatua, koska riittävää materiaalivirtaa ei saavuteta. (Handbook of die design 1998, 391; Ohutlevyn muovauksen suunnittelu ja simulointi 2002, 26; Ohutlevyn syväveto 1981, 18.)

Taulukko 2. Eri materiaalien vetonopeuksia.
(Handbook of die design 1998, 392; Ohutlevyn syväveto 1981, 18.)

Materiaali	Vetonopeus mm/s	
	Yksitoiminen puristin	Kaksitoiminen puristin
Teräs	300	150 - 250
Ruostumaton teräs	200	100 - 150
Alumiini	900	500
Alumiini seokset	250	150 - 200
Kupari	750	430 - 450
Messinki	900 - 1000	500

3.6 Vetovirheet

Yleisimpiä vetovirheitä on mm. levyn murtuminen tai rypytyminen, naarmuuntuminen, pohjan epätarkka muoto, kappaleen korkeuden tai laipan leveyden vaihtelut sekä myötöjuovat (ks. kuvio 12). Levyn murtuminen, rypytyminen ja naarmut ovat yleisimpiä kappaleen hylkäykseen johtavia syitä. (Ohutlevyn syväveto 1981, 32-33; Voitelu levyn muovauksessa 1981, 33.)



Kuvio 12. Syvävedossa esiintyviä vetovirheitä.
(Korhonen & Larkiola 2012, 152.)

Murtumisen syynä voi olla työkalusta ja materiaalista johtuvia tekijöitä kuten:

- materiaalissa esiintyvät paikalliset viat tai materiaalin alhainen muovattavuus
- väärä levynpaksuus tai ahdas vetoväli
- liian suuri vetosuhte, vetonopeus tai pidätyspaine
- liian pieni pyörityssäde painimessa tai vetorenkaassa

- likaiset tai vioittuneet työkalujen pinnat
- sopimaton voitelu.

(Ohutlevyn muovauksen suunnittelu ja simulointi 2002, 14; Ohutlevyn syväveto 1981, 33.)

Levyn rypyttymisen kappaleen seinämässä tai laipassa voi aiheuttaa mm. seuraavat tekijät:

- sopimaton materiaali tai muut materiaali virheet
- liian ohut levy tai liian suuri vetoväli
- liian pieni levynpidätyspaine
 - epätasainen pidätyspaine voi aiheuttaa rypyttymistä kappaleen yhdelle reunalle
- liian suuri vetorenkkaan tai painimen pyöristyssäde
- sopimaton voitelu tai liian paksu voiteluainekerros.

(Ohutlevyn muovauksen suunnittelu ja simulointi 2002, 14; Ohutlevyn syväveto 1981, 33.)

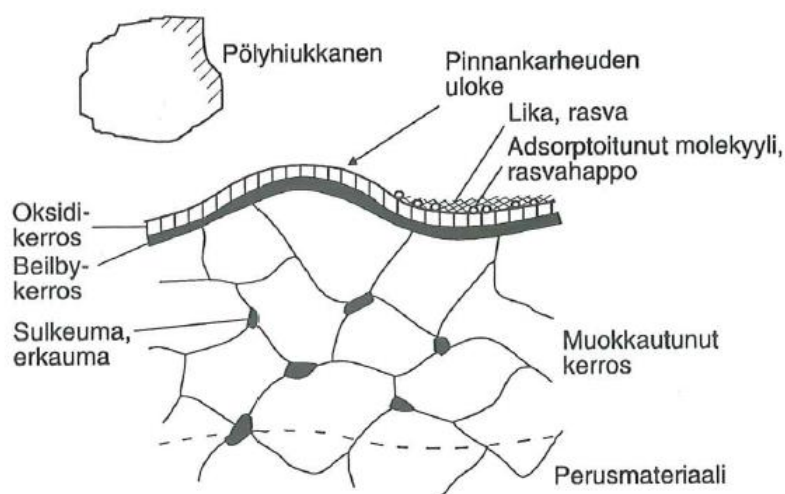
Naarmuuntuminen voi johtua liian voimakkaasta levynpidätyksestä, kulumisesta tai tahmaantuneista ulokkeista työkalussa. Tämä voidaan estää oikealla työkalumateriaali valinnalla sekä sopivalla voitelulla. Laippa-alueen leveysvaihtelut tai korvien muodostuminen kappaleeseen aiheutuu levymateriaalin lujuusominaisuuksien suuntariippuvuudesta (tasoanisotrooppisuus). Tämä voidaan estää mm. aihion leikkaamisella valssaussuuntaan nähden oikein. Työkalun väärä asento ts. painimen ja vetorenkkaan huonon keskityksen tuloksena voi kupista muodostua epäsymmetrinen tai kupin seinämää voi tulla pullistuma. Liian suuri vetoväli voi aiheuttaa levyn rypyttymistä tai seinämien pullistumista koko kupissa. Matalan kappaleen heikko levynpidätys, vetorenkkaan kulumisen ja riittävän nopea ilman pääsy kappaleen ja työkalun väliin voivat aiheuttaa pohjan epätarkan muodon (aaltomaisuutta). (Mäki-Mantila 2001, 22; Ohutlevyn muovauksen suunnittelu ja simulointi 2002, 14; Ohutlevyn syväveto 1981, 32-33; Voitelu levyn muovauksessa 1981, 33.)

4 Syvävedon voiteluun vaikuttavat tekijät

Syvävedon onnistumisen kannalta voitelu on erittäin kriittinen tekijä. Voitelun avulla pyritään saavuttamaan mahdollisimman alhainen kitka. Voitelun ensisijainen tarkoitus on siis kontrolloida levyn ja työkalun välisiä kitkavoimia. Toiseksi voitelulla pyritään estämään tahmautuminen suojaamalla työkalua suoralta kontaktilta levyn kanssa. Muovattavan levyn pinnankarheudella on vaikutusta valittavaan voitelumenetelmään, ja voiteluaineiden toimintaan. (Mäki-Mantila 2001, 30; Sheet steel forming handbook 1998, 6:14; Heide 2002, 11.)

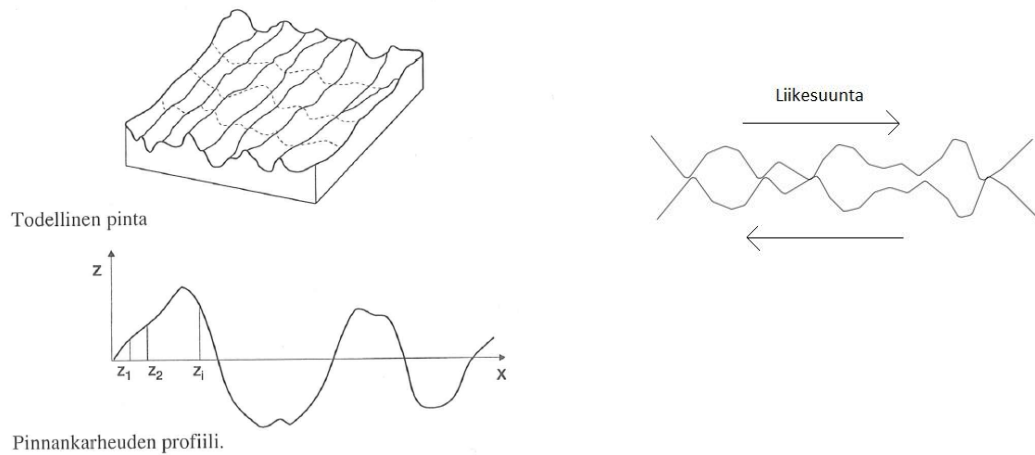
4.1 Metallipinnan ominaisuudet ja pinnankarheus

Metallipintojen ominaisuudet riippuvat pintakerroksista sekä pinnan alapuolisista materiaaliominaisuuksista. Valmistusvaiheessa syntyy normaalikiderakenteen päälle muokkautunut kerros (ks. kuvio 13). Kerroksen päällä on kova pienirakeinen kerros, jota kutsutaan Beilby-kerrokseksi. Beilby-kerroksen päälle muodostuu ilman vaikutuksesta oksidikerros. Tällä kerroksella on merkittävä vaikutus kitkaan ja kulumiseen. Oksidikerroksen päälle puolestaan voi adsorboitua kaasumolekyylejä tai rasvahappoja. Nämä kerrokset suojaavat kiinnileikkautumiselta sekä pienentävät liukupintojen välistä kitkaa. (Kivioja ym. 2004, 23.)



Kuvio 13. Ilman kanssa kosketuksissa olevan metallipinnan rakenne. (Kivioja ym. 2004, 23.)

Täysin tasaista, sileää pintaa ei ole mahdollista saada millään valmistusmenetelmällä. Erilaisille pinnoille on ominaista erilaisten kerrostumien lisäksi aaltomainen ja karhea pinta (ks. kuvio 14). Yleisesti pinnankarheutta kuvataan keskipoikkeama R_a suureena. Liian sileä pintaista levyä on vaikea syvävetää ja toisaalta liian karhea pinta johtaa helposti rypyttymiseen. (Kivioja ym. 2004, 24; Ohutlevyn syväveto 1981, 41.)



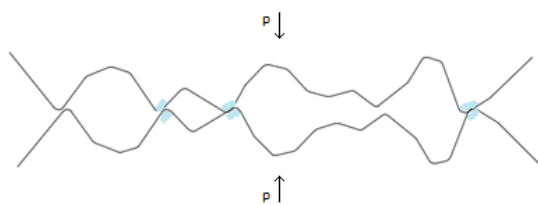
Kuvio 14. Pinnankarheuden muotoja sekä metallipintojen profiili kuormituksen alaisena. (Kivioja ym. 2004, 24.; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 2.)

Pinnankarheudella on suuri merkitys kitkakäyttäytymiseen sekä valmiin tuotteen pinnanlaatuun. Painimen pinta voi olla karhea, jolloin kitka on suurempi. Tämä puolestaan parantaa rajavetosuhdetta. Vetorenkkaan ja pidättimen pinnat on hyvä olla sileät, jolloin aihion liukumiseen vaikuttava kitkavoima saadaan pieneksi. Jos vedossa ei käytetä voitelua, levyn pinta kiillottuu ja silottuu ellei tahmaantumista tapahdu. Pinnan kiillottuminen ja silottuminen saattavat haitata esimerkiksi maalausta. (Voitelu levynmuovauksessa 1981, 21.)

4.2 Tahmautuminen

Tahmautuminen (galling) luokitellaan yhdeksi adhesiivisen kulumisen mekanismeista. Usein adhesiivistä liitosta kutsutaan myös kylmähitsautumiseksi (ks. kuvio 15). Tällöin

pinnankarheuksien huipuissa tapahtuu plastista muodonmuutosta ja samalla pintoja peittävä oksidikalvo rikkoutuu. Huippujen kosketuskohtiin muodostuu kylmähitsejä, jotka leikkautuvat ja osa pehmeämmästä materiaalista irtoaa. Kuorman kasvaessa ja pinnankarheuden huippujen leikkautuessa, plastisoituneet alueet laajenevat niin paljon, että ne lopulta yhtyvät toisiinsa. Koko pintakerroksen plastisoitumista seuraa pintojen tahmautumista toisiinsa. (Kivioja ym. 2004, 106; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 5.)



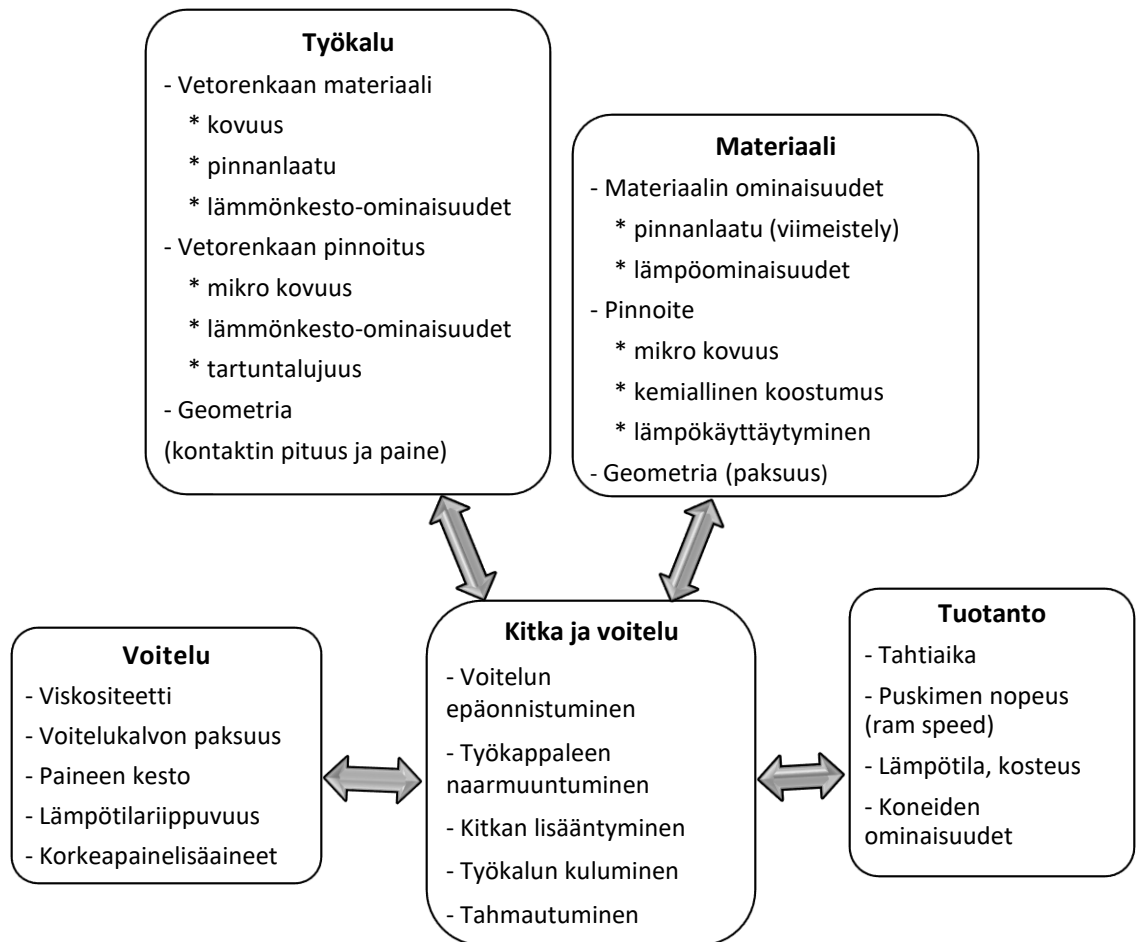
Kuvio 15. Kylmähitsin muodostuminen
(Sheet steel forming handbook 1998, 6:15, muokattu.)

Tahmautumista voidaan estää oikealla voitelulla sekä materiaalivalinnoilla. Myös liukumatkalla ja pintapaineella on merkitystä tahmautumiseen. Pidätinvoiman tulee jakautua tasaisesti koko laipan alueelle. Voiman tarve on pienempi ohuilla levyillä. Toisaalta liian pieni pidätinvoima voi aiheuttaa rypyttymistä. Muita tahmautumista estäviä toimia on valita työkalu ja levymateriaali kemiallisilta ominaisuuksiltaan mahdollisimman erilaisiksi. Myös työkalun pintakäsittelyllä voidaan vähentää tahmautumista. Jos vetorenaan pinta on mahdollisimman sileä ja kovuus kaksi- tai kolminkertainen levyn kovuuteen verrattuna, tahmautuminen on vähäistä. Karheat työkalupinnat naarmuttavat aihion pintaa ja rikkovat suojaavan oksidikalvon, jolloin muodostuu edellytykset tahmautumiselle. (Voitelu levynmuovauksessa 1981, 5.)

4.3 Kitka ja kitkakerroin

Jos kaksi metallipintaa liikuu paineenalaisena vastakkain, vaikuttaa niiden välillä kitkavoima. Näennäisestikin sileällä ja tasaisella pinnalla on huippuja ja laaksoja. Todellisuudessa kaksi pintaa koskettaa toisiaan vain huippujen kohdilta, jolloin kosketuspinta-ala on pieni. Jos liukupintojen välissä on ohut kalvo, saadaan pinnat liukumaan huippujen yli, jolloin kitka pienenee ja mahdolliset huippujen hitsautumiset, adheesiot ja tahmautumiset saadaan estettyä. (Sheet steel forming handbook 1998, 6:14; Voitelu ohutlevynmuovauksessa 1981, 2.)

Kuviossa 16 on esitetty parametrit, jotka vaikuttavat kitkakertoimeen ja voitelun suorituskykyyn. Voitelun epäonnistuminen johtaa kitkan lisääntymiseen, tahmautumiseen, naarmuuntumiseen ja työkalun kulumiseen. Voitelun onnistuminen on useiden parametrien yhteissumma. (Hyunok & Nimet 2012, 89.)



Kuvio 16. Kitkaan ja voiteluun vaikuttavia tekijöitä. (Hyunok & Nimet 2012, 89, muokattu.)

Kitkalait ja kyntötermi

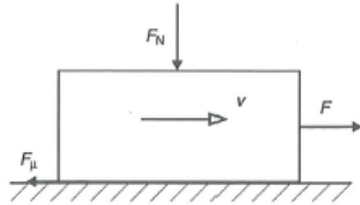
Kitkakertoimella tarkoitetaan kitkavoiman ja normaalivoiman välistä suhdetta (kaava 8).

$$\mu = \frac{F_{\mu}}{F_N} \quad (8)$$

missä F_{μ} = kitkavoima

F_N = normaalivoima.

Ulkoinen voima F tulee olla saman suuruinen, mutta vastakkaisuuntainen kuin kitkavoima F_{μ} , jolloin voidaan ylläpitää nopeutta v (ks. kuvio 17). (Kivioja ym. 2004, 63.)



Kuvio 17. Kitkavoimat.
(Kivioja ym. 2004, 63.)

Klassinen kitkateoria olettaa kitkan olevan vakio, mutta tämä on asian yksinkertaistamista. Tribologiassa kitkakerroin voi tosiasiaassa vaihdella eri kohdissa liukupintojen välissä (Sheet steel forming handbook 1998, 6:14). Kitkan kuvaamiseen, voitelun tehokkuudesta riippuen, voidaan soveltaa useampia menetelmiä. Näiden lähtökohtana on kuitenkin perinteiset kitkalait:

1. Kitkakerroin ei riipu kosketuspinta-alasta.
2. Kitkavoima on suoraan verrannollinen normaalivoimaan.
3. Liikekitkakerroin ei riipu liukumisnopeudesta.

Edellä kuvatut lait kuitenkin pätevät vain, kun pinnankarheuden huiput ovat plastisia. Lähinnä kaksi ensimmäistä lakia pitävät paikkaansa useimmissa tapauksissa, kun taas kolmannen lain pätevyys rajoittuu suppealle alueelle. (Kivioja ym. 2004, 63; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 2.)

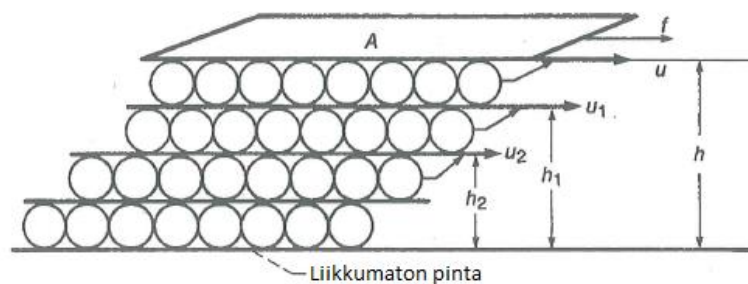
Kyntötermi on osa kitkavoimaa. Siinä huomioidaan voima, joka syntyy pinnankarheuksien huippujen muokkautuessa toisiaan vasten. Kyntötermiä käytetään, kun kovan pinnan ulokkeet kyntää uran pehmeämpään pintaan. Se on merkittävä abrasiivisessä kosketuksessa (hionta), mutta kyntötermin merkitys kasvaa myös adhesiivisen kitkan (tartunta) ollessa pieni. (Kivioja ym. 2004, 71.)

5 Voiteluaineet

5.1 Voiteluaineen viskositeetti

Voiteluaineen viskositeetillä on merkittävä vaikutus muovauksen onnistumiseen. Viskositeetti kuvaa nesteen sisäisen kitkan suuruutta eli kykyä vastustaa virtausta. Suuren viskositeetin omaavat nesteet virtaavat hitaammin kuin pienen viskositeetin omaavat nesteet. Esimerkiksi vedellä on pieni viskositeetti ja öljyllä suuri. Lämpötila vaikuttaa viskositeettiin huomattavasti, lämpötilan noustessa viskositeetti pienenee. Lämpötilariippuvuutta kuvataan viskositeetti-indeksillä (VI), mitä suurempi on indeksi luku, sitä pienempi on lämpötilan vaikutus viskositeettiin. Vaativaan syvävetoon käytetään yleensä korkeaviskoosia voiteluaineita. (Sheet steel forming handbook 1998, 6:20; Teollisuusvoitelu 2006, 17; Kivioja ym. 2004, 174.)

Voiteluaineiden viskositeetti ilmoitetaan usein kinemaattisena viskositeettinä (ν), jonka yksikkö on Stoki ($1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$). Kinemaattinen viskositeetti määritellään dynaamisen viskositeetin (η) avulla (kaavat 9 ja 10). Newton määritteli viskositeetin kuvion 18 mallin mukaisesti, jossa ylin pinta liikkuu nopeudella u ja alin kerros pysyy paikoillaan. Jokainen molekyylikerros näiden välissä liikkuu nopeudella u_i ja sijaitsee korkeudella h_i . Näistä muodostuu kerrosten välinen leikkausnopeus du/dy , jossa dy kuvaa molekyylikerroksen paksuutta ($dy = h_i - h_{i+1}$). (Kivioja ym. 2004, 174; Teollisuusvoitelu 2006, 17.)



Kuvio 18. Voiteluaineen rakenne viskositeetin määrittelemiseksi Newtonin mukaan. (Kivioja ym. 2004, 174.)

Dynaaminen viskositeetti määritetään:

$$\eta = \frac{\tau}{du/dy} \quad (9)$$

missä η = dynaaminen viskositeetti (Ns/m² = Poisi (P))

τ = leikkausjännitys (N/m²)

du/dy = leikkausnopeus (1/s).

Kinemaattinen viskositeetti ν (m²/s) määritetään dynaamisen viskositeetin η ja voiteluaineen tiheyden ρ (kg/m³) avulla.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (10)$$

(Kivioja ym. 2004, 174; Teollisuusvoitelu 2006, 17.)

Newtonilaiset ja ei-newtonilaiset nesteet

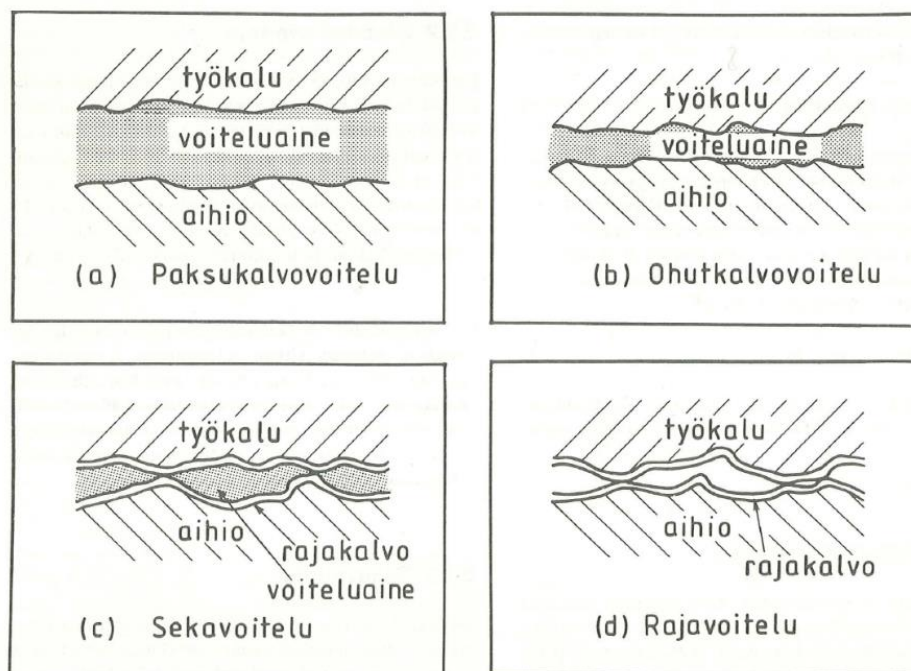
Voiteluaineet voidaan jakaa newtonilaisiin ja ei-newtonilaisiin nesteisiin, niiden käyttäytymisen mukaan. Newtonilaisesti käyttäytyvillä nesteillä leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden suhde säilyy vakiona. Tällaisia voiteluaineita ovat mm. yksinkertaisen molekyylirakenteen omaavat nesteet tai puhtaat nesteet, kuten mineraaliöljy. Ei-newtonilaisten voiteluaineiden viskositeetti on riippuvainen leikkausnopeudesta. Tällaisia voiteluaineita ovat mm. polymeereillä seostetut rasvat ja öljyt sekä vesi-öljy-emulsiot. Ei-newtonilaisiin aineisiin kuuluu mm. tixotropiset ja pseudo-plastiset aineet. Tixotropiset aineet pehmenevät, kun niitä muokataan. Esimerkiksi maalit luokitellaan tixotropisiksi nesteiksi, sillä niiden viskositeetti pienenee voimakkaan sekoittamisen seurauksena. Dilatantista voiteluaineen käyttäytymisestä puhutaan silloin, kun nesteen viskositeetti kasvaa leikkausnopeuden kasvaessa. (Kivioja ym. 2004, 176; Teollisuusvoitelu 2006, 18.)

5.2 Voitelumekanismit

Metallin muokkauksessa voidaan voitelumekanismit jakaa seuraavasti (ks. kuvio 19):

- paksukalvo- eli hydrodynaaminen voitelu
- ohutkalvovoitelu
- sekavoitelu
- rajavoitelu.

(Voitelu levynmuovauksessa 1981, 3.)



Kuvio 19. Voiteluainemekanismit
(Voitelu levynmuovauksessa 1981, 3.)

Yleisin ohutlevymuovauksessa esiintyvä voitelumuoto on sekavoitelu. Voitelumekanismi voi muuttua muovauksen aikana, sillä vallitseva kitka riippuu voiteluaineen ja työkalun ominaisuuksista, muovausnopeudesta ja -lämpötilasta, kappaleen geometriasta sekä pinnankarheudesta. (Hyunok & Nimet 2012, 89; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 3.)

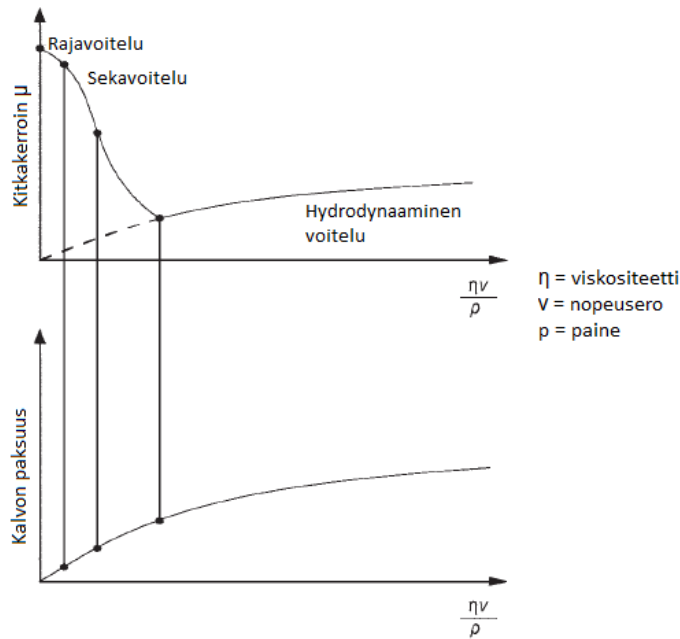
Voitelumekanismia ja voitelun toimivuutta voidaan arvioida voitelukalvon ominaispaksuuden λ avulla. Voitelukalvon ominaispaksuus määritellään yhtälöllä 11.

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (11)$$

jossa h_{min} on voiteluainekalvon minimipaksuus ja σ_1 ja σ_2 ovat vastinpintojen pinnan-
karheuksien rms-arvot. Rms-arvo on pintaprofiilin neliöllinen keskipoikkeama.

Yleensä pinnoista on saatavana vain aritmeettinen keskipoikkeama R_a -arvo, jolloin σ :n arvo on noin $1,3 \cdot R_a$. Voitelukalvon ominaispaksuus ei suoraan määritä voitelun toimivuutta. Varsinkin pienillä λ -arvoilla ($\lambda < 1$) se on lähinnä suuntaa antava parametri. (Teollisuusvoitelu 2006, 20; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 3.)

Voitelumekanismit voidaan erottaa toisistaan Stribeck -käyrällä (ks. kuvio 20) voiteluainekalvon paksuuden tai kitkakertoimen perusteella. Kuviosta voidaan nähdä, että raja- ja sekavoitelulla on suurimmat kitkakertoimien arvot ja samalla ohuin voitelukalvon paksuus. Voitelumekanismien kitkakertoimet on esitetty taulukossa 3. (Voitelu levynmuovauksessa 1981, 3.)



Kuvio 20. Stribeck- käyrä ja voiteluainemekanismit.
(Hyunok & Nimet 2012, 90.)

Taulukko 3. Eri voitelumekanismien kitkakertoimia
(Hyunok & Nimet 2012, 90; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 4.)

Voitelumekanismi	Kitkakerroin μ
Paksukalvovoitelu	0,001 - 0,002
Ohutkalvovoitelu	< 0,03
Sekavoitelu	0,03 - 0,1 (0,4)
Rajavoitelu	0,1 - 0,3
Ilman voitelua	> 0,3

5.2.1 Paksukalvo- eli hydrodynaaminen voitelu

Hydrodynaamisessa voitelussa voiteluainepaksuus on tarpeeksi suuri pitämään liukuvat pinnat kokonaan erillään toisistaan. Tämän seurauksena kitkakertoimet ovat hyvin alhaisia. Ohutlevyn kylmämuovauksessa ei paksukalvovoitelua juuri esiinny, mutta kappaleen muotoilusta riippuen voi syntyä nestetaskuja, joissa voiteluaine erottaa pinnat kokonaan toisistaan. Koska pinnat eivät kosketa toisiinsa, vaikuttaa nesteen viskositeetti kitkaan ja lämpötilan nousuun. (Sheet metal forming handbook 1998, 6:16; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 4.)

5.2.2 Ohutkalvovoitelu

Ohutkalvovoitelussa voiteluainepaksuuden tulee olla vähintään saman suuruinen kuin työkalun ja aihion pinnankarheudet ja suurempi kuin voiteluaineen molekyyli-
koko. Ohutkalvovoitelussa ei esiinny työkalujen kulumista tai tuotteen pintavirheitä,
vaikka pinnankarheuden huippujen kosketukset saattavatkin kantaa osan kuormasta.
Hieman karhennetulla pinnalla voiteluaine siirtyy voiteluainetaskuista aihion ja työ-
kalun väliin ja osalle muovausta saadaan ohutkalvovoitelu. (Voitelu levynmuovauk-
sessa 1981, 4.)

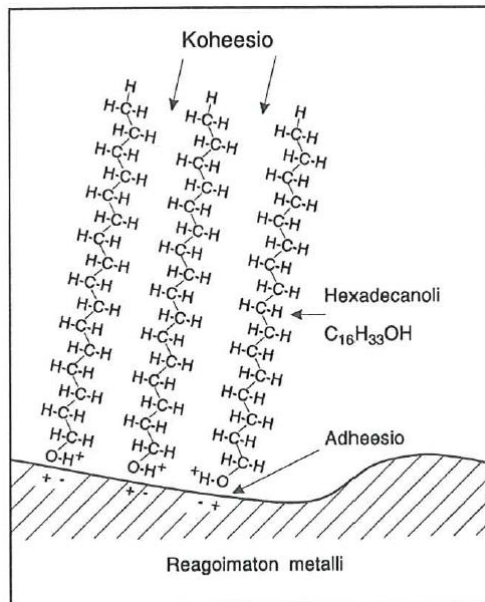
5.2.3 Rajavoitelu

Rajavoitelussa työkalun ja aihion pintaan muodostuu ohut rajakalvo, joka erottaa
pinnankarheuden huiput toisistaan. Rajavoitelu on yleisin voitelumuoto ohutlevyjen
muokkauksessa. Lisäaineiden avulla pyritään saamaan suojaava pintakalvo työkalun
ja aihion väliin. Rajavoiteluaineet reagoivat työkalun ja aihion pintojen kanssa muo-
dostaen liikepintojen väliin helposti leikkautuvan rajakerroksen. Lämpötilan koha-
minen voi tuhota kalvon, kuitenkin viskositeetillä tai liukunopeudella ei ole suurta
vaikutusta kitkaan. Näin ollen rajavoitelu tilanteessa voidaan käyttää vakiokitkaker-
rointa. (Kivioja ym. 2004, 169; Lubrication of steel sheet and strip for forming 2003;
Teollisuusvoitelu 2006, 30; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 5.)

Lisäaineet ovat vaikutukseltaan ja kestävyydeltään erilaisia. Ympäristöolosuhteet ku-
ten lämpötila, kuorma ja metallipinnan ominaisuudet vaikuttavat metallipintojen
kanssa tapahtuvaan reaktioon. Voitelukalvo voi muodostua joko fysikaalisella tai ke-
miallisella adsorptiolla tai kemiallisella reaktiolla. Metallipintojen etäisyyteen vaikut-
taa voiteluaineen molekyylien koko sekä kemiallisten pintakerrosten paksuus. (Ki-
vioja ym. 2004, 169; Lubrication of steel sheet and strip for forming 2003; Teollisuus-
voitelu 2006, 30; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 11.)

Fysikaalinen adsorptio

Fysikaalisessa adsorptiossa voiteluainemolekyylit kiinnittyvät metallipintoihin heikoilla van der Waals -voimilla (ks. kuvio 21). Erityisesti polaariset pitkäketjuiset hiilivedyt kiinnittyvät pintoihin vierekkäin pystyasentoon. Heikot kiinnittymisvoimat edesauttavat sitä, että molekyylit voivat irrota ja kiinnittyä uudelleen liikkeen aikana. Tyypillisesti lisäaineet ovat rasvahappoja tai rasvahapon estereitä sekä pitkäketjuisia alkoholeja. Tällainen kalvo on lämpötilaherkkä ja vähentää kitkaa ja kulumista vain pienellä liukunopeudella ja kuormalla. Rasvahapot kiinnittyvät fysikaalisella adsorptiolla vain reagoimattoman (stabiilin) pinnan kanssa, kuten platina tai kromi. (Kivioja ym. 2004, 169; Lubrication of steel sheet and strip for forming 2003; Heide 2002, 11.)

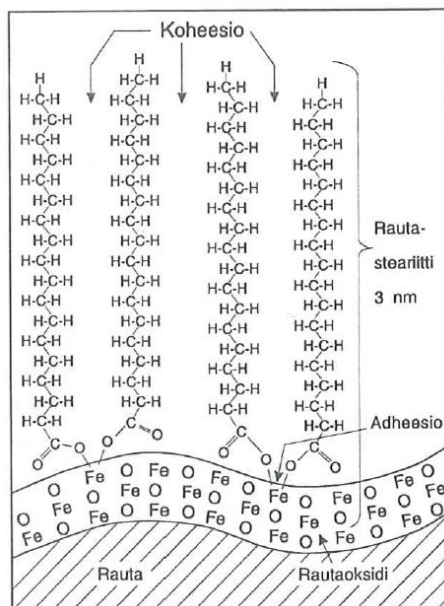


Kuvio 21. Pitkäketjuisen polaarisen hiilivedyn (alkoholi) kiinnittyminen metallipintaan fysikaalisen adsorption avulla. (Kivioja ym. 2004, 169.)

Kemiallinen adsorptio

Kemiallinen adsorptio esiintyy todennäköisimmin herkästi reagoivien metallipintojen kanssa. Tässä mekanismissa yhdistyvät sekä fysikaalinen adsorptio että kemiallinen reaktio pinnan kanssa, jolloin muodostuu metallisaippuuta. Esimerkiksi steariini-

happo reagoi metallipinnan kanssa muodostaen rautasteariitteja, jotka ovat kiinnittyneitä lujasti metallipintaan (ks. kuvio 22). Kemiallisella adsorptiolla syntynyt pintakerros kestää suurempaa liukunopeutta ja kuormaa sekä on vähemmän herkkä lämpötilan nousulle kuin fysikaalisella adsorptiolla syntynyt pintakerros. Kuitenkaan uutta kiinnittymistä ei voi tapahtua irtautumisen jälkeen, toisin kuin fysikaalisessa adsorptiossa. Tyypillisiä kemiallisen adsorption muodostavia lisäaineita ovat mm. rasvahapot, pitkäketjuiset rasva-amidit ja -esterit. (Kivioja ym. 2004, 170; Heide 2002, 11-12.)

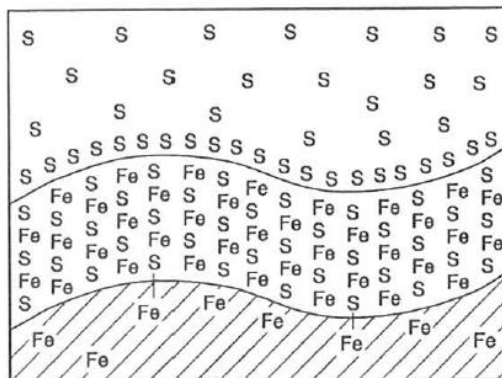


Kuvio 22. Kemiallinen adsorptio - rautaoksidin ja steariinihapon muodostama rautasteariittikerros.
(Kivioja ym. 2004, 170.)

Kemiallinen reaktio

Kemiallisen reaktion avulla muodostunut voitelukalvo voi olla useamman molekyylikerroksen paksuinen (ks. kuvio 23). Kemiallisella reaktiolla syntyneet voitelukalvot ovat hyvin stabiileja. Reaktion käynnistyminen vaatii tietyn minimilämpötilan (n.150 – 180 °C). Reaktio kiihtyy suurilla kuormituksilla ja liukunopeuksilla aiheutuvasta lämmön noususta ja ns. kriittisessä lämpötilassa rajakalvo muodostuu spontaanisti. Liiallinen lämpötilan kohoaminen voi kuitenkin rikkoa rajakalvon paikallisesti ja aiheuttaa

tahmautumista. Levymateriaali ja voiteluaineessa olevat lisäaineet vaikuttavat kriittiseen lämpötilaan. Lisäaineet vaikuttavat myös lämpötilan kestävyysrajaan. Orgaanisilla aineilla on alhaisempi lämpötilan kestävyysraja kuin epäorgaanisilla aineilla. Orgaaniset aineet muodostavat metallisaippuina metallin pintaan, kun taas epäorgaaniset aineet muodostavat suolakalvon. Korkeapainelisäaineissa (EP extreme pressure) käytetään yleensä fosforia (P), rikkiä (S), booria (B) tai klooria (Cl), jotka muodostavat metallisuolojen kompleksiyhdisteitä. Näistä lisäaineista etenkin boorin ja kloorin epäillään olevan ympäristölle ja terveydelle haitallisia, varsinkin ilman suojausta. (Kivioja ym. 2004, 170; Heide 2002, 12; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 12.)



Kuvio 23. Kemiallinen reaktio rautasulfidikalvon muodostumisesta. (Kivioja ym. 2004, 170.)

5.2.4 Sekavoitelu

Sekavoitelu on rajavoitelun tavoin usein käytetty voitelumuoto ohutlevytuotannossa. Sekavoitelussa pinnankarheuden harjanteissa esiintyy rajavoitelua, kun taas laaksonpohjat ovat täyttyneet voiteluaineella. Rajakalvo muodostuu voiteluaineen komponenttien reagoimissa pintojen kanssa kemiallisesti. Rajakalvo on noin voiteluaineen molekyylikoon paksuinen. Rajakalvo muodostuu rasvahapoista ja -alkoholeista sekä estereistä, amiineista ja metallisaippuista. Sekavoiteluna suoritettussa muovauksessa aihion pinta usein silottuu. Jos rajakalvo rikkoutuu pinnankarheuden huippujen kohdalta, voi työkalu tahmaantua ja aihio naarmuuntua. (Hyunok & Nimet 2012, 90; Sheet steel forming handbook 1998, 6:17, Voitelu levynmuovauksessa 1981, 4-5.)

5.3 Voiteluaineiden jaottelu

Voiteluaineissa käytetään yhtä tai useampaa perusainetta ja mahdollisia lisäaineita. Voiteluaineet voidaan jakaa niiden perustana käytetyn aineen perusteella seuraavasti:

- mineraaliöljyt
- synteettiset öljyt
- vesiliukoiset voiteluaineet
- kiinteät voiteluaineet

(Ohutlevyn syväveto 1981, 35; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 10.)

Mineraaliöljyt

Mineraalipohjaisia öljyjä käytetään usein suhteellisen helppoissa töissä, leikkauksessa ja lävistyksissä. Mineraaliöljyillä on hyvät perusominaisuudet, joten ne ovat hyvä kompromissi moneen erilaiseen vetoon. Mineraaliöljyt sisältävät pääasiassa hiilivetyjä; parafiinejä, naftaleenejä ja aromaattisia hiilivetyjä. Hiilivetykoostumus vaikuttaa ratkaisevasti voiteluaineen ominaisuuksiin kuten viskositeettilämpötilariippuvuuteen, tiheyteen sekä jähme- ja leimahduspisteeseen. Puhdas mineraaliöljy muodostaa suhteellisen heikon voitelukalvon. Mineraaliöljyjen ominaisuuksia parannetaan usein lisäaineilla tai sekoittamalla muihin öljyihin. Lisäaineilla parannetaan paineen- ja lämmönkestävyyttä sekä nostetaan viskositeettiä, jolloin kalvonkestävyys paranee. (Huyonok & Nimet 2012, 92; Sheet steel forming handbook 1998, 6:18; Voiteluaineet: Voiteluöljyt n.d.; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 10.)

Rasvaöljyt

Kasvi- ja eläinrasvoihin kuuluvat rasvaöljyt sisältävät rasvahappoja, jotka muodostavat saippuakerroksen metallipinnoille. Ne pienentävät kitkaa jo alhaisissa lämpötiloissa ja niitä voidaan käyttää sellaisenaan teräksen kevyeen muokkaukseen. Sekoitettuna mineraaliöljyyn, seosta voidaan käyttää myös alumiinin ja messingin muokkaukseen. Rasvaöljyn poisto on helppoa ja voitelu suojaa jonkin verran myös korroosiolta. (Ohutlevyn syväveto 1981, 38; Lubrication of steel sheet and strip for forming 2003, luku 6; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 10.)

Synteettiset voiteluaineet

Synteettisiä voiteluaineita on kehitetty suurten suorituskykyvaatimusten käyttöaluelle, jossa normaalit voiteluöljyn ominaisuudet eivät enää riitä. Synteettiset voiteluaineet jaetaan usein kahteen luokkaan: vesipohjaisiin ja hiilivety pohjaisiin. Synteettisiä hiilivetyjä on mm. polyalfaolefiinit (PAO) ja alkyylibentseenit. PAO:n ominaisuuksiin kuuluu suhteellisen korkea viskositeetti-indeksi sekä lisääineistettuna hyvä hapettumisenkestokyky. Muita synteettisiä yhdisteitä ovat mm. esterit, polyglykolit ja silikoniöljyt. Diestereiden ominaisuuksia ovat hyvä lämpötila-viskositeetti ominaisuus sekä vähäinen höyrystyminen. Veteen liukenemattomilla polyglykoleilla on hyvät viskositeetti- ja kitkaominaisuudet. (Hyunok & Nimet 2012, 92; Kivioja ym. 2004, 173; Voiteluaineet: Voiteluöljyt n.d.)

Synteettisen voiteluaineen ominaisuudet määräytyvät pitkälti perusöljyn ominaisuuksien mukaan. Taulukossa 4 on verrattu synteettisten aineiden ominaisuuksia mineraaliöljyihin. Lisäaineilla voidaan vaikuttaa mm. hapettumiskestävyyteen, kuormankantokykyyn sekä korroosionestoon. (Kivioja ym. 2004, 184.)

Taulukko 4. Synteettisten nesteiden vertailu mineraaliöljyihin. (Kivioja ym. 2004, 184, muokattu.)

Ominaisuus	Mineraaliöljy	Synteettiset hiilivedyt		Orgaaniset esterit				
		Polyalfaolefiini	Alkyylibentseeni	Diesteri	Polyoli-esteri	Polyglykoli	Fosfaattiesteri	Silikoniöljy
Viskositeetti-lämpötilariippuvuus	4	3	4	2	2	2	5	1
Juoksevuus matalissa lämpötiloissa	4	3	3	3	2	3	4	3
Kitkaominaisuudet	3	3	3	3	2	1	2	5
Hapettumiskestävyys	4	2	4	3	1	1	4	3
Ruosteenesto	1	1	1	3	3	3	3	4
Sekoittuvuus mineraaliöljyyn		1	1	3	4	5	5	5
Σ	16	13	16	17	14	15	23	21
1 erinomainen, 2 erittäin hyvä, 3 hyvä, 4 tyydyttävä, 5 huono.								

Suurin osa (98 %) synteettisten voiteluaineiden kulutuksesta jakautuu seuraavasti:

- polyglykolit 38 %
- synteettiset hiilivedyt 33 %
- orgaaniset esterit 22 %
- fosforihapon esterit 5 %.

(Kivioja ym. 2004, 184.)

Puolisynteettiset voiteluaineet

Puolisynteettinen voiteluaine on mineraaliöljyn ja synteettisen öljyn seos. Sen ominaisuudet sijoittuvat näiden kahden öljyn väliin, riippuen mitä ominaisuuksia on haluttu korostaa. Puolisynteettiset voiteluaineet liukenevat helpommin veteen kuin liukenevat öljyt. Ne sisältävät mineraaliöljyä yleensä alle 30 % kokonaistilavuudesta.

(Hyunok & Nimet 2012, 92.)

Liukenevat öljyt

Liukenevat öljyt sisältävät emulgaattoreita, jotka tekevät voiteluaineesta vesiliukoisien. Tyypillisiä emulgaattoreita ovat natrium- ja kaliumsaippuat. Liukoisia voiteluaineita käytetään yleensä kevyessä muovauksessa. Käytössä tulee huomioida työkalun huolellinen puhdistus työn loputtua. Näin estetään mahdollinen korroosion esiintyminen. (Huynok & Nimet 2012, 92; Ohutlevyn syväveto 1981, 35; Sheet steel forming handbook 1998, 6:19; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 11.)

Saippuat ja saippua-rasva seokset

Kuivia saippuakalvoja voidaan käyttää teräksen muovauksessa. Muovauksessa kalvo sulaa osittain ja muodostaa neste/kiinteä -rajapinnan, joka leikkautuu helposti. Saippuakalvon sulamispiste vaihtelee 75 - 100 asteen välillä. Käytön rajoituksena on kalvon vaikea kiinnittäminen aihioon, sillä aihio tarvitsee alkalipesun ennen levitystä sekä kuivauksen levityksen jälkeen. (Voitelu levynmuovauksessa 1981, 11.)

Saippuan ja rasvan seokset ovat yleisiä voiteluaineita ja ne estävät jonkin verran myös korroosiota. Saippualiuokset eivät kestä suuria pintapaineita. Vetojen vaikeutuksessa saippua- ja rasvapitoisuuksia nostetaan, jolloin saadaan paremmat voiteluominaisuudet. Täyteaineita sisältävien seosten puhdistaminen kappaleen pinnalta on yleensä vaikeampaa kuin pelkkää saippualiuosta käytettäessä, jolloin kappaleet voidaan puhdistaa vedellä. (Voitelu levynmuovauksessa 1981, 38.)

Kiinteät voiteluaineet

Kiinteänä voiteluaineena voidaan käyttää grafiittia ja molybdeenisulfidia, joiden pintapaineen kestävyys on hyvä. Niitä voidaan käyttää myös lisäaineina (pigmentteinä) muissa voitelumenetelmissä. Grafiitti voidaan jauhaa veteen, öljyyn tai alkoholiin hyytelömäiseksi emulsioksi. Koska molemmat, grafiitti ja molybdeenisulfidi, kestävät korkeita lämpötiloja paremmin kuin muut voiteluaineet, käytetään niitä usein kuumamuovauksessa. Muita käytettyjä kiinteitä aineita on erilaiset kalkit. Kiinteitä aineita käytetään erottamaan tai suojaamaan liukuvia pintoja äärimmäisen paineen alaisena. Kiinteiden voiteluaineiden poisto on usein hankalaa varsinkin, jos se on sekoitettu saippua-rasva pastaan. (Lubrication of steel sheet and strip for forming 2003; Sheet steel forming handbook 1998, 6:19; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 11.)

Vahat ja pastat

Vahojen ominaisuuksiin kuuluu korkean pintapaineen kesto sekä rajavoiteluvaikutuksen pysyvyys, vaikka voitelukalvo ohentuisi. Jotkut vahat haihtuvat noin 250 °C lämpötilassa, jättämättä hiilijäänteitä, mutta eräät vahat kestävät hyvin varsin korkeissakin lämpötiloissa (noin 300 °C) (Voitelu levynmuovauksessa 1981, 11). Vahat koostuvat hiilivedyistä tai niiden johdannaisista. Ne ovat kiinteitä huoneenlämpötilassa. Yleisiä vahojen ominaisuuksia on veden hylkimisominaisuus, pehmeä koostumus, mieto ominaishaju, liukeneminen orgaanisiin liuottimiin sekä alhainen reaktiivisuus. Mineraaliöljypohjaisilla vahoilla ei ole tarkkaa sulamislämpötilaa, koska ne sisältävät useita hiilivety-yhdisteitä, joiden sulamispisteet ovat laajalla alalla. Parafiinivahat ovat suhteellisesti yksinkertaisempia seoksia, ja niiden sulamispistealue on suppeampi kuin mineraaliöljypohjaisilla vahoilla. (Alan 2010, 252.)

Pastat ovat tasapainotettuja mineraali- tai synteettisen öljyn, rasvan ja vahan kuten myös saippuan sekoituksia. (Metal forming handbook 1998, 184.)

Voitelurasvat

Voitelurasvat ovat voitelutuotteita, joihin on lisätty saentimia, jolloin tuote muuttuu puolijuoksevaksi tai jopa kiinteäksi. Yleensä nestemäiseen voiteluöljyyn (mineraaliöljy tai synteettinen) lisätään sitovaa metallisaippuaa (alumiini-, barium- ja litiumsaippua). Voitelurasvoin on yleensä lisätty lisäaineita, jolloin saadaan parannettua voiteluaineen ominaisuuksia ja suorituskykyä. (Raj 2012, 229; Kivioja, Kivivuori & Salonen 2004, 177.)

Saentimina voidaan käyttää metallisaippuista, metallikompleksisaippuista, orgaanisia ei-saippuayhdisteitä tai epäorgaanisia yhdisteitä. Kompleksisaippuiksi kutsutaan emäksen ja kahden tai useamman rasvahapon yhteistä reaktiotuotetta. Alumiini-kompleksisaippuarasvalla on erinomaiset vesipesuominaisuudet ja lämmönkestävyys. Sitä käytetään yleisesti teräs- ja autoteollisuudessa. Yleisimpiä saippuarasvoja ovat litium-, kalsium- ja natriumsaippuarasvat. Kalsiumsaippuarasvat ovat edullisimpia, joskin ne eivät emulgoidu veden kanssa, mikä vaikeuttaa niiden puhdistamista voitelukohteesta. Litiumsaippuarasva on syrjäyttänyt natriumsaippuarasvan käytön sen monipuolisten ominaisuuksien ja muuntelumahdollisuuksien ansiosta. (Raj 2010, 232; Teollisuusvoitelu 2006, 70.)

Muut voiteluaineet ja -menetelmät

Muovikalvoja voidaan käyttää mm. ruostumattoman teräksen vedoissa, kun tarvitaan korkean pintapaineen kestoja ja halutaan pitää kappaleen pinta vahingoittumattomana. Suojakalvo saadaan aihion pintaan ruiskuttamalla tai kastamalla levy sopivassa liuoksessa. Hankalissa tapauksissa voidaan käyttää myös työkalun ja aihion välille asetettavaa erillistä PVC- tai PE-muovikalvoa. PVC-muovikalvon kitkakerroin ja kiinnipysyvyys ovat hyviä. PVC-muovikalvon lämmönkesto kuitenkin rajoittuu 60 – 75 °C:seen, eikä se ole ympäristöystävällinen materiaali. PE-kalvo on kitkaltaan hieman suurempi kuin PVC-kalvo, mutta se on helpompi irrottaa muovauksen jälkeen kuin

PVC-kalvo. PE-muovikalvon lämmönkesto on noin 80 – 100 °C ja se on ympäristöystävällisempää kuin PVC-muovi. Vaativissa muovauksissa voidaan käyttää voiteluainetta muovikalvon lisäksi. (Mäki-Mantila 2001, 31; Ohutlevyn syväveto 1981, 38; Sheet steel forming handbook 1998, 6:20.)

Kuivakalvo (dry-film) voiteluaineet voidaan jakaa vesiliukoisiin ja vedettömiin ns. hot melt -tyyppisiin aineisiin. Vesiliukoiset voiteluaineet kiinnittyvät levyn pintaan ja tarjoavat suhteellisen hyvän korroosiosuojan. Hot melt -voiteluaineilla on paremmat veto-ominaisuudet kuin tavallisilla öljypohjaisilla voiteluaineilla. Erinomaisena etuna niillä on myös yhteensopivuus lähes kaikkien lisäaineiden kanssa. Tarvittavan voiteluaineen määrä on vähäinen, noin 0,5 – 1,5 g/m². (Hyunok & Nimet 2012, 92.)

5.4 Lisäaineet

Voiteluaineissa käytetään useita erilaisia lisäaineita. Erityyppiset lisäaineet parantavat voiteluaineen suorituskykyä monin tavoin. Yleisimmin käytettyjä lisäaineita ovat:

- hapettumisenestolisäaineet
- korroosionestolisäaineet
- vaahtoamisenestolisäaineet
- kitkanalentajat (FM = friction modifier)
- kulumisenestolisäaineet (AW = anti wear)
- paineenkestolisäaineet (EP = extreme pressure)
- viskositeetti-indeksin parantajat.

(Sheet steel forming handbook 1998, 6:18; Teollisuusvoitelu 2006, 62-67.)

Hapettumisenestolisäaineet

Jos voiteluainetta (öljyä) käytetään korkeissa lämpötiloissa ja se on kosketuksissa ilman kanssa, se hapettuu. Hapettumisenestoaineet hidastavat voiteluaineen kemiallista vanhenemista ja näin pidentävät voiteluaineen käyttöikä. Hapettumisenestoai-

neet parantavat öljyn hapettumisen tasapainoa, mutta niillä ei ole juurikaan korroosionestovaikutusta. Tyypillisiä lisäaineita ovat rikkiä ja fosforia sisältävät yhdisteet, kuten sinkkiditiofosfaatit, amiinit sekä fenolijohdannaiset. (Sheet steel forming handbook 1998, 6:18; Teollisuusvoitelu 2006, 66.)

Korroosionestolisäaineet

Muovauksessa käytettävän voiteluaineen tulee sisältää korroosionestoaineita, sillä kappaleet voidaan siirtää muovauksen jälkeen suoraan varastoon ilman erillistä suojausta. Lisäaineen tehtävänä on suojata metallipintoja kosteuden ja hapen aiheuttamalta korroosiolta. Korroosionestolisäaine muodostaa metallin pintaan kalvon, joka estää kosteuden ja hapen pääsyn kosketuksiin metallipinnan kanssa. Kalvon muodostuminen voi tapahtua joko fysikaalisesti tai kemiallisesti. Kemiallisesti toimivat korroosionestoaineet reagoivat metallipinnan kanssa ja fysikaalisesti toimivat, pitkäketjuiset hiilivedyt, tarttuvat polaarisisä molekyyleinä metallipintaan. (Teollisuusvoitelu 2006, 66.)

Korroosionestolisäaineet voivat olla joko vesi- tai öljyliukoisia. Vesiliukoiset lisäaineet sisältävät yleensä natriumnitriittiä ja öljyliukoiset sinkkiä. Muita tyypillisiä kemikaleja ovat typpiyhdisteet, fosforihappojen johdannaiset, rikkiyhdisteet ja karboksyylihappojen johdannaiset. Metallipassivaattoreina käytetään mm. sinkkiditiofosfaattia ja bentsotriatsolia. Metallipassivaattorit estävät metallisia aineita liukenemasta perusöljyyn ja ehkäisevät hapen ja kosteuden pääsyn metallipinnoille. (Hyunok & Nimet 2012, 93; Sheet steel forming handbook 1998, 6:19; Teollisuusvoitelu 2006, 66.)

Vaahoamisenestolisäaineet

Suhteellisen viskoosiset nesteet (öljyt) voivat muodostaa vaahtoa. Vaahtoamisella on haitallinen vaikutus voiteluaineen muodostamalle kalvolle. Vaahto vähentää pintakalvon paineenkestävyyttä ja voi aiheuttaa kalvon rikkoutumisen. Vaahtoamisenestolisäaineet rikkovat muodostuneita vaahtokuplia pienentämällä öljyn pintajännitystä. Vaahtoamisenestolisäaineet sisältävät yleensä pieniä määriä silikoneja. (Sheet steel forming handbook 1998, 6:19; Teollisuusvoitelu 2006, 67.)

Kitkanalentajalisäaineet (FM)

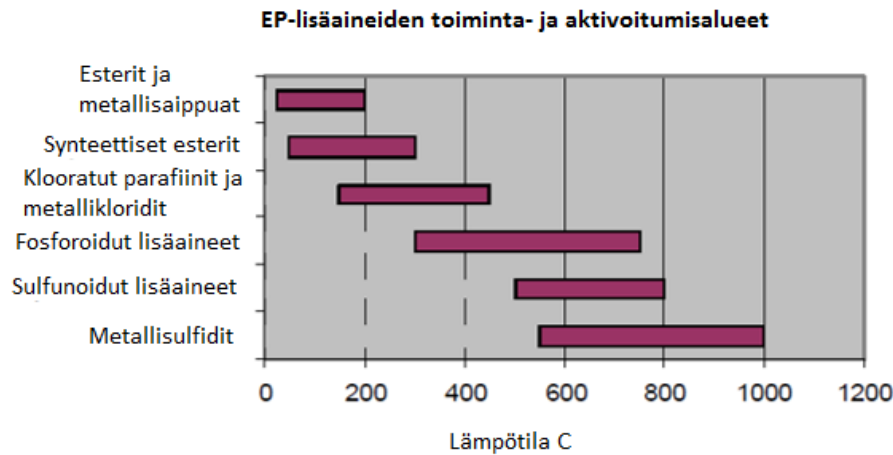
Kitkanalentajalisäaineet (friction modifier FM) toimivat raja-voitelulisäaineiden tavoin, sillä niiden tehtävänä on alentaa kitkaa liikkuvien pintojen välillä, varsinkin alhaisilla liikenopeuksilla. FM-lisäaineet ovat yleensä pitkiä, suoraketjuisia hiilivetyjä, joiden polaarisenä ryhmänä toimii esimerkiksi alkoholien -OH-ryhmä. Muita kitkanalentajia ovat amiinit, amidit ja hiilihapot. (Teollisuusvoitelu 2006, 66.)

Kulumisenestolisäaineet (AW)

Kulumisenestolisäaineet (anti wear AW) nostavat pintakalvon kantavuutta. Lisäaineet pyrkivät suojaamaan voitelukalvon rikkoutumista ja sen seurauksena syntyvää pintojen kulumista. AW-aineiden muodostamat kemialliset kerrokset leikkautuvat helpommin kuin itse metalli. Kemiallinen suojakerros voi muodostua uudelleen aiemman kerroksen leikkaututtua pois ja reaktiivisen metallipinnan paljastuttua. Kulumisenestolisäaineina käytetään tyypillisesti sinkkiditiofosfaattia. Muita aineita ovat rikki- ja fosforyhdisteet sekä amiinit. (Sheet steel forming handbook 1998, 6:19; Teollisuusvoitelu 2006, 67.)

Korkeapainelisäaineet (EP)

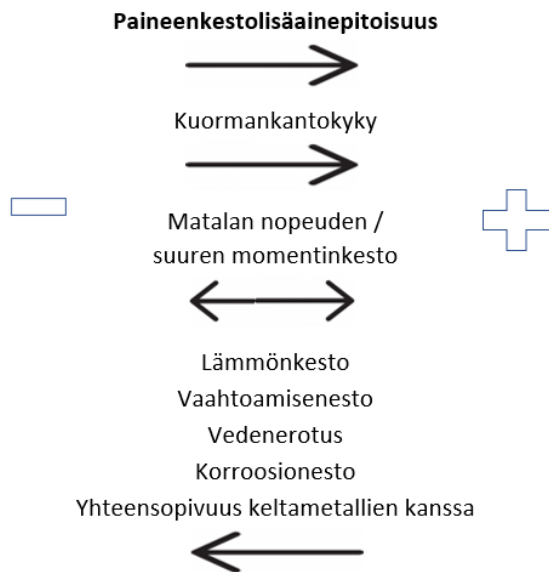
Korkeapainelisäaineet (extreme pressure EP) koostuvat yleensä kloori-, rikki- ja fosforyhdisteistä, jotka reagoivat suuren pintapaineen aiheuttamassa korkeassa lämpötilassa metallipinnan kanssa muodostaen metallisaippuoista koostuvan kemiallisen rajakalvon. EP-lisäaineista fosforia käytetään alhaisissa lämpötiloissa (< 200 °C), kloorin lämpötila-alue on noin 150 – 400 °C ja rikin noin 200 – 800 °C. EP-lisäaineet voivat edistää korroosioalttiutta, jolloin työkalut ja muovattavat kappaleet tulisi pestä heti vedon jälkeen. Nykyisin kloori on usein korvattu rikki- ja fosforyhdisteillä, sen haitallisuuden takia. Myös eräitä typen yhdisteitä ja orgaanisia yhdisteitä käytetään parantamaan paineenkestokykyä. Kuviossa 24 on kuvattu eräitä paineenkestolisäaineita ja niiden toimintalämpötiloja. (Sheet steel forming handbook 1998, 6:19; Teollisuusvoitelu 2006, 62-63; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 10.)



Kuvio 24. Paineenkestolisäaineiden toiminta- ja aktivoitumisalueet. (Cliff 2008; Teollisuusvoitelu 2006, 63.)

EP-lisäaineita käytetään varsinkin vaativissa muovauksissa. Lämpötilan noustessa työkalun ja aihion pinnalla EP-lisäaineistettu voiteluaine ohenee ja voi palaa metallipintoihin. Jos voiteluaine sisältää myös lämpötilankestolisäaineita (extreme temperature additives ET), voiteluaine paksunee lämpötilan kohotessa. ET-lisäaineet liimautuvat tehokkaasti lämpöiseen työkappaleeseen muodostaen kitkaa alentavan kalvon työkalun ja aihion välille. (Hyunok & Nimet 2012, 92; Sheet steel forming handbook 1998, 6:19.)

Paineenkesto- (EP) ja kulumisenestolisäaineita (AW) kutsutaan usein rajavoiteluaineiksi. Monet yhdisteet toimivat sekä EP- että AW-lisäaineena, kuten esimerkiksi sinkkiditiofosfaatti, jolla on kumpaakin ryhmään kuuluvia ominaisuuksia. Paineenkestolisäaineilla ja kulumisenestolisäaineilla on sama käyttötarkoitus ja niitä hyödynnetään samoissa olosuhteissa. Usein on vaikeaa erottaa mitkä ominaisuudet ovat tärkeitä ko. kohteessa ja mitkä ominaisuudet vaikuttavat lopputulokseen. Kuviossa 25 on kuvattu lisäainepitoisuuden kasvun vaikutus öljyn muihin ominaisuuksiin. (Teollisuusvoitelu 2006, 63.)

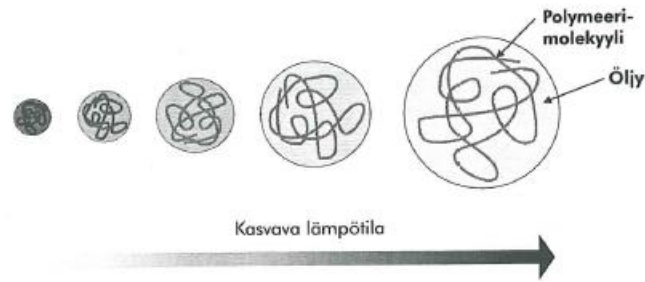


Kuvio 25. EP-lisäainepitoisuuden kasvun vaikutus öljyn muihin tärkeisiin ominaisuuksiin.

(Teollisuusvoitelu 2006, 63, muokattu.)

Viskositeetti-indeksin parantajat (VI)

VI-lisäaineilla vähennetään voiteluaineen lämpötilariippuvuutta. Viskositeetti-indeksin parantajia käytetään varsinkin voiteluaineissa, joissa lämpötilat vaihtelevat. Lämpötilan kohotessa VI-lisäaineet estävät öljymolekyylien vapaan liikkumisen, jolloin viskositeetti muutokset pienenevät. Lisäaineet ovat yleensä öljyyn liukenevia polymeerejä, kuten polyolefiineja ja metakrylaatteja. Kuviossa 26 on kuvattu polymeerin toimintaa öljymolekyylissä lämpötilan noustessa, tällöin polymeeri "avautuu" ja muodostaa öljymolekyylin liikettä jarruttavan avaruusverkon. (Teollisuusvoitelu 2006, 64.)



Kuvio 26. Viskositeetti-indeksin parantajana toimivan polymeerin toiminta (Teollisuusvoitelu 2006, 64.)

5.5 Voiteluaineelle asetettavat vaatimukset

Jos ainoa voiteluaineelta vaadittava ominaisuus olisi pieni kitkakerroin, ei voiteluaineen valinta olisi hankalaa. Todellisuudessa ohutlevyn muovauksessa tulee ottaa huomioon monia eri asioita, joten lopullinen voiteluaineen valinta voi olla erittäin hankalaa. Taulukossa 5 on listattu tärkeimpiä voiteluaineelta haluttuja ja vältettäviä ominaisuuksia. (Sheet steel forming handbook 1998, 6:18.)

Taulukko 5. Voiteluaineelta haluttuja ja ei-haluttuja ominaisuuksia. (Sheet steel forming handbook 1998, 6:18.)

Haluttu ominaisuus	Ei-haluttu ominaisuus
Kitkan hallinta	Vaarallinen terveydelle
Kalvon pysyvyys	Tulenarka
Korroosiosuoja	Pinnan värjäys
Muovatus pinnan suojaaminen	Epämiellyttävä tuoksu
Nopea reaktio	Korkea hinta
Helppo levitys	
Helppo poistettavuus	

Ensisijaisesti voiteluaineelta vaadittavia ominaisuuksia ovat tahmaantumisen ehkäisy ja kitkan alentaminen. Syvävedossa voiteluaineen vaikutus kitkaan on erittäin monimutkainen. Voiteluaineen lisäksi myös pinnan topografia, työkalun ja aihion pintojen kemiallinen koostumus, vetonopeus ja -voima ovat vedon onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä. Voiteluaineelta vaaditaan hyvää pysyvyyttä aihion pinnalla myös monivaiheisissa vedoissa. Voiteluaine ei myöskään saisi aiheuttaa korroosiota työkaluihin eikä muovattavaan kappaleeseen. (Sheet steel forming handbook 1998, 6:18; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 10.)

Työturvallisuuden kannalta voiteluaineen tulisi olla myrkytön, palamaton ja mahdollisimman vähän ihoa ärsyttävä. Mikäli voiteluaineen levittäminen tapahtuu ruiskuttamalla tai sumuttamalla, on öljysumun ja syöpää aiheuttavien liuotinhöyryjen leviäminen estettävä työympäristöön esimerkiksi tehokkaalla ilmanvaihdolla tai kohdepoistolla. Syvävedon voiteluaineita ei useinkaan kierrätetä, joten niissä ei esiinny ongelmia bakteerikasvuston kanssa. Muita vaadittavia ominaisuuksia ovat mm. ominaisuuksien säilyminen tietyn varastoinnin ajan, säilyä kovettumatta tai muuten pilaantumatta. Voiteluaine ei myöskään saa vaikuttaa mahdolliseen muovauksen jälkeiseen hitsaukseen, vaikka kappaletta ei pestäisikään. Hitsin tulee olla riittävän luja eikä hitsauksessa saa muodostua vahingollisia kaasuja. (Sheet steel forming handbook 1998, 6:18; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 10.)

6 Voiteluaineen levittäminen ja poisto

Voiteluaineen levittäminen

Sopiva voiteluaineen levitysmenetelmä on tärkeää, jotta varmistetaan voitelun hyvä suorituskyky ja mahdollisimman pieni hukka. Yksinkertaisin ja edullisin vaihtoehto on ruiskuttaminen tai käsin levitys sienellä tai telalla. Muita menetelmiä ovat esimerkiksi kastaminen voiteluaineeseen, levitysvalssaus tai elektroforeesi (electro-deposition). Levitysmenetelmän valintaan vaikuttaa mm. sarjakoko, voiteluaineen koostumus sekä käytettävissä olevat välineet. Käsin levitystä käytetään yleisesti pienissä sarjoissa. (Hyunok & Nimet 2012, 92; Ohutlevyn syväveto 1981, 39.)

Käsin levityksen ja telavoitelun heikkoutena on suuri voiteluaineen hukka, määrän hallitsemattomuus sekä työpisteen likaisuus. Ruiskuttamalla suoritettu voiteluaineen levityksen etuna on tasaisuus sekä määrän säädettävyyden. Elektroforeesi menetelmässä voiteluaine levitetään aihion pintaan käyttämällä sähkövarausta. Tässä menetelmässä ei voiteluaineesta tule hukkaa, mutta laitteisto on kallis varsinkin pienelle tuotantovolyyymille. (Hyunok & Nimet 2012, 92; Mäki-Mantila 2001, 31; Ohutlevyn syväveto 1981, 39.)

Voiteluaineen poisto

Voiteluaineen poistettavuuteen liittyy sen kiinnitarttumistapa. Fysikaalisesti adsorboituneet aineet pystytään poistamaan ilman, että kappaleen pinnan ominaisuudet muuttuvat. Kemiaalisesti kiinnittyneiden voiteluaineiden poistaminen on hankalaa ja vaatii aina pinnan ominaisuuksien muuttamista, koska ne muodostavat yhdisteitä metallipinnan kanssa. (Voitelu levynmuovauksessa 1981, 12.)

Voiteluaine joudutaan useimmiten poistamaan kappaleen pinnasta muovauksen jälkeen, varsinkin jos tuote maalataan. Voiteluaineen poistoon on pääsääntöisesti kaksi tapaa; liuotin rasvanpoisto tai alkaliset puhdistusaineet. Raakaöljyiset, jotka yleensä ovat mineraaliöljypohjaisia ja sisältävät polaarisia ainesosia kuten rasvoja, estereitä tai EP-lisäaineita, puhdistetaan usein liuotinaineilla. Haihtuvia liuottimia ei kuitenkaan useinkaan käytetä niiden ympäristö- ja terveyshaittojen takia. Esimerkiksi hiilivetyliuottimet ovat suhteellisen myrkyttömiä, mutta tulenarkoja toisinkuin klooratut hiilivedyt, jotka ovat palamattomia, mutta ovat myrkyllisiä hengitettynä sekä iho kosketuksena. (Hyunok & Nimet 2012, 93; Lubrication of steel sheet and strip for forming 2003, 5.2.)

Alkalinen puhdistus tehdään yleensä joko ruiskutus- tai upotusmenetelmällä, riippuen käytettävissä olevasta laitteistosta, sarjan koosta sekä tuotteen muodosta. Ruiskutusmenetelmässä voiteluaine poistetaan metallipinnalta emulgoimatta. Tällä menetelmällä irronneet partikkelit on helppo erotella eikä puhdistusliuos likaannu.

Uputusmenetelmässä alkalipitoisuus voi vaihdella laimeasta väkevään. Syövyttävät kylvyt poistavat ei-rautametalleista jäänteet tehokkaasti ja muuttavat kappaleen pinnan sopivaksi jatkokäsittelyä varten. Ei-syövyttävät liuokset poistavat lian kappaleesta, mutta eivät muuta kappaleen pinnanlaatua. (Hyunok & Nimet 2012, 93; Voitelu levynmuovauksessa 1981, 12.)

Happopuhdistuksella voidaan poistaa korroosiotuotteita, oksidikalvoja, hilsettä sekä öljy- ja rasvajäänteitä. Menetelmä sopii sekä rautametallien että ei-rautametallien puhdistamiseen. Esimerkiksi rautafosfaattiprosessi (pH 3,5 – 5,5) passivoi metallipinnan ja on halpa happopuhdistusmenetelmä. (Voitelu levynmuovauksessa 1981, 12.)

Taulukossa 6 on esitetty eräs jaottelu voiteluaineen poistomenetelmien sopivuudesta käytetyn voiteluaineen ja vedon vaativuusluokan perusteella.

Taulukko 6. Voiteluaineen poistettavuus työn vaativuuden ja voiteluaineen koostumuksen mukaan.

(Lubrication of steel sheet and strip for forming 2003, muokattu.)

Vaativuus luokka	Voiteluaineen koostumus	Puhdistettavuus /pestävyys		
		Vesipohjaiset puhdistajat	Rasvanpoistajat tai liuottimet	Korroosio suoja
Vesipohjaiset voiteluaineet				
Helppo	Vesiliukoinen öljy tai vaha, 5 - 20 % emulsio	Erit. hyvä	Hyvä	Kohtalainen
Kohtalainen	Vesi-saippua liuos, 5 - 20 %	Erit. hyvä	Erit. hyvä	Kohtalainen
	Raskaan työstön vesiliukoinen öljy (sisältää rikki- tai kloorilisäaineita)	Erit. hyvä	Hyvä	Kohtalainen
Korkea	Saippua-rasva pasta, laimennos vedellä	Kohtalainen	Huono	Kohtalainen
	Raskaan työstön vesiliukoinen öljy (sisältää suuren pitoisuuden rikki- tai kloorilisäaineita)	Erit. hyvä	Hyvä	Kohtalainen tai heikko
Vaativa	Pigmentoitu saippua-rasva pasta, laimennos vedellä	Heikko	Erit. heikko	Hyvä
	Kuiva saippua tai vaha, vesiliuos tai dispersio (voi sisältää liukenevia täyteaineita)	Hyvä	Erit. heikko	Hyvä

Öljypohjaiset voiteluaineet				
Helppo	Työstö-öljy (jäännös) Visko (v) noin 20 cSt	Hyvä	Erit. hyvä	Kohtalainen
	Mineraaliöljy, v = 5-65 cSt	Hyvä	Erit. hyvä	Kohtalainen
	Haihtuva öljy	Ei tarvitse puhdistusta		Ei yhtään
Kohtalainen	Mineraaliöljy (v = 20-65 cSt) plus 10-30 % rasvaöljyjä	Hyvä	Erit. hyvä	Kohtalainen
	Mineraaliöljy, (EP-öljy) plus 2-20 % rikki- tai kloorattu öljy	Hyvä tai kohtalainen	Hyvä	Kohtalainen tai heikko
Korkea	Rasvaöljy	Kohtalainen	Kohtalainen	Kohtalainen
	Mineraaliöljy (v = 20-65 cSt) plus 5-50 % a) ei-emulgoituva kloorattu öljy	Heikko	Hyvä	Erit. heikko
	b) emulgoituva kloorattu öljy	Hyvä	Hyvä	Erit. heikko
	Väkevöity fosfatoitu öljy	Kohtalainen	Kohtalainen	Kohtalainen
Vaativa	Sekoitus pigmentoitua saippua-rasvapastaa ja mineraaliöljyjä	Heikko	Heikko	Kohtalainen
	Väkevöity sulfokloorattu öljy (voi sisältää rasvaöljyjä) a) ei-emulgoituva	Erit. heikko	Kohtalainen	Erit. heikko
	b) emulgoituva	Hyvä	Kohtalainen	Erit. heikko
	Väkevöity kloorattu öljy: a) ei-emulgoituva	Erit.heikko	Kohtalainen	Erit. heikko
	b) emulgoituva	Hyvä	Kohtalainen	Erit. heikko

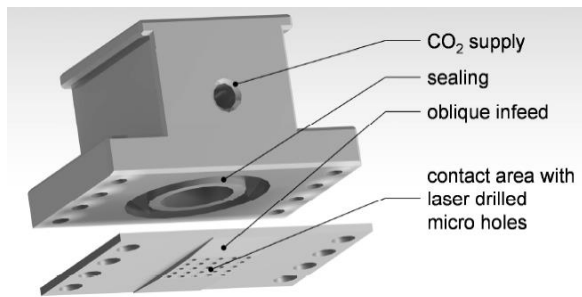
7 Muut kitkan hallintamenetelmät

7.1 Voitelukangas

Ruotsalainen Tribotextil on kehittänyt vetokankaan, joka tarjoaa vaihtoehdon perinteisen voiteluaineen rinnalle. Vetokankaalla voidaan syvävetää tuotteita, joiden pinnanlaatu vaatimukset ovat korkeat. Voitelukangas muotoutuu työkalun muotoon ensimmäisen vedon aikana, jonka jälkeen samalla kankaalla voidaan vetää useita tuotteita. Vetokangas vähentää kappalekustannuksia, sillä vedettyjä kappaleita ei tarvitse pestä muovauksen jälkeen. (Tribotextil n.d.)

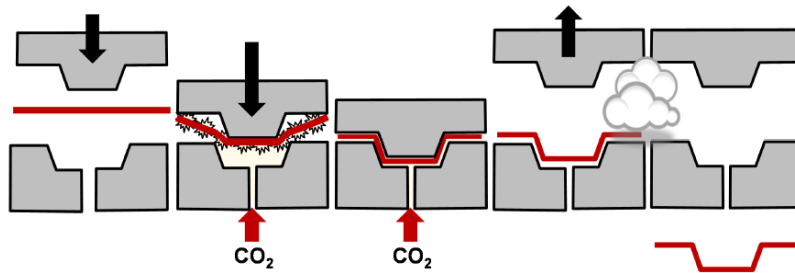
7.2 CO₂-voitelumenetelmä

Saksassa Stuttgartin yliopistossa on tutkittu mahdollisuutta korvata syvävedossa käytettävä voitelu nestemäisellä hiilidioksidilla (CO₂). Menetelmän etuna ovat kemikaalittomuus, ympäristön puhtaus sekä kappaleen puhtaus vedon jälkeen. Tutkimuksessa liusketesteissä käytettiin kahta eri pintapainetta (2,5 ja 6,5 MPa) ja vetonopeutta (50 ja 100 mm/s) sekä vertailutuloksina kahta mineraaliöljypohjaista voiteluainetta. Liusketesteissä käytettiin kuvion 27 mukaista työkalua, jolla hiilidioksidi ohjattiin aihion pintaan. Tulokset osoittivat hyviä mahdollisuuksia tulevaisuudessa käyttää haihtuvaa CO₂-voitelumenetelmää syvävedossa. (Singer & Liewald 2015, 53.)



Kuvio 27. Liusketestissä käytetty muokattu työkalu hiilidioksidivoitelulle. (Singer & Liewald 2015, 55.)

Kuviossa 28 on esitetty muovauksen periaate prosessikaaviona. Työkaluun on laserporattu mikromeikiä (120-140 µm), joiden läpi nestemäinen hiilidioksidi ohjataan aihion pintaan. Muovauksen jälkeen, työkalun avautuessa hiilidioksidi haihtuu kappaleen pinnalta. Pinta jää puhtaaksi ja kuivaksi eikä sitä tarvitse pestä. (Singer & Liewald 2015, 53.)



Kuvio 28. Prosessikaavio CO₂-voitelusta.
(Singer & Liewald 2015, 54.)

Testituloksina todettiin CO₂-voitelun antavan pienemmän kitkakertoimen kuin mineraaliöljyisillä voiteluaineilla. Tavallisilla voiteluaineilla kitkakertoimet olivat 0,11 – 0,14 ja CO₂-voitelulla kitkakertoimet olivat 0,08 – 0,1 vetonopeudella 50 mm/s ja pintapaineella 6,5 MPa. Vetonopeudella 100 mm/s kitkakertoimet hieman alenivat; 0,09 – 0,11 mineraaliöljy ja 0,06 – 0,07 CO₂-voitelu. (Singer & Liewald 2015, 57.)

8 Työterveys ja -turvallisuus

Työterveyslaitoksen ja muidenkin tahojen terveyteen kohdistuneissa tutkimuksissa on tutkittu lastuavien työstömenetelmien, kuten sorvauksen, jyrsinnän ja hionnan leikkuunesteiden vaikutusta työntekijöiden terveyteen. Lastuava työstö on Suomessa paljon yleisempää kuin muovaava työstö, kuten syväveto. Lastuavassa työstössä käytettävä leikkuuneste sisältää samoja kemikaaleja kuin syvävedossa käytetyt voiteluaineet, jolloin mm. enimmäispitoisuuksia pystytään arvioimaan.

Eroja voidaan havaita mm. lisäaineiden pitoisuuksissa. Syvävedon voiteluaineiden paineenkestolisäaineiden (EP) pitoisuudet ovat suuremmat kuin leikkuunesteiden. Myös viskositeetti on huomattavasti suurempi, varsinkin vaativissa syvävedoissa.

Käyttötavasta johtuen, syvävedossa käytettävissä voiteluaineissa ei käytetä yhtä paljon bakteerien kasvua estäviä aineita (biosidejä) kuin lastuavassa työstössä käytettävissä lastuamislainneissa. Biosidien käyttö johtuu siitä, että esimerkiksi sorveissa kierrätetään samaa lastuamislainnetta pitkän aikaa, jolloin bakteerit pääsevät lisääntymään nesteessä, kun taas syvävedossa harvoin kierrätetään voiteluainetta.

“Leikkuuneste-emulsioiden perusaine on öljy, joko synteettinen, mineraali- tai kasviöljy. Niihin on sekoitettu lisäaineita, mm. emulgaattoreita ja ruosteen-, hapettumisen- ja vaahdonestoaineita sekä biosidejä eli mikrobikasvua estäviä aineita.” (Kemikaalit ja työ 2005, 237.)

8.1 HTP-pitoisuudet ja altistumisen arviointi

Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisussa (2016) kerrotaan HTP-arvojen eli haitalliseksi todettujen pitoisuuksien olevan sosiaali- ja terveysministeriön arvioita hengitysilman epäpuhtauksien pienimmistä pitoisuuksista, jotka voivat aiheuttaa haittaa tai vaaraa työntekijöiden turvallisuudelle tai terveydelle. Julkaisussa todetaan, että työnantajan on otettava nämä huomioon arvioitaessa työn vaaroja. Työnantajan on myös huomioitava ilmanpuhtaus ja työntekijöiden altistuminen työympäristön suunnittelussa. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisussa (2016) mainitaan, että työturvallisuuden arvioinnissa aineiden syöpävaarallisuus on otettu HTP-arvojen arvioinnissa huomioon vasta vuodesta 1987 lähtien. (HTP-arvot 2016, 11.)

Leikkuuneste- emulsiolle itselleen ei ole annettu HTP-arvoa, mutta altistumista pystytään arvioimaan käyttämällä tunnettujen vapautuvien ainesosien HTP-arvoja. Suurimmassa osassa vapautuvista ainesosista tutkimuksissa mitatut pitoisuudet ovat pienentyneet jopa 10-osaan HTP-arvoista. Altistumisen suuruuteen vaikuttaa moni tekijä, kuten kohdepoisto, työstötapa, paineilman käyttö kappaleiden puhdistamiseen sekä työntekijöiden suojautuminen. (Kemikaalit ja työ 2005, 237-238.)

Metallityöstöympäristön terveyshaitan arvioiminen on hankalaa siksi, että kaikille ilmassa esiintyvillä ihoa ja hengitysteitä ärsyttävillä ja herkistäville aineille eikä esimerkiksi haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuudelle (TVOC) ole annettu HTP-arvoa. Terveyshaittoja voidaan osittain arvioida vertaamalla pitoisuuksia teollisuusympäristölle ehdotettuihin tavoitearvoihin. Työterveydellistä arviota on hankala tehdä myös siksi, ettei monia voiteluainetiivisteissä esiintyviä herkistäviä aineita ole

luokiteltu vaaralliseksi eikä käyttöturvatiedoissa tarvitse ilmoittaa vaarallisiksi luokiteltuja ainesosia, jos niiden pitoisuudet ovat pieniä. Tästä syystä käyttöturvatiedoissa on vain vähän tietoa tuotesisällöstä. (KAMAT 2007, 3; Metallintyöstäjien työperäiset iho- ja hengitystiesairaudet 2005, 11.)

8.2 Työstönesteiden käyttö, altistuminen ja terveyshaitat

Leikkuunesteiden koostumus vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan, sekä voi muuttua myös käytön aikana. Leikkuunesteiden ainesosat, muut epäpuhtaudet tai mikrobit voivat altistaa terveyshaitoille. Työstönesteiden tärkeimmät kohde-elimet altistumiselle ovat iho ja hengitystiet. Ihoaltistuminen tapahtuu yleisimmin nesteroiskeiden aiheuttamana tai märkien kappaleiden käsittelyssä. Hengitystiealtistuminen tapahtuu lähinnä aerosolina, jota muodostuu varsinkin lastuavassa työstössä. Leikkuunesteet ja -öljyt voivat myös osin höyrystyä kovassa lämmössä. Leikkuunesteaerosolille voi altistua herkistävästi myös samassa tilassa työskentelevät. (HTP-arvot 2016, 12; Kemikaalit ja työ 2005, 237.)

Lastuamismuodot eivät aiheuta merkittävää syöpävaaraa, sillä PAH-yhdisteiden (polysykliset aromaattiset hiilivedyt) sekä nitriittien ja etanoliamiinien reaktiotuotteina syntyvien nitrosoamiinien pitoisuudet ovat pieniä. Merkityksellisimmät kemikaalien aiheuttamat terveyshaitat ovat:

- lastuamismuodot aiheuttavat ihottumat; sekä ärsytyskosketusihottuma että allerginen kosketusihottuma
- ilmaan päässyt aerosoli voi aiheuttaa astmaa; oireita hengenhädistys, yskä ja hengityksen vinkuminen
- aerosoli voi aiheuttaa työperäistä nuhaa
- silmien ja hengitysteiden ärsytys.

(KAMAT 2007, 6.)

Tietoa työstä -julkaisusarjan raportissa (2016) todetaan, että metallintyöstönesteille altistuneilla on noin nelinkertainen riski saada ylähengitystieoireita. Heillä on myös

kohonnut riski sairastua astmaan. Raportissa todetaan, ettei voida kuitenkaan yksiselitteisesti todeta yksittäisen aineen tai aineosien aiheuttavan tiettyjä oireita. (Metallityöstön kohdepoistoilman hallinta 2016, 14.)

8.3 Metallityöstössä esiintyviä ilman epäpuhtauksia ja HTP-raja-arvoja

Metallityöstäjien työperäiset iho- ja hengitystiesairaudet -raportissa (2005) todetaan, että aiemmat tutkimukset ovat painottuneet pöly- ja öljysumupitoisuuksien mittaamiseen. Pölypitoisuudet ovat olleet 1970-luvulta lähtien keskimääräisesti alle nykyisin voimassa olevien HTP-arvojen (5 mg/m^3). Myös keskimääräiset öljysumupitoisuudet olivat 8 tunnin HTP-arvojen alapuolella (5 mg/m^3). Tosin hetkelliset pitoisuudet, varsinkin työstökoneiden läheisyydessä voivat olla korkeita, jopa yli 20 mg/m^3 . (Metallityöstäjien työperäiset iho- ja hengitystiesairaudet 2005, 13.)

Metallityöstöhalleista mitatuissa näytteissä esiintyi mm. formaldehydiä, etanoliamiineja sekä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC), kuten typpi- ja terpeeniyhdisteitä, glykosaalia ja muita aldehydejä. Pitoisuudet jäivät kuitenkin alle HTP-arvojen. Mutta koska kyse on herkistävästä aineista, voi näilläkin pitoisuuksilla olla merkitystä työntekijöiden altistumiselle ja herkistyneiden työntekijöiden oireiden syntymiselle. Ilmanäytteissä todettiin useita VOC-yhdisteitä, joista monet ovat ärsyttäviä yhdisteitä, kuten heksaanihapot, fenolit ja alkoholieetterit. Raportissa todetaan, että työilmaan joutuva epäpuhtaus ei ole öljysumu, vaan haihtuvat VOC-yhdisteet. Näiden yhdisteiden pitoisuudet olivat huomattavasti suurempia kuin öljysumupitoisuudet. (Metallityöstäjien työperäiset iho- ja hengitystiesairaudet 2005, 13, 52-55.)

Työterveyslaitoksen Tietoa työstä -julkaisusarjassa julkaistu Metallityöstön kohdepoistoilman hallinta -tutkimusraportissa (2016) todetaan, että vaikka yksittäisten epäpuhtauksien HTP-arvot alitetaan, voi työntekijöillä esiintyä mm. nuhaa, yskää, silmäoireita, hengenahdistusta, astmaa sekä muita hengitystieoireita. Tutkimuksessa selvitettiin erilaisten kohdepoistojärjestelmien suodatuksen tehokkuutta mittaamalla

työtilan yleisilmaa. Yleisilmassa havaittiin lähinnä alkanoliamiineja sekä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (TVOC). Mittauksissa kävi ilmi, että ilman alkanoliamiinien kokonaispitoisuuksista 77 % ylitti Työterveyslaitoksen suositteleman tavoitetaso 0,1 mg/m³. Kohdepoistossa olevat HEPA-suodattimet eivät pystyneet pidättämään kaasumaisia epäpuhtauksia, kuten alkanoliamiineja ja VOC-yhdisteitä juuri lainkaan. Työtilan yleisilma aiheutti työntekijöiden altistumisen ilman epäpuhtauksille. Raportissa mainitaan, että työilmaa voidaan parantaa mm. seuraavin menetelmin:

1. suodatuslaitteistojen ilma johdetaan suoraan ulos työtilasta
2. työtilojen ilmanvaihdon merkittävä lisääminen
3. suodatusjärjestelmien parantaminen sekä hiukasmaisten että kaasumaisten epäpuhtauksien huomioonotto.

(Metallityöstön kohdepoistoilman hallinta 2016, 56.)

Sosiaali- ja terveysministeriön antamassa asetuksessa (1214/2016) työturvallisuuslaissa on määritetty HTP-arvot, jotka on oletettu imeytyvän elimistöön vain hengityksen kautta. Eräät aineet kuitenkin imeytyvät helposti haitallisessa määrin elimistöön myös ehjän ihon läpi. Pelkästään ilmapitoisuuksien avulla ei voida arvioida ihon läpi imeytyvien aineiden määriä eikä aineista aiheutuvaa vaaraa. Tästä johtuen tällaisten aineiden HTP-arvojen yhteyteen on merkitty ”iho” osoittamaan sitä, että aine voi vaarallisissa määrin imeytyä ehjänkin ihon läpi. Iho -merkintä ei ole otettu huomioon esimerkiksi voimakkaiden happojen ja emästen aiheuttamaa ihon ärsyyntymistä tai syöpymistä. (HTP-arvot 2016, 12.)

Taulukossa 7 on esitetty yleisimpiä haitallisia aineita, joita tavataan metallityöstössä käytetyissä työstönesteissä. Sarakkeessa HTP_{15min} on annettu hetkellisen pitoisuuden arvot. Näiden aineiden vaikutus on yleensä nopea, kuten äkillinen myrkytys, ärsytys, huumaus tai väsymys (HTP-arvot 2016, 13). Työterveyslaitoksen tavoitetasomuistiossa on esitetty, että metallintyöstönesteiden altistumisen indikaattoriksi käytetään alkanoliamiinien yhteenlaskettua pitoisuutta. Tavoitemuistiossa on esitetty pitoisuuden tavoitetasoksi 0,1 mg/m³ (8h). (Metallityöstön kohdepoistoilman hallinta 2016, 14.)

Taulukko 7. Metallintyöstönesteiden ilmaan vapautuvia kemiallisia altisteita ja niiden HTP-arvot.

(Metallintyöstön kohdepoistoilman hallinta 2016, 14.)

Altiste	HTP _{8h} mg/m ³	HTP _{15min} mg/m ³	Huom.
Öljysumu	5		
Formaldehydi	0,37		1,2 mg/m ³ kattoarvo
Monoetanoliamiini	2,5	7,6	
Dietanoliamiini	2		iho
Trietanoliamiini	5		
Alkanoliamiinit (yhteenlaskettu pitoisuus)	0,1		Työterveyslaitoksen tavoitetaso
TVOC	3		Teollisuusilman viitearvo
	0,3		Työterveyslaitoksen tavoitetaso

Monialtistuminen

HTP-arvot on annettu yksittäisille aineille, jolloin monialtistumista ei pystytä huomiomaan. Aineiden yhteisvaikutukset voivat olla toisistaan riippumattomia, summautuvia eli additiivisia, toisiaan voimistavia eli synergistisiä tai toisiaan heikentäviä eli antagonistisia. Vaikutustavaltaan samanlaiset aineet, eli ne vaikuttavat samaan kohde-elimeen, katsotaan olevan summautuvia. Monialtistumista voidaan arvioida myös laskennallisesti, jos aineiden vaikutustapa on sama. Kuitenkin synergistisesti vaikuttavilla aineilla kokonaisvaikutus tulee arvioida laskennallista arviota suuremmaksi. (HTP-arvot 2016, 13-16.)

8.4 Metallintyöstönesteissä esiintyvät kemikaalit ja niiden käyttötarkoitus

Yleisimpiä herkistäviä ainesosia ovat antimikrobisia aineita (biosideja), kuten formaldehydi ja formaldehydivapauttajat. Eräitä formaldehydivapauttajia kohtaan voi kehittyä allergia (myös ihokosketusallergia) ilman formaldehydiallergiaakin. Etanoliamiineja ja niiden johdannaisia käytetään mm. pH:n säätäjinä, emulgaattoreina ja korroosionestäjinä. Emäksisinä aineina ne voivat aiheuttaa ärsytysihottumaa. Etanoliamiineja ja niiden johdannaisia ovat mm. alkanoliamiiniboraatit, rasvahappojen

alkanoliamiinisaippuat ja kookosdietanoliamidit. (Metallintyöstäjien työperäiset iho- ja hengitystiesairaudet 2005, 9.)

Synteettiset nesteet koostuvat synteettisistä rasvahapoista. Niiden korkean saippua- ja lisäainepitoisuuden takia ne ovat voimakkaasti ihoa ärsyttäviä. Muita allergiaa aiheuttavia aineita ovat mm. hapettumisenestoaineena käytetyt fenyylialda-naftyyliamiini ja tert-butyylihydrokinoni sekä paineenkestolisäaineena käytetty etyyliheksyyllisinkkiditiofosfaatti. Iho-oireina ärsytysihottumaa aiheuttaa useimmiten työstö-öljyssä käytetty perusöljy. Öljy voi aiheuttaa myös ns. öljyaknea, jolloin ihohuokokset tukkeutuvat. Öljyakne on kuitenkin nykyään harvinainen ammattitauti. (Metallintyöstäjien työperäiset iho- ja hengitystiesairaudet 2005, 8, 16.)

8.5 Suojautuminen

Koneiden kotelointi sekä tehokas ilmanvaihto ja suodatus ehkäisevät merkittävässä määrin työntekijöiden altistumista työstönesteiden epäpuhtauksille. Paineilman käyttöä tulisi välttää, jos siitä aiheutuu aerosolia työilmaan. Henkilösuojaimista varsinkin tiiviitä suojakäsineitä tulisi käyttää käsiteltäessä työstönesteitä tai märkiä kappaleita. Esimerkiksi nitriilikumista valmistetut suojakäsineet suojaavat ihoa työstönesteeltä. Kumi- tai muovikäsineiden alla voidaan käyttää ohuita puuvilla käsineitä vähentämään käsien hiostumista ja ihoärsytystä. Hengityssuojaimia voidaan käyttää tarvittaessa. (KAMAT 2007, 7-9.)

Tästä eteenpäin opinnäytetyö on julistettu salaiseksi.

Lähteet

Alan, R. 2010. Significance of test for petroleum products. 8p. 252-260. Kappale 20: Petroleum waxes including petrolatums. Viitattu 10.4.2017. <https://janet.finna.fi>. Knovel.

Cliff, L. 2008. Trends & developments in metalforming lubricants to reduce overall tool and process costs. Viitattu 23.3.2017. <http://britishmetalforming.com/uploads/file/pdf/CBM%20-%20Trends%20and%20developments%20-%20Cliff%20Lea%20-%20Fuchs%20Lubricants%20-%2014%20May%2008.pdf>

Handbook of die design. 1998. 2 p. McGraw-Hill companies, USA.

Heide, E. van der 2002. Lubricant failure in sheet metal forming processes. Väitöskirja, Twnten yliopisto, Alankomaat. Viitattu 1.3.2017. https://www.utwente.nl/en/et/ms3/research-chairs/stt/research/publications/phd-theses/thesis_vanderheide.pdf

Heikkilä, T. 2014. Tilastollinen tutkimus. 9. uud. p. Porvoo: Edita Publishing.

HTP-arvot 2016 – Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. 2016. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisu 2016:8. Viitattu 30.3.2017. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79109/08_2016_HTP-arvot_suomi_22122016_nettil_kansilla.pdf?sequence=1

Hyunok, K. & Nimet, K. 2012. Friction and lubrication. Julkaisussa Sheet metal forming – fundamentals. Toim. Altan, T. & Tekkaya, A.E. ASM International. 89-98. Viitattu 3.3.2017. http://www.asminternational.org/documents/10192/3477814/05340G_Sample.pdf/274eeee5-af5e-4920-8607-ecad5682a521

KAMAT-tietokortti. 2007. Työterveyslaitoksen sivuilla julkaistu tietokortti kemiallisesta altistumisesta metalli- ja autoalojen työtehtävissä. Viitattu 3.4.2017. <http://partner.ttl.fi/partner/kamat/tietokortteihin/Documents/Metallintyosto.pdf>

Kemikaalit ja työ. 2005. Selvitys työympäristön kemikaaliriskeistä. Työterveyslaitos, Helsinki. Viitattu 26.3.2017. Julkaisun pysyvä osoite: [http://urn.fi/URN:ISBN%20951-802-636-X%20\(pdf\)](http://urn.fi/URN:ISBN%20951-802-636-X%20(pdf))

Kivioja, S., Kivivuori, S., & Salonen, P. 2004. Tribologia – Kitka, kuluminen ja voitelu. korj. p. 4p. Helsinki: Hakapaino.

Korhonen, A. & Larkiola, J. 2012. Ohutlevyjen muovauksen perusteet. Uniprint Oulu.

Larkiola, J. N.d. Metallien muovaus. VTT Tuotteet ja tuotanto. pdf.

Lubrication of steel sheet and strip for forming. 2003. Bluescope steel. <http://steelproducts.bluescopesteel.com.au/files/TB-F1.pdf>

Martikainen, L. 2006. Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiirroksen avulla. Ohutlevy, 2, 52-56. Lehtiartikkeli. Viitattu 1.3.2017. http://www.ohutlevy.com/pdf/Ohutlevy206_s52-56.pdf

Meconet. 2017. Yrityksen www sivut. Viitattu 4.4.2017.

<https://www.meconet.net/fi/>

Meconet Group – Yritysesittely. 2016. Yrityksen intra sivut.

Metal forming handbook. 1998. Germany.

Metallintyöstäjien työperäiset iho- ja hengitystiesairaudet. 2005. Työterveyslaitoksen projektin 309083 loppuraportti Työsuojelurahastolle tutkimus- ja kehityshankkeesta 102118. Viitattu 26.3.2017.

<https://www.tsr.fi/tsarchive/files/TietokantaTutkittu/2002/102118loppuraportti.pdf>

Metallityöstön kohdepoistoilman hallinta. 2016. TSR loppuraportti nro 113256. Viitattu 30.3.2017.

https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131328/Metallinty%C3%B6st%C3%B6n_kohdepoistoilman_hallinta.pdf?sequence=1

Mäki-Mantila, J. 2001. Ohutlevyjen taivutus ja muovaus. Metalliteollisuuden Keskusliitto, Tekninen tiedotus 11/2001. Metalliteollisuuden Kustannus, Helsinki.

Ohutlevyn muovauksen suunnittelu ja simulointi. 2002. Metalliteollisuuden Keskusliitto, Tekninen tiedotus 7/2002. Metalliteollisuuden Kustannus, Helsinki.

Ohutlevyn syväveto – Materiaalit. 1980. Metalliteollisuuden Keskusliitto, Tekninen tiedotus 7/80. Metalliteollisuuden Kustannus, Helsinki.

Ohutlevyn syväveto – Työkalut ja puristimet. 1981. Metalliteollisuuden Keskusliitto, Tekninen tiedotus 7/81. Metalliteollisuuden Kustannus, Helsinki.

Raj, S. 2010. Significance of test for petroleum products. 8p. 229-233. Kappale 19: Lubricating greases. Viitattu 7.3.2017. <https://janet.finna.fi>. Knovel.

Sheet Steel Forming Handbook. 1998. Göteborg.

Singer, M. & Lievald, M. 2015. Evaluation of different influencing factors in dry sheet metal forming with vaporizing CO₂ used as lubricant. Applied Mechanics and Materials, 794, 53-58. Viitattu 13.4.2017. <https://janet.finna.fi>, Engineering Source.

Syväveto tuotesuunnittelussa – vinkkejä ja käyttökohteita. 2016. Meconet:n www-sivuilla. Viitattu 1.3.2017. <https://www.meconet.net/wp-content/uploads/2016/09/Meconet-Vinkkej%C3%A4-syv%C3%A4veto-suunnitteluun-160902.pdf>

Teollisuusvoitelu. 2006. Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 8. 4 p. Oy Kotkan kirjapaino Ab, Hamina.

Tribotextil, N.d. Yrityksen www sivut. Viitattu 13.4.2017.

<http://www.tribotextil.se/index.php/en/>

Voiteluaineet: Voiteluöljyt. N.d. Opetushallituksen oppimateriaali, kunnossapito – menestystekijä. Viitattu 7.3.2017.

http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_e03_voiteluaineet_voiteluoljyt.html

Voitelu levynmuovauksessa. 1981. Suomen Metalliteollisuuden Keskusliitto.
Tekninen tiedotus 24/81. Metalliteollisuuden Kustannus, Helsinki.