

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TEKNILLINEN TIEDEKUNTA
KONETEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

DIPLOMITYÖ:

LASTUTTAVUUSKOKKEIDEN KARTOITUS JA SUUNNITELMA M-TERÄSTEN
LAADUN TESTAAMISEEN SOVELTUVASTA UUESTA
LASTUTTAVUUSPIKAKOKEESTA

Työn tarkastajina toimivat TkT Juha Varis ja TkL Inga Sihvo. Työn ohjaajina toimivat DI Ari Anonen ja TkT Pekko Juvonen.

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Ville Ryyänen		
Tiedekunta	Teknillinen tiedekunta	Koulutusohjelma	Konetekniikka
Työn nimi	Lastuttavuuskokeiden kartoitus ja suunnitelma M-terästen laadun testaamiseen soveltuvasta uudesta lastuttavuuspikakokeesta		
Title in English	Machinability test survey and plan new machinability test opportunities for M-steel quality testing		
Vuosi ja paikka	2008 Lappeenranta		
Työn ohjaajat	DI Ari Anonen ja TkT Pekko Juvonen		
Työn tarkastaja	TkT Juha Varis ja TkL Inga Sihvo		
<p>Teräksen hyvällä lastuttavuudella tarkoitetaan useita eri tekijöitä, joita ovat esimerkiksi terän pitkä kestoikä, prosessin kannalta edullinen lastun muoto sekä lastuttavan kappaleen hyvä mittatarkkuus ja pinnan laatu. Materiaalin lastuttavuuden mittaamisella teräksen valmistaja pyrkii varmistumaan siitä, että asiakkaan teräkselle asettamat lastuttavuusvaatimukset täyttyisivät mahdollisimman hyvin.</p> <p>Tämä diplomityö on tehty Ovako Bar Oy Ab:lle Imatran terästehtaalle. Diplomityön tavoitteena oli kartoittaa olemassa olevat lastuttavuuskokeet ja laatia suunnitelma M-teräksen laadun testaamiseen soveltuvasta uudesta lastuttavuuskokeesta Ovakon yli 20 vuotta vanhan lastuttavuuskokeen eli M_q-kokeen tilalle. M_q-kokeen toimivuus on erittäin riippuvainen käytettävästä teräpalasta. Kyseisten teräpalojen valmistus on lopetettu eikä vastaavaa teräpalaa ole saatavilla. Tämän vuoksi oli tarve selvittää mahdollisuuksia korvata M_q-koe. Uuden lastuttavuuskokeen suunnittelua ohjaavat lastuttavuuskokeelle asetettavat vaatimukset, joita ovat luotettavuus, nopeus, helppokäyttöisyys ja pieni koemateriaalimäärän tarve.</p> <p>Tämän työn kirjallisuusosuudessa esitetyistä poraamalla, sorvaamalla ja jyrsimällä tehtävistä lastuttavuuskokeista ei löydy suoraa ratkaisua M-teräksen testaamiseen. Työn soveltavassa osuudessa esitetään kolme koevariaatiota uudeksi lastuttavuuskokeeksi. Ensimmäinen on M_q-koe täydennettynä sitä tukevilla lastuttavuuskokeilla ja siihen liittyvien ongelmien poistaminen. Toinen koevariaatio on pistosorvauskoe, ja kolmantena koekappaleen ja teräpalan väliseen resistanssiin perustuva koe. Kokeiden toimivuudesta M-teräksen testaukseen ei tarkalleen tiedetä, joten työssä on laadittu koejärjestely kokeiden toimivuuden testaamiseksi. Työn keskeisimpiä havaintoja on, että M-teräksen ja normaalin teräksen välinen ero terän kestoikässä mitattuna on kaventunut nykyaikaisten pinnoitettujen teräpalojen vuoksi. Tämä asettaa suuren haasteen uuden kokeen laadinnalle. Lyhyessä kokeellisessa osuudessa testattu pistosorvauskoe kuitenkin antoi myönteisiä tuloksia sen kehityspotentialista toimia M-teräksen lastuttavuuskokeena.</p> <p>Diplomityö antaa Ovakolle näkemyksiä erilaisista lastuttavuuskoe vaihtoehdoista ja niiden mahdollisista hyödyistä, haitoista ja mahdollisuuksista. Työssä esitettyjen vaihtoehtojen pohjalta pystytään laatimaan uusi lastuttavuuspikakoe.</p>			
Avainsanat	lastuttavuus, M_q -koe, pistosorvauskoe, sorvauskoe		
128 sivua 45 kuvaa, 12 taulukkoa ja 12 liitettä			

ABSTRACT

Author	Ville Ryyänen		
Faculty	The Faculty of Technology	Training programme	Mechanical engineering
Master's thesis	Machinability test survey and plan new machinability test opportunities for M-steel quality testing		
Year and place	2008 Lappeenranta		
Advisors	M. Sc. Ari Anonen and D. Sc. Pekko Juvonen		
Examiners	D. Sc. Juha Varis and Lic. Sc. Inga Sihvo		
<p>The term machinability can refer to many different matters. Good machinability means for example a long tool life, a good form of the chips, an accuracy of the workpiece and a good quality of the surface. Steel factories are making machinability tests in order to ensure that the quality level of the steel satisfy the customer demands.</p> <p>This Master's thesis has been done to the steel factory Ovako Bar Oy Ab located in Imatra. The goal of this thesis is to discover different machinability tests from literature and to plan new machinability test opportunities for M-steel quality testing. The reason of this thesis is that the old machinability test of Ovako, called by M_q-test, is very dependent on the characters of the cutting tool. However, the fabrication of these tools has been finished. Therefore, a substitute testing method has to be discovered.</p> <p>The first part of the thesis is a literature research which deals with different turning, drilling and milling machinability tests. The second part of the thesis is applied part which deals with three different variations of machinability test. The first one of these variations is a modern version of the M_q-test. The second variation is a parting-off turning test and the third one is a machinability test which is based on the resistivity between the workpiece and the cutting tool. There is no information in the literacy sources whether or not these tests can be the solution for testing the M-steel. Consequently, one chapter in applied part is a testing plan which discusses how to test the functionality of the different machinability tests for the M-steel testing. One of the most important conclusions of the thesis is that currently the machinability difference between standard steel and the M-steel is smaller than earlier. The reason for this is the use of coated tools because the tool life is almost the same in both cases. This is a major challenge when a new machinability test is being planned. In addition, there is a brief practical part in the thesis. Moreover, the possibility to use the parting-off turning test in M-steel testing has been experimented in the practical part. The results have indicated that the parting-off turning test might be an opportunity to test the M-steel.</p> <p>The master's thesis is not indicating which machinability test is the most suitable one for the M-steel testing, but it provides Ovako with different viewpoints to machinability tests.</p>			
Keywords	machinability, short time machinability test, M_q -test, parting-off turning test, turning test		
128 pages 45 figures, 12 tables and 12 appendices			

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ovako Bar Oy Ab:lle Imatran terästehtaalle. Haluan kiittää Ovakoa heidän antamastaan mahdollisuudesta tehdä diplomityö sekä mielenkiintoisesta ja haastavasta diplomityön aiheesta.

Kiitokset työni ohjaajille DI Ari Anoselle ja TkT Pekko Juvoselle rakentavista keskusteluista, hyvistä ideoista ja opastuksesta. Työni tarkastajia TkL Inga Sihvoa ja professori Juha Varista kiitän korjaus- ja parannusehdotuksista. Diplomityön kieliasun tarkastuksesta ja korjausehdotuksista haluan kiittää tätiäni FL Paula Sajavaaraa. Kiitokset kuuluvat myös Lappeenrannan teknillisen yliopiston konepajatekniikan laboratorion henkilökunnalle avustuksesta kokeiden teossa, sekä kaikille, jotka ovat auttaneet työni etenemisessä.

Suurikiitokset vanhemmilleni Heikille ja Leilalle koko opiskelujeni aikana saamastani tuesta. Erityiskiitokset ystäväilleni, jotka ovat auttaneet irtautumaan opiskelujen ja diplomityön aikaisesta ahertamisesta. Haluan kiittää myös ystävääni EA John Perryä eri osa-alueiden avartavasta teknilliskaupallisesta asiantuntemuksesta.

Lappeenrannassa 17.11.2008

Ville Ryyänen

Korpraalinkuja 3 as 304
53810 Lappeenranta

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SYMBOLILUETTELO

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimusongelma, työn tavoitteet ja rajaus	2
1.2	Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne	3
1.3	Yritysesittely	4
2	LASTUTTAVUUS	6
2.1	Lastuttavuuden mittaaminen	6
3	OVAKON M-TERÄS	8
4	OVAKON NYKYINEN LASTUTTAVUUSPIKAKOE	10
4.1	Kokeen suoritus	10
4.1.1	Koekappale	11
4.1.2	Kokeen kulku	12
4.1.3	Kokeessa käytettävät sorvit	17
4.1.4	Terä, teränpidin ja lastuamisgeometria	18
5	OVAKON LASTUTTAVUUSPIKAKOKEEN ONGELMAT	19
6	LASTUAMISKOKEET YLEISESTI	22
6.1	Lastuamattomat kokeet	23
6.2	Lastuavat kokeet	23
6.2.1	Kestoaika- ja kestopolyymikoe	24
6.2.2	Lastuamisvoima-, momentti- ja työstötehokoe	25
6.2.3	Lastuamislämpötilakoe	26
6.2.4	Lastuamisvärähtelykoe	28
6.2.5	Akustiseen emissioon perustuva koe	30
6.2.6	Pinnankarheus- ja mittatarkkuuskoe	31
6.2.7	Lastun muotoon ja murtoon perustuva koe	31

6.3	Terän kulumisen mittaamiseen käytettävät menetelmät	32
6.3.1	Vaihesiirtomenetelmä	32
6.3.2	Laserskannaukseen perustuva menetelmä	33
6.4	Lastuttavuuskokeen suunnittelu.....	34
7	ERILAISET LASTUAMISKOESOVELLUKSET	35
7.1	Porauskoe ja sen sovellukset.....	35
7.1.1	Terän kestoajaan perustuva koe.....	36
7.1.2	Vakioporausvoimaan perustuva koe	36
7.2	Sorvauskoe ja sen sovellukset.....	37
7.2.1	Standardin ISO 3685:1993 mukainen terän kestoajakoe	38
7.2.2	Lastuamisvoimiin ja -momenttiin perustuva sorvauskoe	38
7.2.3	Tasosorvauskoe.....	39
7.2.4	MATHON-RENAULT-koe.....	40
7.2.5	LaSalle-koe	41
7.2.6	Jatkuvasti kasvavaan lastuamisnopeuteen perustuva koe	44
7.2.7	Pistosorvauskoe	45
7.2.8	SCT-koe.....	45
7.3	Jyrsintäkoe ja sen sovellukset	47
7.3.1	VOLVOn lastuttavuuskoe.....	47
7.3.2	Lastuamiskokeet tasojurysimellä.....	49
8	AIEMMAN LASTUTTAVUUSPIKAKOETUTKIMUKSEN TARKASTELU.....	52
8.1	Lastuamisvärähtelyt	52
8.2	Lastuamislämpötilat	54
8.3	Lastuamisvoimat.....	55
9	JOHDANTO SOVELTAVAAN OSUUTEEN	57
10	ASiantuntijanäkemykset	59
11	Uuden lastuttavuuskokeen muodostaminen.....	61
12	Ensimmäinen koevariaatio kehitetty versio M_q -kokeesta.....	64
12.1	M_q -kokeen ongelmat ja virhetekijät.....	64
12.1.1	M_q -kokeen luotettavuuden arvioiminen eri teräslajien välillä	66
12.2	M_q -kokeen kehittäminen ratkaisemalla kokeen ongelma- ja virhetekijät.....	68
12.2.1	Uuden teräpalan etsiminen.....	68
12.2.2	Virhelähteiden poistaminen	70

12.3	M _q -kokeen kehittäminen muiden kokeiden avulla	71
12.3.1	Lastun muotoon ja murtoon perustuva koe.....	72
12.3.2	Pinnankarheus- ja mittatarkkuuskokeet	73
12.3.3	Lastuamisvoima-, lastuamismomentti- ja työstötehokokeet.....	73
12.3.4	Lastuamisvärähtelykoe	75
12.3.5	Lastuamislämpötilakoe	77
12.3.6	Porauskoe.....	78
12.3.7	Teräpalan kuoppa- ja viistekulumisen mittaaminen optisesti	78
12.4	Kooste M _q -kokeen kehittämisestä	78
13	TOINEN KOEVARIAATIO PISTOSORVAUSKOE	80
13.1	Arvoanalyysi.....	81
13.2	Toisen koevariaation periaate	86
13.3	Terän ja teränpitimen valinta	88
13.4	Muiden kokeiden lisääminen pistosorvauskokeeseen	89
14	KOLMAS KOEVARIAATIO RESISTANSSIIN PERUSTUVA KOE	90
14.1	Kokeen periaate ja koejärjestelyjen kuvaus.....	90
14.2	Teräpalan valinta.....	92
14.3	Edut, ongelmat ja mahdollisuudet	93
15	UUSIEN KOKEIDEN TESTAUSSUUNNITELMA.....	95
15.1	Koejärjestely	95
15.1.1	Ensimmäinen koevaihe lastuamisvärähtely-, lastuamisvoima- ja pinnankarheuskokeiden testaus.....	96
15.1.2	Toinen koevaihe pistosorvauskokeen testaus	96
15.1.3	Kolmas koevaihe porauskoe	98
15.2	Koekappale	98
16	PISTOSORVAUSKOKOEN TESTAUS.....	102
16.1	Kokeessa käytettävien lastuamisparametrien määrittäminen.....	102
16.2	Kokeen kulku.....	105
16.3	Tulokset ja analysointi	107
17	ARVOANALYYSI KOEVARIAATIOIDEN VÄLILLÄ	112
18	ANALYSOINTI LOPULLISEKSI LASTUTTAVUUSKOKOEEKSI JA JATKOKEHITYSEHDOTUKSET	113
18.1	Ensimmäinen vaihtoehto.....	113

18.2	Toinen vaihtoehto	114
18.3	Muut jatkokehitysehdotukset	115
19	POHDINTA JA TUTKIMUKSEN JOHTOPÄÄTÖKSET	117
19.1	Lastuttavuuskokeiden kartoitus	117
19.2	M_q -kokeesta tehdyt havainnot	117
19.3	Soveltavassa osuudessa tehdyt havainnot	118
20	YHTEENVETO	121
	LÄHTEET	123
	LIITTEET	

SYMBOLILUETTELO

a_p	[mm]	Lastuamissyvyys
C		Taylorin kaavan vakio
D	[mm]	Halkaisija
f	[mm/r]	Syöttö
F_c	[kgm/s ²]	Päälastuamisvoima
F_f	[kgm/s ²]	Syöttövoima
F_p	[kgm/s ²]	Passiivivoima
HB	[kg/mm ²]	Brinell-kovuus
HRC		Rockwell-kovuus
KT	[µm]	Kuoppakuluminen
l	[mm]	Pitkittäin lastuttu matka
L_{100}	[mm]	Poran tunkeuma sadan kierroksen aikana
L	[mm]	Lastuttu matka
M_q		Ovakon lastuttavuuspikakokeen tunnus
Q	[cm ³ /min]	Tilavuusvirta
t	[min]	Lastuamisaika
T	[min]	Terän kesto aika
v_c	[m/min]	Lastuamisnopeus
v_0	[m/min]	Lastuamisnopeus alussa
v_{15}	[m/min]	Lastuamisnopeus, jolla terä kestää 15 min
V	[cm ³]	Tilavuus
VB	[mm]	Viistekuluminen
VB_B	[mm]	Keskimääräinen kulumisviiste alueella B
VB_{Bmax}		Kulumisviisteen maksimiarvo alueella B
vT -suora		Keskimääräinen terän kesto aikakuvaaja
α		Taylorin eksponentti eli kesto aikasuoran kulmakerroin
χ	[°]	Asetuskulma
γ	[°]	Rintakulma
α	[°]	Päästökulma
λ	[°]	Viettökulma

ε

[°]

Kärkikulma

π

Matemaattinen vakio pii, jonka likiarvo on 3,14

LYHENNELUETTELO

AE	Acoustic Emission, Akustinen emissio
ASTM	American Society for Testing and Materials, kansainvälinen standardi
CAD	Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CCD	Charge-Coupled Device, valoherkkä kenno, joita käytetään muiden muassa video- ja digitaalikameroissa sekä kuvanlukijoissa
CNC	Computerized Numerical Control, tietokoneavusteinen numeerinen ohjaus
LCD	Liquid Crystal Display, nestekidenäyttö
LTY	Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LWDM	Pitkän matkan mikroskooppi (long working distance microscope)
SCT	Short cycle turning, sorvauskoe, jossa lastuamisolosuhteet vaihtuvat koko ajan

1 JOHDANTO

Tässä diplomityössä on laadittu Ovako Bar Oy Ab:n Imatran terästehtaalle suunnitelma uuden lastuttavuuspikakokeen toteuttamisesta. Lastuamiskokeilla yleensä pyritään selvittämään materiaalin lastuttavuusominaisuuksia, teräpalan lastuamisominaisuuksia tai kustannustehokkaita lastuamisparametreja. Termi lastuamiskoe on yleisnimitys kaikille lastuamalla tehtäville kokeille. Kun puhutaan lastuttavuuskokeista, tässä työssä tarkoitetaan ainoastaan kokeita, joilla tutkitaan materiaalin lastuttavuutta. Terän lastuamisominaisuuksia tutkittaessa tarkastelun kohteena ovat yleensä terän kestoiän pidentäminen ja terän lastun murto-ominaisuuksien parantaminen. Materiaalin hyvä lastuttavuus voi tarkoittaa seuraavia asioita: materiaalia lastuttaessa lastuava terä kestää mahdollisimman pitkään, lastun muoto on prosessin kannalta edullinen sekä saavutetaan hyvä mittatarkkuus ja pinnan laatu.

Nykyajan kiristynvä kilpailu asettaa materiaalin valmistajille paineita kehittää teräksiä entistä paremmin asiakkaan tarpeet täyttäväksi. Laadun on oltava korkea, ja sen on pysyttävä tasaisena sulatuksesta toiseen. Materiaalin valmistajat pyrkivätkin kehittämään teräksiä siten, että ne täyttäisivät mahdollisimman hyvin asiakkaan laatuvaatimukset. Tämä tarkoittaa sitä, että lastuamalla tuotteita valmistavalle yritykselle pyritään toimittamaan teräksiä, jotka lastuttavuudeltaan täyttävät korkeat vaatimukset, kuitenkin siten, että myös materiaalin muut ominaisuudet pysyvät riittävällä tasolla. Viime kädessä ratkaisevia ovat kuitenkin lastuamisprosessin kustannukset, jotka yrityksen on optimoitava parhaalle mahdolliselle tasolle tehokkaiden lastuamisparametrien avulla. Tehokkaiden lastuamisparametrien saavuttamiseksi Ovako on kehittänyt asiakkailleen M-teräksen, jolla on tavallista terästä paremmat lastuttavuusominaisuudet; myös M-teräksen muut ominaisuudet ovat yhtä hyvät tai jopa paremmat kuin tavallisen teräksen. Ovakolla on testattu M-teräksen lastuttavuutta jo usean vuosikymmenen ajan. Ovakon nykyisen lastuttavuuspikakokeen eli M_q -kokeen tavoitteena on varmistaa, että M-teräkselle asetetut lastuttavuuslaatuvaatimukset täyttyvät ja tarkistaa, että teräksen laatu pysyy samana sulatuksesta toiseen. Koetulosten perusteella lisäksi pystytään valvomaan ja kehittämään teräksen valmistusprosessia.

1.1 Tutkimusongelma, työn tavoitteet ja rajaus

Ovakon nykyinen lastuttavuuspikakoe perustuu terän kulumisen mittaamiseen. Kokeessa lastutaan koekappaletta hallituissa olosuhteissa teräksen kovuudesta ja lajista riippuvalla lastuamisnopeudella tietty materiaalilavuus. Tämän jälkeen teräpalasta mitataan kuoppakuluminen ja viistekuluminen. Kuoppakulumisen suuruuden perusteella määritetään materiaalille M_q -arvosana, joka kertoo, kuinka hyvin teräksen M-käsittely (Ca-käsittely) on onnistunut. Nykyinen koe on noin 20 vuotta vanha, ja sitä on päätetty nykyaikaistaa. Kokeen luotettavuus riippuu erittäin paljon käytetystä teräpalasta. M_q -kokeessa käytettävät teräpalat loppuvat Ovakolta varastosta kolmen vuoden sisällä, mikä asettaa paineita kehittää uusi lastuttavuuskoe. Kyseisen teräpalan valmistus on lopetettu, ja ominaisuuksiltaan vastaavaa teräpalaa on Ovakolla yritetty etsiä jo usean vuoden ajan, mutta täysin vastaavaa teräpalaa ei ole löytynyt. Nykyisen kokeen ongelmana on myös se, että huonot koetulokset painottuvat suurille lastuamisnopeuksille, joita käytetään pehmeitä teräslaatuja lastuttaessa. Tämä kertoo siitä, että kokeessa on virhetekijöitä. Lisäksi on herännyt kysymys, mitä nykyisellä kokeella käytännössä mitataan. Kokeella pitäisi mitata M-käsittelyn onnistumista eli sitä, kuinka hyvää materiaali on lastuttavuudeltaan. Ongelmana kuitenkin on, että nykyinen koe ei mittaa asiakkaan kokemaa teräksen laatua vaan se mittaa ainoastaan M-käsittelyn onnistumista tietyissä lastuamisolosuhteissa.

Työssä selvitettiin kattavasti Ovakon M_q -kokeen ongelmia, minkä pohjalta saatiin tarkka kuva nykytilanteesta. Työn tavoitteena oli kartoittaa olemassa olevat lastuamiskokeet ja laatia niiden perusteella suunnitelma M_q -kokeen kehittämiseksi tai kokonaan uuden lastuttavuuskokeen laatimiseksi. Kartoituksessa otettiin huomioon sorvauskokeiden lisäksi poraamalla ja jyrsimällä tehtävät kokeet. Lastuttavuuskokeen pitää olla luotettava, nopea (pikakoe) ja mahdollisimman edullinen toteuttaa ja käyttää. Edullisella käytöllä voidaan tarkoittaa esimerkiksi mahdollisimman pientä koemateriaalin tarvetta. Työ antaa Ovakolle ideoita siitä, millaiset kokeet voisivat soveltua parhaiten juuri heidän tarpeisiinsa. Toiveena on myös se, että uusi koe toimisi M-käsittelyn onnistumisen lisäksi asiakkaan kokeman laadun mittarina. Tällöin kokeessa käytettävien lastuamisarvojen pitäisi olla lähellä teollisessa tuotannossa käytettäviä lastuamisarvoja.

Työssä ei laadita täysin valmista lastuttavuuskoetta, vaan pyritään antamaan mahdollisimman laaja kuva erilaisista mahdollisuuksista ja erilaisia näkemyksiä lastuttavuuskokeiden toteuttamiseksi. Työn kokeellinen osuus onkin erittäin lyhyt ja pääpaino on soveltavassa osuudessa esitetyissä koevariaatioissa ja suunnitelmissa.

1.2 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Työn ensimmäiseen osaan on kerätty kirjallisuudesta ja tietokannoista aihetta käsittelevä oleellinen tieto. Tutkimuskirjallisuuden esittely alkaa lastuttavuuden määritelmällä ja selvityksellä siitä, kuinka sitä mitataan. Alussa esitellään Ovakon nykyinen lastuttavuuspikakoe ja lyhyesti sen tiedossa olevat ongelmat. Tämän jälkeen kartoitetaan erilaisia lastuamiskokeita sekä poraus-, jyrä- ja sorvauskokeen erilaisia koesovelluksia. Kirjallisuusosuuden lopussa on katsaus aikaisemmin tehtyyn tutkimukseen, jossa vertaillaan lastuamisvärähtelyjä, -voimia ja -lämpötiloja huonon ja hyvän M-teräksen välillä.

Diplomityön toinen osuus on soveltava osuus. Soveltavaan osuuteen on kerätty lastuamistekniikan asiantuntijoilta mielipiteitä siitä, millainen koemuoto soveltuisi mahdollisimman hyvin Ovakon tarpeisiin. Olemassa olevan teorian ja asiantuntijakommenttien perusteella on tässä työssä laadittu erilaisia koevariaatioehdotuksia uudeksi lastuttavuuskokeeksi. Ensimmäinen koevariaatioehdotus on parannettu versio vanhasta lastuttavuuskokeesta (M_q -kokeesta). Toinen ehdotus on pistosorvauskoe, ja kolmantena koevariaationa on koekappaleen ja teräpalan väliseen resistanssiin perustuva koe, jonka idea syntyi diplomityön pohjalta. Erilaisten koevariaatioiden toimivuudesta M-teräksen testaukseen ei ole tietoa, joten yhdessä luvussa on laadittu kokeiden testaussuunnitelma, jolla voidaan tarkistaa kokeiden soveltuvuus M-teräksen testaamiseen. Lisäksi työhön liitettiin lyhyt kokeellinen osuus, jossa testattiin pistosorvauskokeen toimivuutta M-teräksen lastuttavuuskokeeksi. Työn lopuksi on arvoanalyysi kahden ensimmäisen koevariaation vertailemiseksi, pohdinta ja johtopäätökset, esitys lopulliseksi lastuttavuuskokeeksi ja jatkokehitysehdotukset sekä yhteenveto.

1.3 Yritysesittely

Imatran terästehtaan alkujuuret ovat vuodessa 1915, jolloin perustettiin harkko- ja piirautaa valmistava Elektrometallurgiska AB. Seuraava merkittävä vuosi oli 1935, jolloin alettiin rakentaa nykyistä Imatran terästehdasta. Teräksen tuotanto nykyisessä tehtaassa päästiin aloittamaan vuonna 1937. Ovako-nimi otettiin ensimmäisen kerran käyttöön vuonna 1969, jolloin yhdistyi kolme yritystä: Vuoksenniska, Koverhar ja Åminnefors. Vuosien varrella Ovakon historiaan on mahtunut niin yrityskauppoja kuin yritysten yhdistymisiäkin. Vuonna 1991 SKF ja Metra jakoivat Ovako-konsernin ja syntyi Imatra Steel. Imatra Steel ennätti toimia 14 vuotta, minkä jälkeen vuonna 2005 ruotsalainen AB SKF:n omistama Ovako Steel AB, Wärtsilä Oyj:n omistama Imatra Steel Oy ja Rautaruukki Oyj:n omistamat Fundia Wire Oy Ab, Fundia Special Bar AB ja Fundia Bar & Wire Processing AB yhdistivät liiketoimintansa ja syntyi Ovako-konserni. Samalla Imatra Steel sai uuden nimen Ovako Bar Oy Ab:n. Vuonna 2006 omistajayhtiöt myivät Ovakon osakekannan saksalaiselle teräsalalla toimivalle Pampus-yhtiölle ja kahdelle hollantilaiselle sijoitusyhtiölle. Vuonna 2007 Ovako siirtyi kokonaan yksityisen Pampus Industrie Beteiligungen GmbH & Co:n omistukseen. (Ovako 2008.)

Nykyinen Imatran terästehdas Ovako Bar Oy Ab on Euroopan johtava pitkien erikoisterästen toimittaja. Imatran terästehtaalla työskentelee noin 700 työntekijää, ja vuosittainen tuotanto on noin 270 000 tonnia. Valmistusohjelmassa on noin 250 erilaista teräslajia, jotka toimitetaan asiakkaan tarpeiden mukaan pyörö- tai neliötankoina. Raaka-aineena käytetään kierrätettyä teräsromua, joka valmistusprosessissa sulatetaan, valssataan ja jatkojalostetaan valmistusohjelman mukaisesti. (Ovako 2008.)

Imatran terästehtaan tärkein asiakasryhmä on autoteollisuus, johon menee noin puolet tehtaan toimituksista. Toinen puolisko menee konepajateollisuuteen ja teräspalvelukeskuksille. Markkina-alueina ovat kotimaan lisäksi Skandinavia ja Keski-Eurooppa sekä uutena alueena Baltian maat. Vaativimmat kohteet, joihin käytetään Imatran terästehtaan terästä, ovat autoteollisuuden komponentit, kuten kampi- ja nokka-akselit, kiertokanget, hammaspyörät sekä ajoneuvojen ohjaus- ja pyörän ripustuskomponentit. Vaativat kohteet edellyttävät teräkseltä korkeaa laatua ja teknologista osaamista. Hyvänä tuote-esimerkkinä on hyvin lastuttava M-teräs, joka tarjoaa asiakkaalle

tuotantonopeuden kasvun ansiosta kustannustehokkuutta. Imatran terästehtaan vahvuutena onkin tutkimus- ja kehitystoiminta sekä pitkä kokemus erikoisterästen toimittajana. Tämä diplomityö liittyykin juuri teräksen kehitysprosessiin ja laadun varmistamiseen. (Ovako 2008.)

2 LASTUTTAVUUS

Lastuaminen on valmistusmenetelmä, joka tapahtuu joko terällä tai hiomarakeella. Terällä tapahtuvia lastuamismenetelmiä ovat sahaus, höyläys, poraus, jyrsintä ja sorvaus. Hiomarakeella tapahtuvia lastuamismenetelmiä ovat taas hiveltäminen, hoonaus, hiertäminen ja hionta (Andersson 1997a, 3). Lastuttavuudella mitataan, kuinka helppoa tai vaikeaa on lastuta tiettyä materiaalia. Materiaalin hyvä lastuttavuus voidaan määritellä seuraavasti (Šalák, Selecká & Danninger 2005, 122):

Hyvin lastuttavasta materiaalista voidaan poistaa lastuavilla menetelmillä ainetta nopeasti ja alhaisilla kustannuksilla siten, että terän kesto aika ja saavutettava pinnan laatu pysyvät tyydyttävällä tasolla.

Materiaalin lastuttavuudelle on laadittu erilaisia numeroarvoja eri materiaalien lastuttavuuden vertailun helpottamiseksi, mutta materiaaliominaisuutena lastuttavuutta ei kuitenkaan voida pitää. Liitteessä I olevassa kaaviossa on esitetty tekijät, joista lastuttavuus koostuu. Kaavion mukaan lastuttavuuteen vaikuttavat tekijät haaraautuvat kolmeen pääryhmään seuraavasti:

- työkappaleen ja terän materiaali
- lastuamisparametrit
- työstökone ja lastuava terä (Stephenson & Agapiou 2005, 577–578).

2.1 Lastuttavuuden mittaaminen

Lastuttavuutta mitataan, koska halutaan tietoa lastuttavasta materiaalista, lastuavasta terästä tai taloudellisista lastuamisarvoista.

Kuten liitteen I kaaviota tarkasteltaessa voidaan havaita, lastuttavuus koostuu hyvin monesta tekijästä, minkä vuoksi eri materiaalien lastuttavuuden vertailu on vaikeaa.

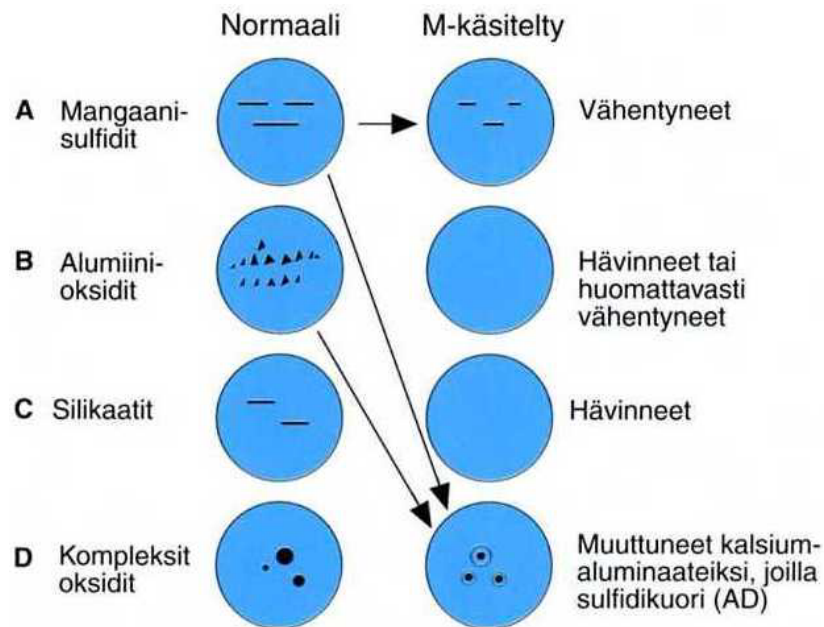
Lukuisista muuttujista huolimatta voidaan kuitenkin määrittää tärkeimmät lastuttavuutta mittaavat tekijät, joita ovat

- työkalun kestoikä
- saavutettava mittatarkkuus
- saavutettava pinnan laatu
- lastun muoto ja murto
- lastuamislämpötila
- materiaalin mekaaniset ominaisuudet
- työkaluun, kiinnittimiin ja työkappaleeseen vaikuttavat voimat sekä tehon tarve (Trent 1984, 172; Väisänen 2001, 18).

Näiden muuttujien lisäksi on myös huomioitava, millaisena lastuamalla tuotteita valmistava yritys kokee hyvän lastuttavuuden. Yrityksen näkökulmasta hyvä lastuttavuus voi olla esimerkiksi näiden tekijöiden pieni hajonta eli teräksen tasalaatuisuus. (Anonen 2008)

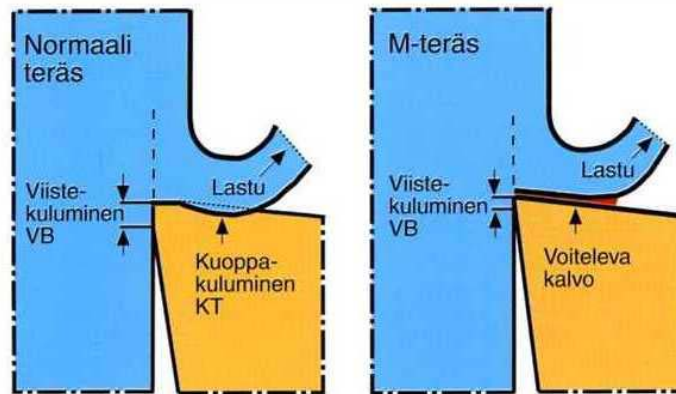
3 OVAKON M-TERÄS

Ovakon M-teräkset ovat kalsium (Ca) -käsiteltyjä alumiinilla (Al) -tiivistettyjä teräksiä, joiden hyvien lastuttavuusominaisuuksien perustana on tarkalla valmistusmenetelmällä aikaansaatu hallittu sulkeumarakenne. Ca-käsittely vähentää MnS-sulkeumien määrää ja muuttaa kovat abrasiiviset alumiinioksidisulkeumat pehmeämmiksi kalsiumaluminaateiksi, joita ympäröi (Ca, Mn) sulfidikuori (kuva 1). Näin saavutettu sulkeumarakenne kuluttaa lastuavaa terää vähemmän. (Valmistusohjelma 2000, 11–12)



Kuva 1. Kalsiumkäsittelyllä muutetaan kovat terää kuluttavat sulkeumat uudentyyppiseksi pehmeämmäksi sulkeumarakenteeksi (Valmistusohjelma 2000, 12).

M-käsittelyn ansiosta suurilla lastuamisnopeuksilla terän rintapinnalle muodostuu terää suojaava ja voiteleva epämetallinen kalvo (kuva 2). Ca-käsittelystä huolimatta M-terästen mekaaniset ja teknologiset ominaisuudet, kuten sitkeys, väsymislujuus, lämpökäsiteltävyys sekä työstössä saavutettava pinnan laatu ovat samaa tasoa tai jopa paremmat kuin vastaavien normaaliterästen. (Valmistusohjelma 2000, 12; Väisänen 2001, 33–34.)



Kuva 2. Ca-käsittelyllä saadun sulkeumarakenteen ansiosta kovametalliterän rintapintaan muodostuu terän kulumista merkittävästi vähentävä voiteleva epämetallinen kalvo (Valmistusohjelma 2000, 13).

Terän rintapinnalle ja joskus myös terän päästöpinnaalle muodostuneen kalvon on havaittu muodostuvan kalsiumkäsittelyillä teräksillä lastuamisnopeuksilla 80–500 m/min. Jatkuva kalvo muodostuu noin 30 sekunnin kuluessa, ja se suojaa teräpalaa etenkin kuoppakulumiselta, mutta myös viistekulumiselta. (Nummi 2001, 9.) Tehtyjen tutkimusten perusteella terän pinnalle muodostunut kalvo

- toimii eristeenä työkalun ja lastun välillä, jolloin työkalun lämpötila pysyy alhaisempana
- alentaa lastuamislämpötilaa ja lastuamisvoimia (eristävä ja voiteleva vaikutus)
- lyhentää lastun kosketuspituutta
- helpottaa lastun muokkautumista ja katkeamista
- suojaa terää abrasiiviselta ja diffuusiokulumiselta (Helistö, Helle & Pietikäinen 1990, 3; Nummi 2001, 8; Väisänen 2001, 33–34).

Käytetyllä teräaineella on todettu olevan vaikutusta kalvon muodostumiseen. Kalvon muodostumista on havaittu tapahtuvan keraamiterillä, TiC-pohjaisilla cermet-terillä sekä pinnoitetuilla pikateräs- ja kovametalliterillä. Sen sijaan pinnoittamattomilla pikaterästerillä kalvoa ei muodostu. Pinnoitemateriaaleja, joilla on havaittu kalvon muodostumista, ovat muun muassa TiN, TiAlN, TiC, Al₂O₃, ZrO₂ ja ZrN. Näille pinnoitteille ja terille yhteistä on, että ne sisältävät hyvin stabiileja oksideja, jotka ovat stabiilimpia kuin raudanoksidit. (Nummi 2001, 10.)

4 OVAKON NYKYINEN LASTUTTAVUUSPIKAKOE

Nykyinen lastuttavuuspikakoe eli M_q -koe on sorvauskoe, jolla pyritään varmentamaan teräksen M-käsittelylle asetettujen laatukriteerien täytyminen ja sitä kautta valmistusprosessin tason seuranta. Kokeen tarkoitus ei ole antaa yksiselitteistä tarkkaa arvoa materiaalin lastuttavuudesta, vaan tärkein tehtävä on määrittää, ylittääkö materiaalin lastuttavuus M-teräksille määrätyn minimivaatimuksen. Koe perustuu standardiin ISO 3685:1977 (E). Suurimpana erona kuitenkin on, että kokeessa käytetään vain yhtä lastuamisnopeutta eikä lopputuloksena ole terän kestoikä vaan terän kulumisaste, joka lasketaan tietyn sorvausajan jälkeen. Kokeesta saadaan lopputuloksena M_q -arvosana, joka lasketaan seostuksen, materiaalin kovuuden, terän kulumisen ja tiettyjen sorvausparametrien avulla. Jos M_q -arvosana on yli neljä, luokitellaan teräs M-teräkseksi. Jos arvosana jää alle neljän, ei sulatusta hyväksytä M-teräkseksi. (Huhtiranta 1994, 1; Anonen 2002, 1)

4.1 Kokeen suoritus

Ovakon lastuttavuuspikakoetta tehdään säännöllisesti noin kymmenelle teräslajille. Teräslajit, joille koetta on tehty vuodesta 2000 alkaen, on esitetty liitteessä II. Osalle teräslajeista koe tehdään useammin kuin toisille, koska kaikki lajit eivät ole yhtä herkkiä laatuvaihteluille. Näytteiden otossa noudatetaan tiettyä järjestelmällisyyttä, eli näyte otetaan esimerkiksi joka toisesta tai joka viidennestä sulatuksesta. Tietyissä tapauksissa järjestelmällisyyttä ei noudateta, vaan koe tehdään esimerkiksi siksi, että kyseinen sulatus on menossa asiakkaalle, joka vaatii teräkseltä korkeaa laatua ja hyvää lastuttavuutta (M-teräsvaatimus). Tämän vuoksi kokeiden viikoittainen määrä voi vaihdella hyvinkin paljon, mutta keskimäärin kokeita tehdään 5–10 kertaa viikossa siten, että vuotuiseksi määräksi tulee 250–400 koetta. Tässä luvussa on kuvattu Ovakon lastuttavuuspikakokeen kulku koeaihion poiminnasta valmiisiin koetuloksiin. (Anonen 2002, 2.)

4.1.1 Koekappale

Koekappaleen aihio voidaan ottaa joko teelmästä tai jo valmiiksi jalostetusta pyörötangosta. Suurin osa koekappaleista otetaan teelmästä (kuva 3), koska tällöin lastuttavuuskoe voidaan tehdä aikaisemmassa tuotannon vaiheessa ja näin saadaan nopeammin tietoa teräksen laadusta. Teelmästä koekappale leikataan karkeavalssaamossa teelmäleikkurilla. Teelmästä otettu kappale on mitoiltaan 135 x 135 mm ja pituudeltaan noin 50 cm. Ennen sorvauspikakoetta teelmästä otettu kappale vaatii päidenoikaisusahauksen, kulmienpyöröstysjyrsinnän, kovuusmittauslaikan sahauksen ja keskiöinnin.



Kuva 3. Lastuttavuuskokeeseen tulevia teelmiä ennen päiden oikaisua ja teelmiä päiden oikaisusahauksen ja kovuuslaikkojen sahauksen jälkeen.

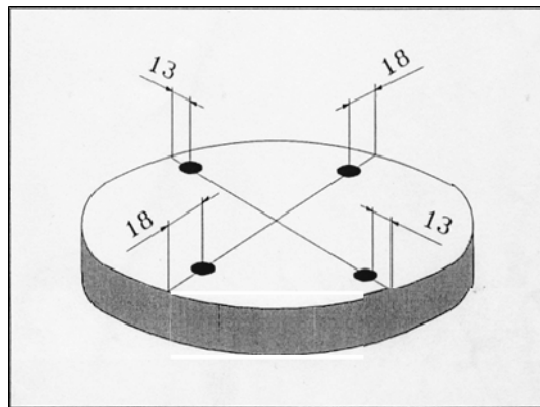
Pyörähdysymmetriset koekappaleet leikataan hienovalssaamossa pidemmästä pyörötangosta. Pyörähdysymmetrisille koekappaleille riittää päidenoikaisusahaus, kovuuslaikan sahaus ja keskiöinti. Lisäksi jotkin teräslajit vaativat lämpökäsittelyn ennen sorvauspikakoetta. (Huhtiranta 1994, 1) Tiedot koekappaleesta on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tiedot pyörötangosta otetusta koekappaleesta (Huhtiranta 1994, 1).

Halkaisija	$\geq \text{Ø}75 \text{ mm}$
Pituus	$\sim 300 - 500 \text{ mm}$
Lämpökäsittely ja kovuus	Koneteräkset valssaustila
	Hiiletysteräkset perlitoidaan alle 200 HB:n kovuuteen, jos valssaustilan kovuus on suurempi kuin 240 HB
	Nuorrutusteräkset koneistetaan alle 330 HB:n kovuuteen nuorrutettuna

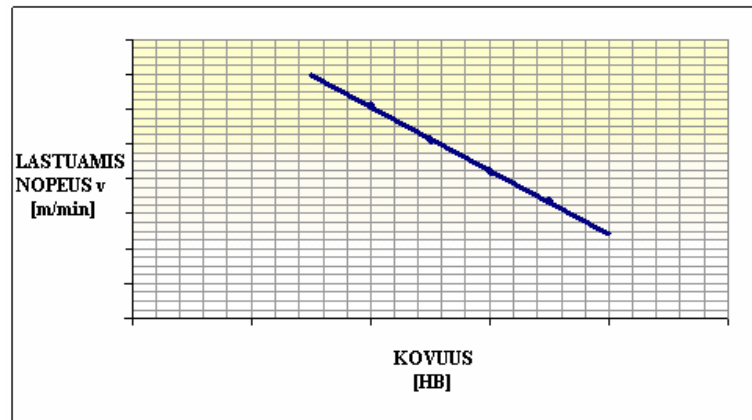
4.1.2 Kokeen kulku

Kokeen ensimmäisessä vaiheessa koekappaleesta sahatusta kovuuslaikasta mitataan kovuus. Kovuus mitataan Brinell-kovuutena (HB 10/3000) kappaleen poikkipinnasta neljällä yksittäisellä mittauksella. Mittauspisteet valitaan kuvan 4 mukaan siten, että kaksi ensimmäistä mittausta otetaan vastakkaisilta puolilta 13 mm:n päästä ulkoreunasta. Seuraavat kaksi otetaan samalla tavoin, mutta 18 mm:n päästä ulkoreunasta ja 90 asteen kulmassa suhteessa ensimmäisiin mittauksiin. Mikäli kovuus mitataan teelmästä otetusta kovuuslaikasta, käytetään kuvan 4 muotoista jigia oikeiden mittauspisteiden määrittämiseksi. Kokeessa käytettävä kovuus on mittauspisteiden keski-arvo. (Heiskala 1995b, 1–2.)



Kuva 4. Kovuusmittauspisteiden sijainti (Heiskala 1995b, 2).

Saadun kovuuden ja teräslajin eli seostuksen perusteella lasketaan sorvauksessa käytettävä lastuamisnopeus ja -aika. Jokaista teräslajia ja sen kovuutta vastaa tietty kokeellisesti määritetty lastuamisnopeus. Kuvassa 5 on esitetty periaate, jolla saadaan kullekin teräslajille määritettyä kovuutta vastaava lastuamisnopeus.



Kuva 5. Tiettyä teräslajia vastaava esimerkkikuvaaja, jossa näkyy kovuuden ja lastuamisnopeuden korrelaatio (Anonen 2002, 2).

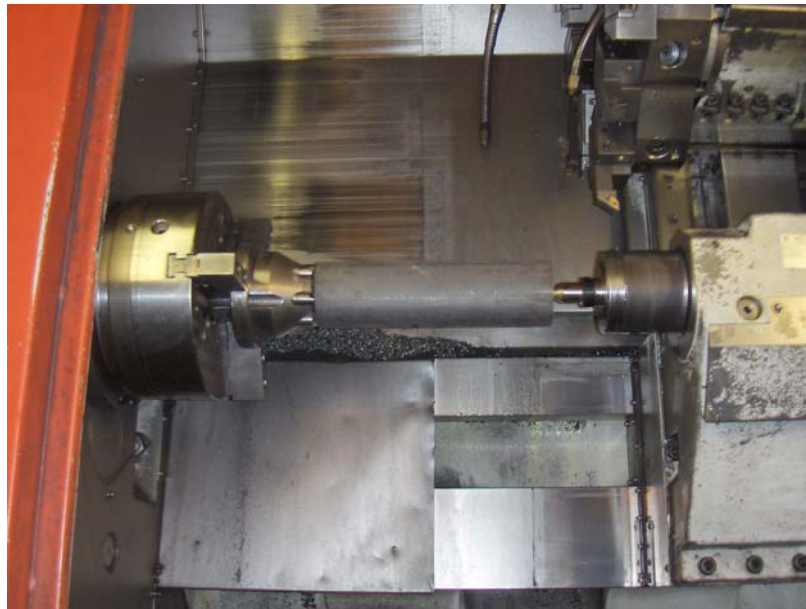
Kun tiedetään lastuamisnopeus ja poistettava ainemäärä 1600 cm^3 , pystytään laskemaan kokeen lastuamisaika yhtälön 1 avulla.

$$t_{\min} = \frac{V}{a \times f \times v_c} \quad (1)$$

Yhtälössä 1 $V [\text{cm}^3]$ on lastuttava materiaalitylavuus, $a [\text{mm}]$ on lastuamissyvyys (a-mitta), $f [\text{mm/rev}]$ on syöttö ja $v_c [\text{m/min}]$ on lastuamisnopeus (Anonen 2002, 2). Koska kokeessa sorvataan tietyllä kovuudella riippuvalla lastuamisnopeudella v_c ja materiaalityluvun V (1600 cm^3), lastuamissyvyyden a (2,5 mm) sekä syötön f (0,4 mm/r) ollessa vakioita kaikissa kokeissa, saadaan lastuamisaika t laskettua yhtälöstä (Anonen 2002, 2)

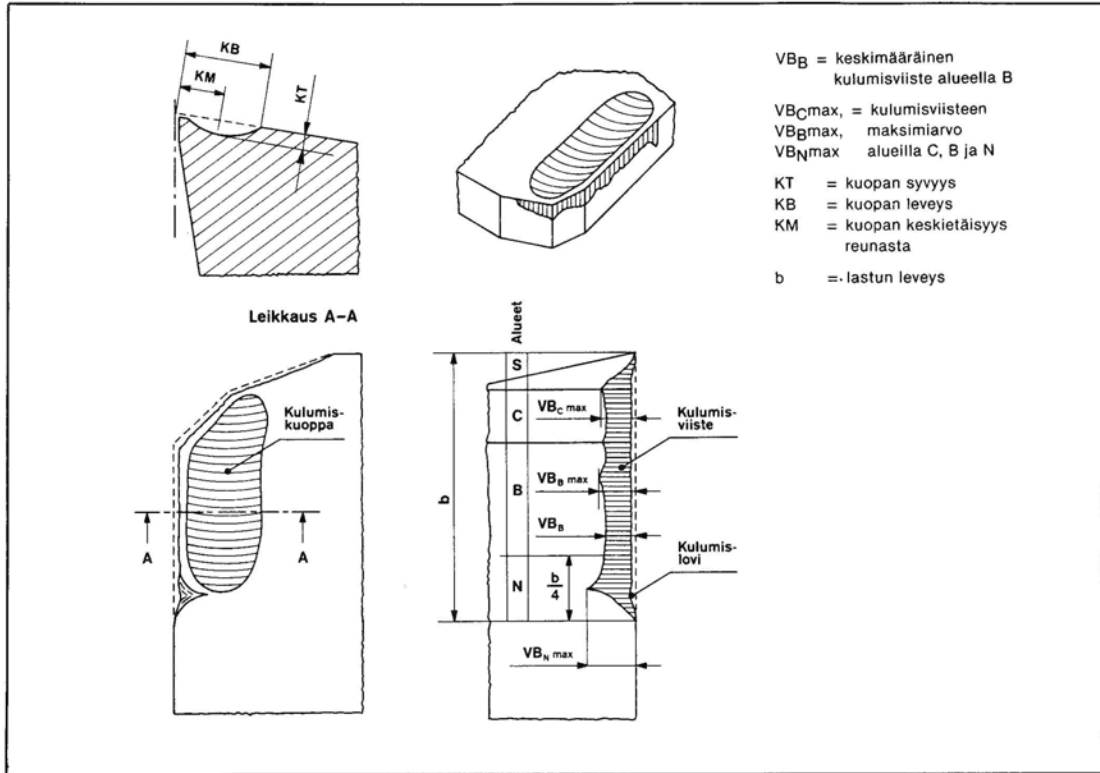
$$t_{\min} = \frac{1600 \text{ cm}^3}{2,5 \text{ mm} \times 0,4 \text{ mm} / r \times v} \quad (2)$$

Edellä esitettyjä arvoja ei tarvitse laskea manuaalisesti, koska lastuamisnopeuden ja -ajan määrittämiseksi on Ovako kehittänyt tietokoneohjelman, joka perustuu regressioanalyysiin. Tietokoneohjelma laskee automaattisesti lastuamisnopeuden, kun siihen syötetään teräslaji ja kovuus. Kaavan 2 avulla tietokoneohjelma laskee lastuamisajan. Saatu lastuamisnopeus ja koekappaleen mitat syötetään CNC-sorvin ohjaimelle. Tämän jälkeen valitaan CNC-ohjelma, tehdään koekappaleen päänoikaisusorvaus ja suoritetaan puhdistussorvaus. Näiden työvaiheiden jälkeen tehdään lastuttavuuskoe. Kun määritetyllä lastuamisnopeudella ja vakiona pysyvillä lastuamisparametreilla on sorvattu ainemäärä $1600 \text{ cm}^3 = 12,5\text{kg}$, sorvausosuus päättyy. Koe lopetetaan myös silloin, jos teräpala rikkoutuu tai koekappaleen halkaisija ja pituus saavuttavat suhteen 1:7 ($D:L$). Näin vältetään ongelmallisilta värähtelyiltä. (Heiskala 1995b, 3.) Kuvassa 6 on koekappale valmiina lastuttavuuskoetta varten.



Kuva 6. Pyörötanko valmiina laatuosaston sorvissa pään oikaisua, puhdistussorvausta ja lastuttavuuskoetta varten.

Sorvausosuuden jälkeen mitataan työkalumikroskoopilla ja mittakellolla terän kulumisen standardin ISO 3685:1993 mukaisesti. Kuvassa 7 on selitetty teräpalan kulumiseen liittyvien lyhenteiden merkitys ja esitetty teräpalan kohdat, joista kuoppa- ja keskimääräinen viistekuluminen mitataan.



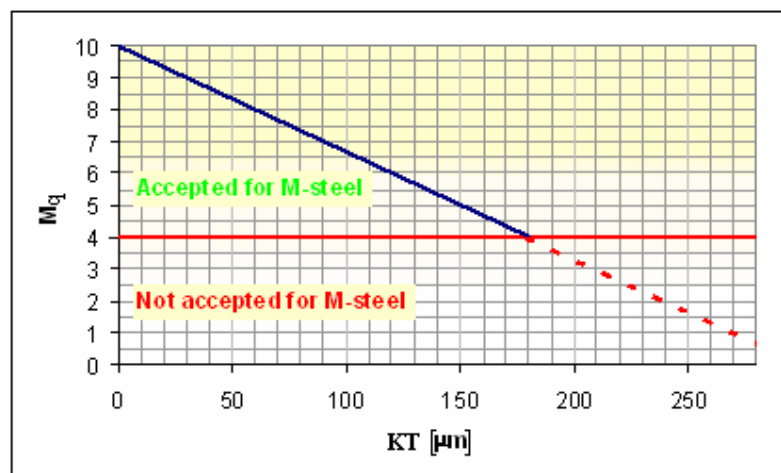
Kuva 7. Terän kuoppa- ja viistekulumisen mittaaminen standardin ISO 3685:1993 mukaan (ISO 3685:1993, 12).

Mittauslaitteisto on esitetty kuvassa 8. Mitattavia suureita ovat kuoppa- ja keskimääräinen viistekuluminen; lisäksi arvioidaan terän kunto silmämääräisesti. Tietokoneohjelmaan syötetään saadut kuoppa- ja viistekulumisen arvot, jotka tietokone sijoittaa kokeellisesti laadittuun kaavaan ja määrittää näin koekappaleelle ja täten sulatuserälle M_q -arvosanan asteikolla 0–10. (Heiskala 1995b, 3)



Kuva 8. Tietokone lastuamisnopeuden ja -ajan määrittämistä sekä koetulosten syöttämistä varten. Lisäksi kuvassa on työkalumikroskooppi viistekulumisen mittaamiseksi ja mittakello kuoppakulumisen mittaamista varten.

Indeksin arvolla 10 kuoppakuluminen on 0 μm , ja vastaavasti indeksin arvolla 0 on kuoppakuluminen 300 μm . Raja-arvona toimii indeksin arvo 4, joka vastaa 180 μm :n kuoppakulumista. Koe katsotaan hyväksytyksi eli teräs täyttää M-käsittelyn laatuvaatimukset, jos indeksin arvo on 4 tai suurempi. (Anonen 2002, 4.) M_q -arvosana voidaan katsoa myös kuvaajasta, joka on kuvassa 9.



Kuva 9. M_q -arvosanan määräytyminen kuoppakulumisen funktiona (Anonen 2002, 3).
Suomennot: Accepted for M-steel = Hyväksytään M-teräkseksi, Not accepted for M-steel = Ei hyväksyttyä M-teräkseksi

Rintapinnan kuoppakulumisen lisäksi täytyy tarkastella viistekulumista, jonka raja-arvona on 0,30 mm. Koe hylätään, mikäli keskimääräinen viistekuluminen on suurempi kuin 0,30 mm. Jos koe katsotaan hylätyksi, sulatus siirtyy poikkeamakäsittelyyn ja kehitysosasto tekee päätökset mahdollisista jatkotoimenpiteistä. Kokeen aikana kirjataan pöytäkirjaan saatujen koetulosten lisäksi kaikki poikkeukselliset ilmiöt, kuten ääni, pinnan laatu, värähtelyt ja lastun murto. Pöytäkirja taltioidaan sähköisessä muodossa Ovakon Imatran tehtaan laatujärjestelmään. Näin pystytään varmistamaan, että asiakkaalle lähetettävä teräs täyttää laatuvaatimukset. Lisäksi laatujärjestelmä mahdollistaa koetulosten tilastollisen tarkastelun. (Anonen 2002, 3–4; Heiskala 1995b, 3.)

4.1.3 Kokeessa käytettävät sorvit

Koe suoritetaan Ovakon Imatran terästehtaan Laatuosaston NC-sorvilla tai erityistapauksissa Kehitysosaston NC-sorvilla. Sorvit soveltuvat mekaanisiltaan ja dynaamisilta ominaisuuksiltaan tutkimukseen ja laadunvalvontaan. (Anonen 2002, 4.) Sorvien tekniset tiedot ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. Sorvien ominaisuudet (Peltola 2006, 2).

Sorvin tyyppi	Suurin karan kierrosnopeus [1/min]	Nimellinen karateho [kW]	Kärkiväli [mm]	Suurin sorvaushalkaisija johteiden päällä [mm]
Laatuosasto: MAX MÜLDER MD 7	3600	50		
Kehitysosasto: WEIPERT WNC 500S	4000	33,5	1000	380

4.1.4 Terä, teränpidin ja lastuamisgeometria

Kokeessa käytetään Seco Tools Ab:n valmistamaa pinnoittamatonta kääntöterää SNUN 120408 S1F P10, joka on erittäin herkkä M-teräksen laatuominaisuuksien suhteen. Taulukossa 3 on esitetty terän tyyppi ja kokeen lastuamisgeometriatiedot, jotka pysyvät kokeesta riippumatta aina vakioina.

Taulukko 3. Kokeessa käytettävä terä, teränpidin ja lastuamisgeometria (Anonen 2002, 4).

Terä	Seco Tools Ab SNUN 120408 S1F
Teränpidin	CSRNL 2525M 12-IC
Asetuskulma χ	75 °
Rintakulma γ	- 6°
Päästökulma α	6 °
Viettökulma λ	6 °
Kärkikulma ϵ	90 °
Lastuamisneste	Ei käytetä

5 OVAKON LASTUTTAVUUSPIKAKOKEEN ONGELMAT

M_q -kokeen luotettavuus on erittäin riippuvainen käytettävästä teräpalasta. Koe on alun perin laadittu toimimaan SECON teräpalalle SNUN 120408 S1F P10. Kyseinen teräpala on havaittu hyvin herkäksi M-teräksen laatuvaihteluille. M-teräksen laadun ollessa hyvä teräpala kestää erittäin pitkään, kun taas laadun ollessa huono teräpala kuluu nopeasti. Siksi se soveltuu hyvin Ovakon kehittämään lastuttavuuskokeeseen. Jos kokeessa käytetään jotain muuta teräpalaa, jonka ominaisuudet poikkeavat nykyisin käytettävästä, ovat tulokset epäluotettavia. Suurimpana syynä tähän on eri terien erilainen rintapinnan kuoppakuluminen. Ominaisuuksiltaan vastaavaa teräpalaa on yritetty etsiä jo usean vuoden ajan, mutta ominaisuuksiltaan täysin vastaavaa teräpalaa ei ole löytynyt. Joillekin teräpaloille on suoritettu myös koesorvauksia ominaisuuksien selvittämiseksi. Esimerkiksi vuonna 2005 seuraavat pinnoittamattomat teräpalat ovat olleet tarkastelun alaisina: Toshiba Tungaloy SNMN 120408 NS540, Toshiba Tungaloy SNMN 120408 TH10 ja Toshiba Tungaloy SNMN 120408 UX30. (Nykänen 2003, 1–2.) Koesorvauksien tulokset on esitetty kuvassa 10.

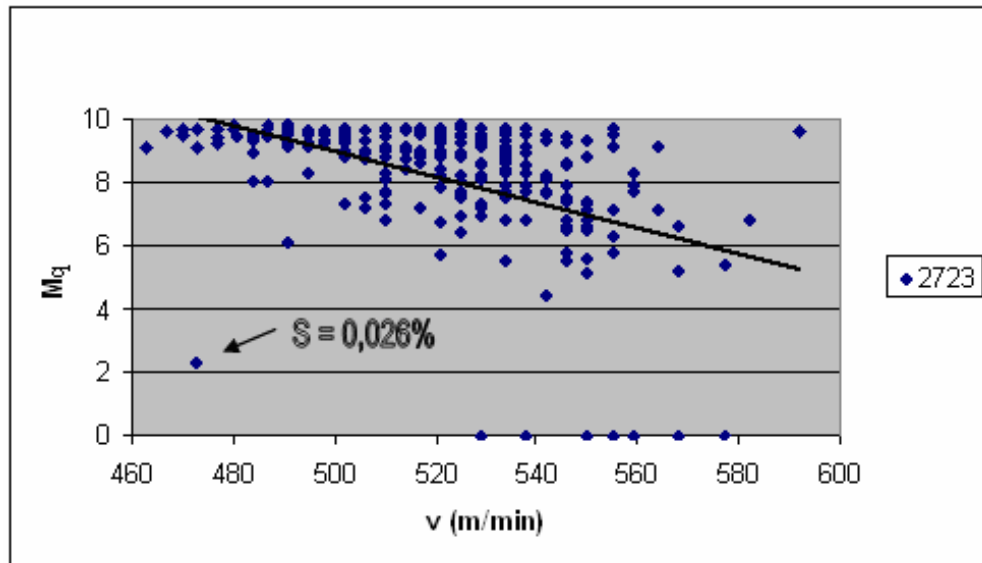
Materiaali		Lastuamisparametrit								
Laji 4548 sulatus 264050 kovuus 186f		Syöttö f		0.4 mm/r		lastuamisnopeus a			2.5 mm	
Seco SNUN 120408 S1F						Terän laatu		P10		
Nopeus m/min	Aika min	VBB	VBBmax	KT μm	VBC	SB mm	Fz N	Lastutyyppi	Indeksi	
380	2	0.06	0.07		0.07		766	6.2	356	
400	2	0.08	0.09		0.09		770	6.2	351	
420	2	0.09	0.09	40	0.1		759	6.2	357	
440	2	0.1	0.1	58	0.11		731	6.2	361	
500	2	0.12	0.12	120	0.17		702	6.2	368	
Kommentit: Ohutta kalvoa.										
Toshiba Tungaloy SNMN 120408 NS540						Terän laatu		NS540		
Nopeus m/min	Aika min	VBB	VBBmax	KT μm	VBC	SB mm	Fz N	Lastutyyppi	Indeksi	
400	2	0.05	0.05		0.05		693	6.2	377	
420	2	0.06	0.06		0.06		696	6.2	378	
500	2	0.06	0.06		0.06		671	6.2	388	
520	2	0.06	0.07		0.09		0.12	694	6.2	384
540	2	0.06	0.07		0.09		0.17	696	6.2	389
550	2	0.06	0.07		0.09		0.38	677	6.2	401
580	2	0.07	0.08		0.11		0.23	684	6.2	414
600	2	0.07	0.08		0.23		0.78	694	6.2	415
Kommentit: Erittäin ohutta kalvoa. Suuremmalla nopeudella paksumin.										
Toshiba Tungaloy SNMN 120408 TH10						Terän laatu		TH10		
Nopeus m/min	Aika min	VBB	VBBmax	KT μm	VBC	SB mm	Fz N	Lastutyyppi	Indeksi	
300	0.2	0.16	0.17	305	0.17		1234	6.2	316	
200	1.1	0.16	0.17	210	0.15		1465	6.2	402	
Kommentit: Tälle riitti tää.										
Toshiba Tungaloy SNMN 120408 UX30						Terän laatu		UX30		
Nopeus m/min	Aika min	VBB	VBBmax	KT μm	VBC	SB mm	Fz N	Lastutyyppi	Indeksi	
300	0.77	0.05	0.06	175	0.06		1103	6.2	333	
200	2	0.04	0.04	55	0.04		1004	6.2	449	
Kommentit: Tässä tää.										

Kuva 10. M_q -kokeessa käytettävän Secon teräpalan vertailu Toshiba teräpaloihin (Nykänen 2003, 1).

Kuten lastuamisnopeudesta ja kulumisarvoista (KT ja VB_B) nähdään, Toshiba teräpalat ovat ominaisuuksiltaan täysin erilaiset. Toshiba kovimpaan teräpalaan (Toshiba Tungaloy SNMN 120408 NS540) ei muodostu kuoppakulumista (KT) suurillakaan lastuamisnopeuden arvoilla, kun taas pehmeisiin (Toshiba Tungaloy SNMN 120408 TH10 ja Toshiba Tungaloy SNMN 120408 UX30) muodostuu kuoppakulumista jo pienillä lastuamisnopeuden arvoillakin. Terien erilaisten kulumisominaisuuksien takia, ilman kokeeseen tehtäviä muutoksia, testatut Toshiba terät eivät sovellu nykyisiin käytettävään lastuttavuuskokeeseen. (Nykänen 2003, 1–2)

Nykyisen kokeen toinen merkittävä ongelma on, että tulokset eivät aina ole täysin luotettavia. Saadut hylätyt nollatulokset ja heikommat M_q -arvot painottuvat suurille lastuamisnopeuksille. Tämä tarkoittaa sitä, että saman teräslajin sisällä olevat pehmeämmät

koeotokset saavat keskimäärin heikompia tuloksia. Tästä voidaan päätellä, että kovuuden ja lastuamisvoimien välinen korrelaatio ei aivan pidä paikkaansa. (Juvonen 2008) Kuvassa 11 on kuvaaja, josta nähdään huonojen koe tulosten painottuminen suurille lastuamisnopeuksille.

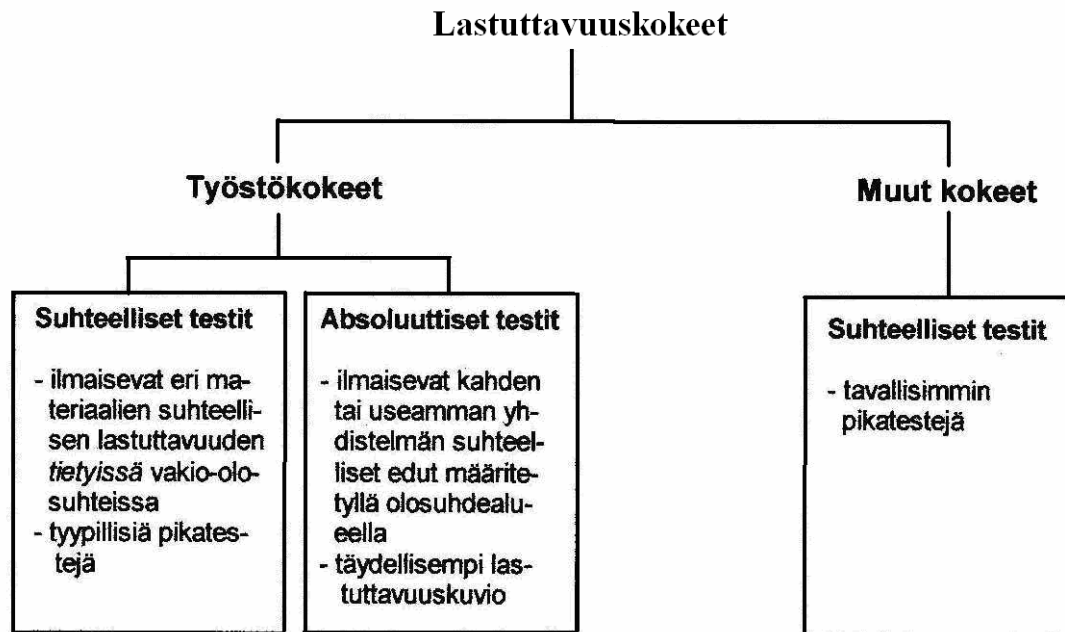


Kuva 11. Huonojen ja hylättyjen M_q -arvojen painottuminen suurille lastuamisnopeuksille eli tietyn teräslajin pehmeämmille koeotoksille (Juvonen 2008).

6 LASTUAMISKOKEET YLEISESTI

Tässä työssä lastuamiskoe-termi on yleisnimitys kokeille, joissa lastutaan, kun taas kokeita, joilla testataan materiaalin lastuttavuutta, kutsutaan lastuttavuuskokeiksi. Kun tutkimuksen kohteena on esimerkiksi lastuava terä tai taloudellisten lastuamisarvojen määrittäminen, puhutaan yleisesti lastuamiskokeista. Lastuttavuus- ja lastuamiskokeita tekevät materiaalin ja terän valmistajat sekä lastuamalla tuotteita valmistavat yritykset. Nykyaikaisessa rajoitetusti miehityssä tai miehittämättömässä tuotannossa koneaika on kallista, ja siksi järjestelmän häiriötön toiminta on tärkeää. Tämä asettaa haasteita terän valmistajalle kehittää kestävämpiä ja paremmin lastuvia teräpaloja (lastun murto). Materiaalin valmistajalla haasteena on valmistaa hyvin lastuttavaa terästä, joka lastuttaessa kuluttaa terää vähän sekä saavuttaa hyvän mittatarkkuuden ja pinnan laadun. Lisäksi lastun muodon olisi oltava prosessin kannalta edullinen. Itse yrityksen tehtäväksi jää säätää lastuamisprosessi siten, että tavoiteltu laatu saavutetaan tehokkailla lastuamisparametreilla. Lastuamisnopeuden ja syötön lisääminen lisää myös terän kulumista. Siitä syystä terän vaihtajat on optimoitava sellaiselle tasolle, jolla terän vaihdosta johtuvia seisokkeja ei ole liian usein eikä niin harvoin, että terärikot katkaisisivat tuotannon. Näin lastuaminen saadaan yritykselle kustannustehokkaaksi. (Andersson 1997b, 162–166; Heiskala 1995, 1–2.)

Lastuttavuuskokeet voidaan jakaa kahteen ryhmään: lastuaviin kokeisiin eli työstökokeisiin ja kokeisiin, joihin ei sisälly lastuamista. Lastuavat koemenettelyt voidaan vielä jakaa absoluuttisiin ja suhteellisiin kokeisiin. (Andersson 1997c, 135.) Kokeiden jaottelu on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Lastuttavuuskokeiden jaottelu (Andersson 1997c, 136).

6.1 Lastuamattomat kokeet

Muihin kokeisiin jaoteltavat lastuamattomat kokeet ovat suhteellisia kokeita. Muuttuja, johon koe yleensä perustuu, on jokin materiaalin mekaaninen ominaisuus, kuten kovuus. Toisena arviointiperusteena voidaan käyttää materiaalin kemiallisen koostumuksen tai fysikaalisten ominaisuuksien vertailua. Tarkkailun kohteena on erityisesti lastuttavuutta haittaavien aineosien, kuten hiilen (C), typen (N) ja alumiinin (Al) määrät ja mikrorakenne. Materiaalin valmistajan kannalta kuitenkin tärkeää on tarkkailla myös lastuttavuutta parantavien aineosien, kuten kalsiumin (Ca) ja rikin (S) määriä. (Andersson 1997c, 135–136.)

6.2 Lastuavat kokeet

Lastuavissa kokeissa käytettäviä työstöprosesseja ovat yleensä poraus, sorvaus ja jyrshintä. Lastuavissa kokeissa on yleensä ongelmana muuttujien ja parametrien suuri määrä, joka kasvattaa koetuloksien virhemarginaalia. Yleensä kokeissa mitataan yhtä tai muutamaa muuttujaa ja muut muuttujat ja parametrit pidetään vakioina. Lastuttavuuskokeiden

ongelmana on näiden muiden muuttujien ja parametrien vakiona pitäminen. Sen vuoksi koetuloksissa esiintyy usein suurta hajontaa.

Eri muuttujien ja parametrien vakioimiseksi on laadittu standardeja, joista tunnetuin on terän kestoajan mittaamiseen perustuva sorvauskoestandardi ISO 3685:1977, joka on uudistettu vuonna 1993 standardiksi ISO 3685:1993. Tässä standardissa määritellään esimerkiksi sorvauksen terägeometrialle, lastuamisparametreille ja koeolosuhteille suositus- ja raja-arvoja (ISO 3685:1993, 1). Myös jyräkokokeelle on laadittu omat standardinsa, joita ovat ISO 8688-1:1989 ja ISO 8688-2:1989.

Tässä luvussa käsitellään työstökokeisiin perustuvia lastuttavuuden vertailukokeita yleisellä tasolla, eli seuraavat kokeet ovat sovellettavissa kaikkiin työstökokeisiin niin poraukseen, sorvaukseen kuin jyräntäänkin. (Šalák et al. 2005, 126) Näiden kokeiden erikoissovelluksia käsitellään tarkemmin luvussa 7.

6.2.1 Kesto aika- ja kesto volyymikoe

Kesto aikakokeeseen perustuva lastuamiskoe on yleisin lastuttavuutta mittaava koetyyppi. Siinä materiaalia lastutaan vakio parametrein hallituissa oloissa, kunnes terä on kulunut asetettuun kulumiskriteeriin. Kun asetettu kulumiskriteeri on saavutettu, mitataan kulunut lastuamisaika. Lastuamisaikaa käytetään vertailuarvona eri materiaalien lastuttavuuden vertailussa. Tavallisesti kulumiskriteerinä käytetään viistekulumisen keskimääräistä arvoa $VB_B = 0,3$ mm ja/tai ennalta määritettyä kuoppakulumisen arvoa. Myös terän täydellistä rikkoutumista voidaan käyttää kesto ikäkriteerinä. Materiaali, jolla terä kestää pisimpään, on lastuttavuudeltaan parasta. Mitattavaksi muuttujaksi voidaan valita myös lastuamisnopeus, jolloin mitataan, millä lastuamisnopeudella voidaan lastuta, jotta terän kesto ikä olisi esimerkiksi 15 min tai 20 min. Tunnetuin tällainen menetelmä on Taylorin kesto aikasuoran määrittäminen, jota käsitellään tarkemmin sorvauskokeiden yhteydessä. (Stephenson & Agapiou 2005, 578; Andersson 1997c, 136.) Kesto volyymikoe on kesto aikakokeen kaltainen, mutta siinä mitataan lastuamisajan sijaan irrotettua ainetilavuutta (Andersson 1997c, 136).

6.2.2 Lastuamisvoima-, momentti- ja työstötehokoe

Lastuamisvoimia mittaamalla pystytään arvioimaan terän kulumista. Lastuamisvoimien nousu on verrannollinen terän kulumiseen. Terän rikkoutuminen pystytään havaitsemaan lastuamisvoimien jyrkkänä nousuna. Myös eri materiaalien lastuttavuuden vertailu on mahdollista, koska paremmin lastuttavalla materiaalilla lastuamisvoimat ovat pienemmät ja tällöin myös teräpala kestää pidempään. Voidaankin todeta, että lastuttavuus on sitä parempi, mitä pienempiä ovat lastuamisvoimat. Päälastuamisvoima on lastuamisvoimista yleisimmin tarkkailtu voima. Voimien mittauksesta tekee ongelmallisen se, että eri terästen välillä on varsin pienet erot ominaislastuamisvoimissa. Pienten voimaerojen mittaamiseksi on käytettävä tarkkoja analysointilaitteita ja hajonnan takia riittävää otantaa. Tyypillisesti lastuamisvoimiin perustuvassa työstökokeessa käytetään joko venymäliuskoihin tai pietsosähköiseen ilmiöön perustuvia voima-antureita. (Sukkela 2000, 28–30; Stephenson & Agapiou 2005, 579)

Venymäliuska-antureiden toiminta perustuu venymän aiheuttamaan sähkövastuksen muutokseen. Venymäliuskoina käytetään metallikalvoa, -lankaa tai puolijohdetta. Lämpölaajenemisesta johtuvia virheitä voidaan kompensoida kytkemällä venymäliuskat Wheastonin-siltakytkentään. Venymäliuskat kiinnitetään liimaamalla ne mittauskohtaan. Hyvin soveltuvia mittauskohteita ovat yleensä joko teränpidin tai työstökoneen karan tai syöttöruuvien laakeroinnit. Teränpitimeen sijoitettaessa etuna on se, että pystytään mittaamaan kaikki kolme voimakomponenttia mahdollisimman tarkasti. (Auvinen 1994, 40–43; Flinkkilä 1987, 3–5.) Luvussa 6.2.4 esitetyssä kuvassa 14 on ympyröity kuva, jossa on teränpitimiin asennetut venymäliuskat.

Pietsosähköiset voima-anturit perustuvat heksagonaalisen kvartsikiteen varaustilan muutokseen ulkoisen voiman vaikutuksesta. Toisin kuin venymäliuska-anturit pietsosähköinen anturi on herkempi lämpötilan vaihteluille. Siitä syystä signaali täytyy nollata ennen jokaista mittausta. Pietsosähköinen anturi vaatii vain hyvin pieniä voiman muutoksia, ja se reagoi muutoksiin nopeasti. Ongelmana kuitenkin on pitkään samana pysyvä voima, jota ei luotettavasti pystytä mittaamaan. Pietsosähköiset anturit voidaan kiinnittää joko teränpitimiin, työkalurevolverin kiinnitykseen tai korkean herkkyyden

vuoksi koneen muuhun osaan, jossa tapahtuu lastuamisvoimista aiheutuvia muodonmuutoksia. (Auvinen 1994, 41–45; Flinkkilä 1987, 3–5.)

Nykyiset työstökoneet on varustettu sähköisillä servomoottoreilla, joiden kuluttaman virran perusteella voidaan arvioida moottorin tarvitsemaa vääntömomenttia ja myös lastuamisvoimia. Työstökoneen moottorin kuluttama virta on verrannollinen sen antamaan vääntömomenttiin ja näin myös työkappaleeseen ja terään vaikuttaviin voimiin. Lastuttavuutta voidaan siis arvioida myös momenttia mittaamalla. Momentin mittaamiseksi käytetyimmät virranmittausanturit ovat sivuvastus ja Hall-ilmiöön perustuvat anturit. (Sukkela 2000, 28–31.)

Työstökoneen tehon tarvetta voidaan mitata yksinkertaisimmillaan koneeseen menevästä virtajohdosta ampeerimittarilla. Tämä teho vastaa koneen tarvitsemaa tehoa. Itse lastuamisprosessin tehontarve on erilainen, mikä johtuu koneen hyötysuhteen aiheuttamasta häviöstä. Tietyissä olosuhteissa kuitenkin pystytään mittaamaan materiaalin lastuttavuutta siten, että tehontarve on suurempi huonommin lastuttavilla materiaaleilla kuin paremmin lastuttavilla. Kokeen virhemahdollisuus on kuitenkin varsin suuri. Työstökoneen tarvitseman tehon on katsottu olevan yhteydessä työstövoimiin ja -lämpötilaan. (Bakerjian, Drozda, Petro, Veilleux & Wick 1998, 43.)

Jos verrataan lastuamisvoimien ja -tehon mittaamiseen perustuvia kokeita terän kestoikään perustuvaan kokeeseen, ovat etuina nopeus ja materiaalisäästöt, koska työstöjä ei välttämättä tarvitse tehdä terän rikkoutumiseen asti. Monesti kuitenkin mitataan rinnan lastuamisvoimia ja -tehoa sekä terän kulumista. (Andersson 1997c, 137.)

6.2.3 Lastuamislämpötilakoe

Lastuamislämpötilaa mitataan yleensä teräpalasta. Lastuttavuus on sitä parempi, mitä alhaisempi on terän lämpötila. Suurin syy tähän on se, että monet terien kulumismekanismeista ovat lämpötilariippuvaisia, eli kuluminen kiihtyy terän lämmitessä. Terän kulumisen seurauksena työkappaleen pinnan lämpötila kasvaa. Tätä ilmiötä voidaan käyttää hyödyksi terän kulumisen ja sitä kautta materiaalin lastuttavuuden arvioimisessa

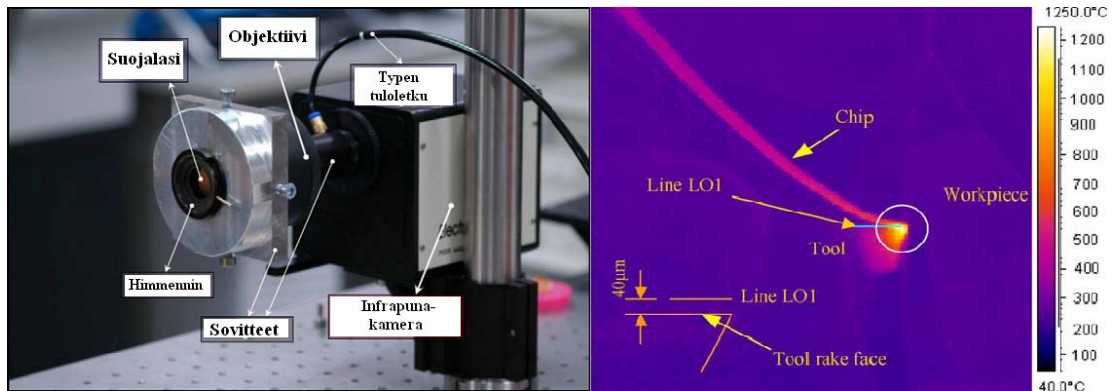
(Dinc, Lazogl & Serpenguzel 2008, 148). Lastuamislämpötilakokeen on katsottu korreloivan työstövoima-, teho- ja kestoajakokeiden kanssa. Työkappaleen lämpötilan noustessa kappale pehmenee, jolloin lastuamisvoimat laskevat (Abukhshim, Mativenga & Sheikh 2005, 782). Kuitenkin korkeassa lämpötilassa terän kulumisen kiihtyy, minkä seurauksena lastuamisvoimat kasvavat enemmän kuin on materiaalin pehmenemisestä johtuva voimien lasku. Lastuamislämpötilakokeen etuna on lastuamisvoima- ja tehokokeiden tapaan nopeus ja materiaalisäästö. Lastuamislämpötilakoe soveltuu parhaiten sorvauskokeeseen, koska siinä teräpala ei pyöri ja lämpötilan mittausta voidaan tehdä yksinkertaisella anturoinnilla. Lämpötilaa voidaan mitata myös lämpökameralla, jolloin pystytään arvioimaan myös helposti koekappaleen lämpötilaa työstön aikana ja työstön jälkeen. (Stephenson & Agapiou 2005, 579; Andersson 1997c, 137.)

Lastuamisprosessissa lämpötilojen mittausta ja lämpötilan jakautumisen ennustaminen on haastavaa. Syitä tähän ovat leikkausvyöhykkeen kapeus, lastujen irtoaminen ja lastuamisprosessin luonne, jossa teräpala ja työkappale ovat toistensa suhteen liikkuvassa jatkuvassa kontaktissa. Lastuamislämpötilojen mittaamiseksi on kaksi yleisesti käytettyä menetelmää: termopari ja lämpökamera (infrapunakamera). (Abukhshim et al. 2005, 783.)

Termoparit ovat halvan hinnan ja helppokäyttöisyyden vuoksi hyvin laajalti käytetty lastuamislämpötilan mittaamiskeino. Termoparin toimintaperiaate perustuu kahden eri metallin liitoksessa syntyvään jännitteeseen, joka on lämpötilasta riippuvainen. Lastuavassa työstössä termopari muodostuu eri materiaalia olevien teräpalan ja työkappaleen välille (Abukhshim et al. 2005, 785.). Teräpalan ja työkappaleen välinen liitos on niin sanottu kuumaliitos eli liitos, jonka lämpötilaa mitataan. Termopari mittaa aina lämpötilaeroa mitattavassa kohteessa eli kuumaliitoksen ja mittarin luona olevan kylmäliitoksen välillä. Lämpötilaeroista riippuva jännite analysoidaan mittarissa ja lämpötila saadaan määritettyä. Termopari on rakenteeltaan yksinkertainen ja pieni, ja sillä pystytään mittaamaan suuria lämpötiloja. Huonoina puolina sen sijaan on, että anturilta saadaan ainoastaan lämpötilan keskiarvoja, teräpalan ja työkappaleen on johdettava sähköä; lisäksi termopari vaatii tarkan kalibroinnin (Abukhshim et al. 2005, 785).

Lämpökamerat eli tarkemmin infrapunakamerat mittaavat pinnan lämpötilaa sen lähettämän lämpöenergian perusteella. Infrapunäteilyn mittaamiseen perustuvan

menetelmän etuina ovat nopeus ja koskemattomuus. Lämpötilaa siis pystytään mittaamaan kuvaamalla kohdetta tietyn etäisyyden päästä koskettamatta mitattavaa kohdetta. Menetelmällä pystytään mittaamaan alhaisempia lämpötiloja kuin termoparilla. Lisäksi menetelmällä voidaan mitata samalla esimerkiksi työkappaleen lämpötilaa, mikäli siihen on tarvetta. Menetelmän heikkoutena on se, että pinnan tarkka säteilykyky pitää pystyä määrittämään, mikäli halutaan tehdä tarkkoja mittauksia. Lastuavassa työstössä määrittäminen on ongelmallista, koska säteilykyky riippuu materiaalin lämpötilasta ja pinnankarheudesta. Lisäksi termopariin verrattuna huonona puolena on korkeampi hinta. (Abukhshim et al. 2005, 785–786; Dinc et al. 2008, 148). Kuvassa 13 on esitetty lastuamislämpötilan mittaamiseen soveltuva infrapunakamera lisälaitteineen ja kuva lastuamisprosessista.



Kuva 13. Lastuamislämpötilan mittaamiseen soveltuva infrapunakamera ja sillä kuvattu lastuamisprosessi. Kameralla otetun kuvan avulla pystytään mittaamaan lastuamislämpötiloja (Abukhshim et al. 2005, 787; Dinc et al. 2008, 150). Suomennokset: Chip = lastu, Workpiece = työkappale, Tool = terä, Tool rake face = terän rintapinta, Line Lo1 = suora LO1

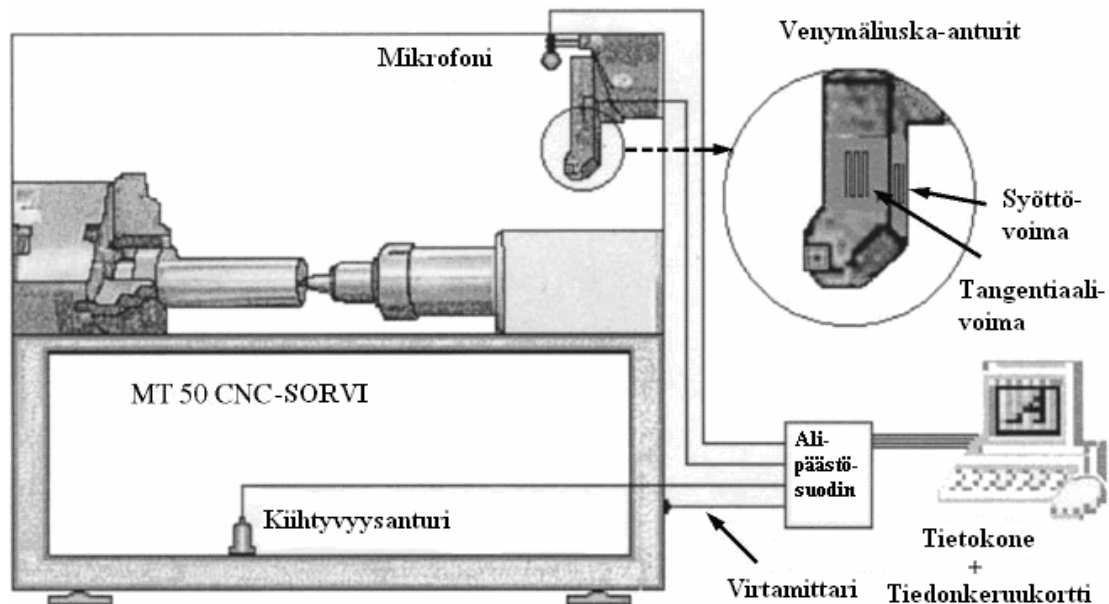
Kuvassa 13 esitettyä suoraa LO1:tä käytetään, kun analysoidaan terän rintapinnan lämpötiloja. Suoran LO1:n ja tietokoneohjelman avulla pystytään määrittämään rintapinnan lämpötilat ja niiden jakautuminen. (Abukhshim et al. 2005, 788)

6.2.4 Lastuamisvärähtelykoe

Kaikissa työstöprosesseissa syntyy värähtelyjä. Lastuamisvärähtelyjä mittaamalla saatavan signaalin muutoksen perusteella pystytään arvioimaan terän kulumista. On havaittu, että

terällä, joka on kulunut enemmän, saatu signaalin taajuus on paljon suurempi. Tutkimuksissa on selvinnyt, että lastuamisvärähtelyjen mittaaminen soveltuu hyvin etenkin teräpalan viistekulumisen mittaamiseen (Lim 1993, 26). Värähtelyt voivat lisääntyä myös muista syistä, joten korrelaatio värähtelyjen ja terän kulumisen välillä ei ole mitenkään yksiselitteinen. Parhaita tuloksia terän kulumisesta saadaan, kun värähtelyjä mitataan syöttösuunnassa. (Flinkkilä 1987, 8–9.)

Lastuamisvärähtelyjä voidaan mitata työstökoneen rungosta tai ilmasta. Rungosta tapahtuva mittaus voidaan tehdä joko pietsosähköisillä kiihtyvyyssantureilla tai herkällä voima-antureilla, joita ovat esimerkiksi venymäliuska-anturit ja pietsosähköiset voima-anturit. Ilmasta värähtelyt (äänet) voidaan mitata mikrofonilla. Ääni sisältää paljon informaatiota työstötapahtumasta. Kokeneet koneenkäyttäjät pystyvät tekemään äänen perusteella havaintoja lastuamisprosessista ja säätämään sen mukaan lastuamisparametreja. Jos lastuamisprosessin ääniä pystytään tulkitsemaan elektronisesti, voidaan saada ihmisen veroinen valvontajärjestelmä. Ongelmana kuitenkin on erottaa äänestä merkitykselliset tekijät. (Flinkkilä 1987, 8–9.) Kuvassa 14 on esitetty sorviin asennettu laitteisto, jolla voidaan mitata lastuamisvärähtelyjä, -ääntä, -voimia ja -virtaa.



Kuva 14. Periaatekuva sorviin asennetusta laitteistosta, jolla voidaan arvioida terän kulumista lastuamisvärähtelyjen, -äänen, -voimien ja sorvin tarvitseman virran perusteella (Baker, Reuben, Silva & Wilcow 2000, 289).

6.2.5 Akustiseen emissioon perustuva koe

Työstöprosessissa vapautuvaa korkeataajuisia värähtelyä voidaan mitata myös akustisella emissiolla, joka on metallin sisäisen rakenteen muokkautumisesta aiheutuvaa jännitysenergian erittäin nopeaa vapautumista. Tällaisia materiaalin sisäisiä muokkautumisia ovat dislokaatioiden liike, raerajojen liukuminen, kahdentuminen ja vakanssien yhdistyminen. (Flinkkilä 1987, 8–9.)

Lastuamisprosessissa akustisen emissioon taajuus riippuu niiden syntymekanismeista, joita ovat

- materiaalin plastinen muovautuminen ja murtuminen primaarissa liukuvyöhykkeessä
- lastun hankautuminen terän rintapintaa vasten (kitka)
- uuden pinnan hankautuminen terän päästöpintaa vasten (kitka)
- lastun katkeaminen
- työkalun murtuminen (Xiaoli 2001, 158).

Värähtelyjen mittaamisessa AE on tehokkaimpia keinoja mitata terän kulumista. Suurimpana etuna on, että AE-signaalin taajuus on paljon suurempi kuin työstökoneesta ja ympäristöstä syntyvä. AE soveltuu hyvin terän kulumisen mittaamiseen, koska signaali kasvaa terän kuluessa. On havaittu, että taajuusalueella 300–1000 kHz työkalun murtuminen aiheuttaa voimakkainta värähtelyä. Normaalisti lastuamisesta aiheutuva värähtely on matalataajuisempaa, joten suodattamalla alle 300 kHz taajuinen värähtely pystytään terän kulumisen ja terärikko havaitsemaan. (Xiaoli 2001, 157–159.)

AE:n mittaamiseen käytetään pietsosähköisiä antureita. Antureiden paikalla on vaikutus saadun signaalin voimakkuuteen. Anturi tulisi sijoittaa siten, että signaali ei kulkisi mekaanisen liitoksen läpi ja anturin pitäisi olla myös mahdollisimman lähellä työstötapahtumaa, koska signaali heikkenee etäisyyden kasvaessa. (Flinkkilä 1987, 9–10.)

6.2.6 Pinnankarheus- ja mittatarkkuuskoe

Materiaalien lastuttavuutta voidaan mitata saavutettavia pinnan laatuja vertailemalla. Koekappaleita työstetään samoilla parametreilla hallituissa olosuhteissa ja lopuksi mitataan pinnan laatu. Lastuttavuus on sitä parempi mitä pienempi on saavutettu pinnankarheus. Sorvaus- ja jyrshintäköe soveltuvat pinnankarheudenmittauskokeeksi paremmin kuin porauskoe, koska pinnan laatu on helposti mitattavissa kappaleen pinnasta. Porauskoeksessa joudutaan kappale halkaisemaan kahtia reiän kohdalta, minkä jälkeen pinnankarheus vasta pystytään mittaamaan. (Šalak et al. 2005, 133.)

Mittatarkkuuskokeessa verrataan saavutettua lopullista mittaa suunniteltuun mittaan. Lastuttavuus on sitä parempi, mitä lähemmäksi päästään suunniteltua mittaa. Pinnankarheus- ja mittatarkkuuskokeet soveltuvat hyvin eri materiaaliluokkien vertailuun eli esimerkiksi siihen, kun vertaillaan puun ja muovien pinnankarheutta keskenään. Pinnankarheuden mittaamiseksi on nykyisin olemassa tarkkoja mittareita, joten myös eri metallien lastuttavuuden vertailu onnistuu luotettavasti pinnankarheus- ja mittatarkkuustesteillä. (Stephenson & Agapiou 2005, 579; Andersson 1997c, 137.)

6.2.7 Lastun muotoon ja murtoon perustuva koe

Lyhyttä lastua muodostavat materiaalit ovat paremmin lastuttavia kuin materiaalit, jotka muodostavat katkeamatonta lastua. Katkeamaton lastu kietoutuu sorvattavan kappaleen ympärille ja estää siten hyvän pinnanlaadun synnyn. Pahimmassa tapauksessa katkeamaton lastu kuluttaa terän nopeasti käyttökelvottomaksi. Vääränmalliset lastut ovat haitallisia etenkin viimeistelykoneistuksessa, jolloin ne voivat helposti jäädä kiinni työstettävään kappaleeseen, rikkoa sen pinnan ja heikentää siten työkappaleen lopullista pinnalaatua. Täten lastun murto onkin tärkeä lastuttavuuden mittari.

Pehmeitä materiaaleja työstettäessä on vaikeaa havaita muutoksia eri muuttujissa, esimerkiksi terän kulumisessa, joten lastuttavuuden arvioiminen on vaikeaa. Siksi lastun muotoon ja murtoon perustuva koe soveltuu etenkin pehmeille materiaaleille, kuten alumiinille. (Stephenson & Agapiou 2005, 579; Heino 2000, 24.)

6.3 Terän kulumisen mittaamiseen käytettävät menetelmät

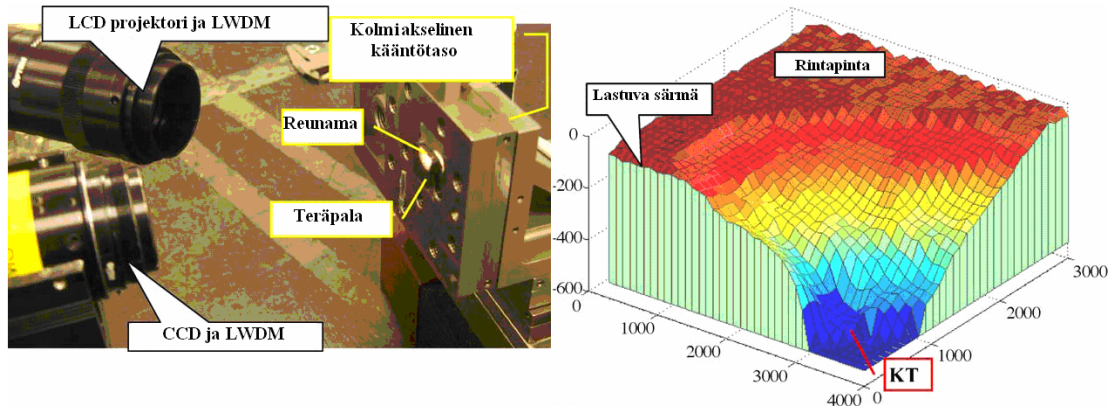
Aiemmin on käsitelty terän kulumista epäsuorasti mittaavia menetelmiä. Kuitenkin varsin monet lastuttavuutta mittaavat kokeet perustuvat teräpalan viiste- ja kuoppakulumisen mittaamiseen eli terän kulumisen mittaamiseen suorasti (Lim 1993, 25). Kuoppa- ja viistekulumista voidaan mitata manuaalisesti muun muassa työkalu- ja yleismikroskoopilla sekä tuhannesosamittakellolla vertaamalla kulunutta viistettä tai kuoppaa alkuperäiseen pintaan. Tällaiset menetelmät ovat varsin hitaita, ja lisäksi teräpala on irrotettava teränpitimestä jokaisella mittauskerralla. Teräpalan kulumisen elektroniseen mittaamiseen on lukuisia menetelmiä, kuten vaihesiirtomenetelmä, automaattisen fokusoinnin menetelmä, stereonäkö, interferometri ja laserskannaukseen perustuva mittausmenetelmä. Osa näistä menetelmistä on vielä laboratorioasteella, ja niiden tarkkuus tai jokin muu ominaisuus rajoittaa niiden käyttöä teräpalan kuluneisuuden mittaamisessa. Tästä syystä edellä mainituista käsitellään kahta eri menetelmää, joista molemmista on markkinoilla kaupallinen versio. (Andersson 1997d, 141)

6.3.1 Vaihesiirtomenetelmä

Kuoppakulumisen tarkka mittaaminen vaati paljon mittauslaitteistolta. 3D-kuvaan perustuvilla laitteilla on kuitenkin päästy hyviin tuloksiin. Yksi tällainen menetelmä on vaihesiirtomenetelmä (phase shifting method). Vaihesiirtomenetelmällä pystytään mallintamaan 3D-kuva teräpalasta tarkasti ja automaattisesti. Menetelmän etuna on, että se ei ole herkkä kontrastivaihteluille eikä epäpuhtauksille eikä se vaadi kameran eikä säteen (valaistuksen) tarkkaa kohdistamista. (Wang, Wong & Hong 2005, 164.)

Laitteisto koostuu pitkän matkan mikroskoopeilla (long working distance microscope = LWDM) varustetuista LCD-projektorista ja CCD-kamerasta sekä LCD-ohjaimesta ja tietokoneohjelmasta, jolla muodostetaan kameran ottamasta kuvasta 3D-malli. LCD-ohjaimella muodostetaan viivoitettu kuvio vaihesiirron arvoilla 0 , $\pi/2$ ja $3\pi/2$ ja se heijastetaan LCD-projektorilla LCDM:n läpi teräpalan rintapinnalle. Rintapinnalle muodostunut harmaasävyinen viivoitettu kuva kuvataan CCD-kameralla, minkä jälkeen kuvan intensiteetin avulla muodostetaan teräpalasta 3D-malli tietokoneen avulla. Lopulta

3D-mallista on mahdollista mitata kuoppakulumisen suuruus. (Wang et al. 2005, 165–166) Kuvassa 15 on vaihesiirtomenetelmässä käytettävä laitteisto ja laitteistolla teräpalasta muodostettu 3D-malli.



Kuva 15. Vaihesiirtomenetelmän laitteisto ja teräpalasta muodostettu 3D-malli, josta viiste- ja kuoppakuluminen pystytään mittaamaan (Wang et al. 166).

Markkinoilla on saatavilla vaihesiirtoon perustuva saksalaisen GF Messtechnik GmbH:n valmistama MicroCAD-mittalaite. MicroCAD on erittäin tarkka ja täysin automaattinen järjestelmä. Siitä syystä se on hinnaltaan varsin kallis. (Lachouk 2008, 30–33.)

6.3.2 Laserskannaukseen perustuva menetelmä

Markkinoilla on myös Sick Oy:n Ranger-kamerajärjestelmä, joka perustuu laserskannaukseen. Laserskanneri lähettää laserjuovaa mitattavaan kohteeseen, jota kamera kuvaa. Saadusta juovasta lasketaan Y- ja Z-koordinaatit. Liikuttamalla kohdetta tai kameraa pystytään muodostamaan kohteesta 3D-kuva. Sopivalla ohjelmistolla pystytään mittaamaan teräpalan kuoppakulumisen. Ranger-kamera soveltuu teollisuusolosuhteisiin, ja lisäksi se on nopea. (Sick 2008.)

6.4 Lastuttavuuskokeen suunnittelu

Lastuttavuuskokeiden tekemisestä on laadittu kansainvälisiä (ISO 3685:1993 ja ASTM E618-81 (2001)) standardeja. Näissä standardeissa on annettu ohjeita ja määritetty hyvin yksityiskohtaisesti muun muassa vakioidut lastuamisarvot, terän geometria ja teräaine. Tämä tekee testeistä varsin joustamattomia. Standardin mukaiset kokeet tähtäävät hyvin usein Taylorin $\log v_c$ - $\log t$ -koordinaatistossa kulkevan kestoajakuoran kulmakertoimen määrittämiseen. Lähtötietojen hajonta voi kuitenkin aiheuttaa suurta epävarmuutta Taylorin eksponenttiyhtälön tuloksiin. Lisäksi kestoajakuorien määrittämiseen menee paljon kallista aikaa ja materiaalia. (Andersson 1997c, 139–142; Stephenson & Agapiou 2005, 578.)

Liitteeseen III on koottu lastuttavuuskoetta laadittaessa huomioon otettavia asioita. Liitteen pääkohtia ja olemassa olevia standardeja voidaan käyttää pohjana, kun lastuttavuuskoetta aletaan suunnitella. Pääkohtien ja standardien tavoitteena on saada kokeista mahdollisimman vakioituja. Näin saadaan virhemahdollisuudet minimoitua ja kokeen tuloksista mahdollisimman luotettavia. Kun lisäksi noudatetaan laadittuja ohjeita ja menettelytapoja, saadaan kokeen toistettavuus riittävälle tasolle. (Andersson 1997c, 139–142; Stephenson & Agapiou 2005, 578.)

7 ERILAISET LASTUAMISKOESOVELLUKSET

Tässä luvussa käsitellään erilaisia materiaalin lastuttavuutta mittaavia poraus-, sorvaus- ja jyrsintäkokeita. Osa käsiteltävistä lastuttavuuskokeista on edellä mainittujen kokeiden sovelluksia.

7.1 Porauskoee ja sen sovellukset

Suurin syy porauskoeeen käyttöön on sen nopeus ja toistettavuus. Porauskoeeen muita etuja ovat sen suhteellisen edullinen hinta ja se, että on mahdollista testata hyvin erikokoisia ja -muotoisia kappaleita. Porauskoee on lisäksi paljon herkempi muihin lastuaviin kokeisiin verrattuna havaitsemaan pieniä eroja materiaalin mikrorakenteessa. Porauskoeeet voidaan luokitella kahden eri näkökulman perusteella (Šalakov et al. 2005, 127):

1. määritellä teknisesti ja taloudellisesti optimaalinen reikien määrä siten, että reiän syvyys ja halkaisija sekä pinnan laatu pysyvät vaaditulla tasolla
2. eri materiaalien porattavuuden vertailu hallituissa olosuhteissa

Porauskoeeessa voidaan lastuttavuutta mitata

- porattujen reikien määrällä ennen poran rikkoutumista (poran kestoajalla)
- reiän poraamiseen kuluvalla ajalla
- poistetun materiaalin määrällä
- erilaisilla tuottavuuden mittareilla (Šalakov et al. 2005, 127–128).

Porauskoeeissa yleisimmin tutkittuja työstöparametreja ovat

- lastuamisnopeus (poran pyörimisnopeus ja poran halkaisija)
- työstökoneen tarvitsema momentti
- syötön nopeus ja syöttövoima (Šalakov et al. 2005, 128).

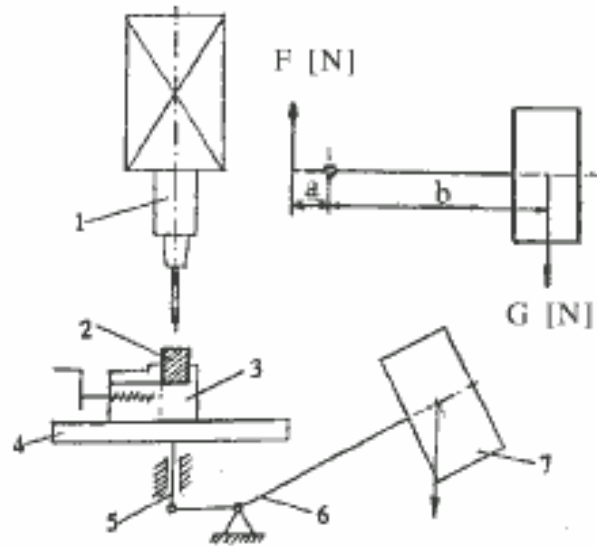
Yleensä eri kokeissa muut muuttujat, kuten teräaine ja terän geometria, pidetään vakioina. Suositeltavaa on, että lastuamisnestettä ei käytetä sen aiheuttaman virhemahdollisuuden vuoksi. (Šalák et al. 2005, 127.)

7.1.1 Terän kestoajaan perustuva koe

Terän kestoajaan perustuva koe on helppo toteuttaa, mutta se on silti hyvin toistettavissa ja luotettava. Tämä koemuoto myös mahdollistaa helposti tuottavuus- ja kustannusanalyysien teon, koska mitattavana suurena voi olla ennen poran rikkoutumista porattujen reikien määrä. Toinen terän kestoajan määrittämiseksi käytettävä mittausmenetelmä on Taylorin kestoajasuoran määrittäminen tutkittavalle terälle tai materiaalille. Taylorin kestoajasuoralla ilmaistaan, kuinka suuri voi olla lastuamisnopeus, jotta terä kestää esimerkiksi 15 tai 20 minuuttia. Myös tätä kautta pystytään laskemaan, kuinka monta reikää voidaan porata yhdellä poralla tai vaihtoterällä. Lopputuloksena voidaan laskea €/reikä-arvo. (Šalák et al. 2005, 128–129.)

7.1.2 Vakioporausvoimaan perustuva koe

Vakioporausvoimaan perustuva yksinkertainen koejärjestelmä on esitetty kuvassa 16. Kuten kuvasta havaitaan, koejärjestelmässä vakiovoima välitetään vipuvarsi-painokombinaatiolla kääntöpöytään. Syötön suuruus määräytyy materiaalin lastuttavuuden ja terän kulumisnopeuden mukaan. Tässä koejärjestelmässä syöttövoima on valittu siten, että syöttö lakkaa itsestään, kun terä saavuttaa viistekulumisen arvon $\sim 0,2$ mm. Syötön lakkaaminen johtuu siitä, että vakiosyöttövoima ei enää terän kulumisen vuoksi riitä porausprosessia jatkamaan. Lastuttavuuden mittaamiseksi käytettäviä muuttujia voivat olla esimerkiksi porattujen reikien määrä tai yhden reiän syvyys, koska aina ei välttämättä pystytä poraamaan edes yhtä reikää poranterän nopean kulumisen vuoksi. Muut muuttujat kuten poran pyörimisnopeus, poran halkaisija ja jäähditys (lastuamisnesteen käyttö), pidetään kokeen aikana niin vakioina kuin mahdollista. (Šalák et al. 2005, 129–130.)



Kuva 16. Periaatepiirros vakioituun syöttövoimaan perustuvasta porauskoejärjestelmästä 1 – Istukka 2 – Koekappale 3 – Puristin 4 – Kääntöpöytä 5 – Kääntöpöydän pystyvarsi 6 – Vipuvarsi 7 – Paino (Šalák et al. 2005, 129).

Esimerkin mukaisesta vakiorausvoimaan perustuvasta yksinkertaisesta kokeesta voidaan nykytekniikalla tehdä modernimpi sovellus, jolloin ei tarvita vipuvarsi-paino-systeemiä vaan vakiovoima välitetään esimerkiksi servomoottoreilla tai hydraulisyötöllä.

Edellä mainittujen lisäksi on myös L_{100} porauskoe, jossa mitataan poran tunkeumaa sadan kierroksen aikana vakiorauspaineella (Mäenpää 2000, 21).

7.2 Sorvauskoe ja sen sovellukset

Sorvaamalla tehtävä lastuttavuuskoe on ehkä yleisin lastuttavuuden mittaamiseen käytettävä menetelmä, koska erilaisia sovelluksia on useita. Yhden jaottelun mukaan sorvauskokeet voidaan jakaa sorvaustavan mukaan kahteen eri ryhmään: pitkittäiseen sorvaukseen ja otsapinnan sorvaukseen. Tässä luvussa on katsaus sorvaamalla tehtäviin lastuttavuuskokeisiin. (Šalák et al. 2005, 131.)

7.2.1 Standardin ISO 3685:1993 mukainen terän kestoaikakoe

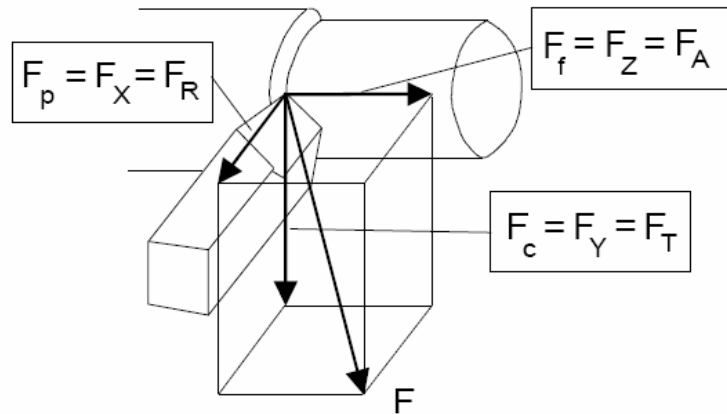
Standardi ISO 3685 käsittelee metalleille sorvaamalla tehtävää lastuttavuuskoetta. Standardin mukaan tehtävässä kokeessa määritetään Taylorin vT -suora eli keskimääräinen terän kestoaikakuvaaja. Terän kestoaikasuora ei erottele terän kulumismuotoja, mutta se yhdistää eri kulumismuodot logaritmiseen koordinaatistoon kuvaajaksi, jonka y-akselilla on terän kesto aika T ja x-akselilla lastuamisnopeus v . Kuvaajasta pystytään siis näkemään käytettyä lastuamisnopeutta vastaava terän kesto aika silloin, kun muut lastuamisparametrit pysyvät vakioina. Taylorin yhtälö esitetään yleensä muodossa

$$vT^{\alpha} = C, \quad (3)$$

jossa T on terän kesto aika valitun kulumiskriteerin mukaan, C on vakio ja α on Taylorin eksponentti eli kestoaikasuoran kulmakerroin. Jotta Taylorin kestoaikasuora saadaan luotettavasti määritetyksi, on standardissa annettu ohjeet käytettävästä koemateriaalista, terän tyypistä ja materiaalista, lastuamisnesteestä, lastuamisolosuhteista (parametrit) sekä kokeen suoritusstavasta ja tulosten arvioinnista. Standardissa annettuja ohjearvoja noudatetaan sen mukaan, mitä tutkitaan. Jos esimerkiksi tutkitaan teräpalan lastuamisominaisuuksia, voidaan noudattaa standardissa annettuja ohjeita käytettävästä koemateriaalista. Jos sen sijaan tutkitaan tietyn materiaalin lastuttavuutta, annettuja ohjeita voidaan noudattaa teräpalaan sovellettuna. (ISO 3685:1993, 1-18.)

7.2.2 Lastuamisvoimiin ja -momenttiin perustuva sorvauskoe

Lastuamisvoimat voidaan esittää suorakulmaisessa koordinaatistossa sorvin akseleiden mukaan käyttämällä alaindeksejä x , y ja z , mutta myös merkintätapaa, joka tulee englannin kielestä, käytetään. Merkintätavat on esitetty kuvassa 17.

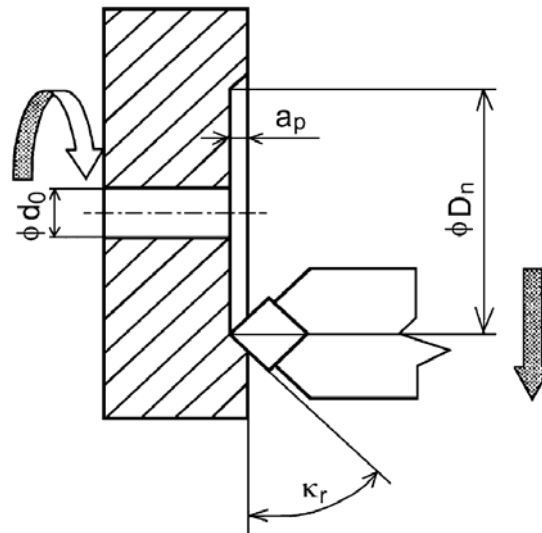


Kuva 17. Sorvauksessa esiintyvät lastuamisvoimat: F_c päälastuamisvoima (cutting force), F_f syöttövoima (feed force) ja F_p passiivivoima (passive force) (Vihinen 1993, 5).

Työkalun kuluessa lastuamisvoimat kasvavat. Lastuamisvoimien kasvuun vaikuttavat myös lastuamisarvot, terän geometria, työstöradat, lastuamisneste sekä työkalun ja koekappaleen materiaalit. Yleensä lastuamiskokeissa mitataan vain päälastuamisvoimaa. Kokeellisesti on todistettu, että päälastuamisvoiman komponentit kasvavat lineaarisesti viistekulumisen kasvaessa ja pienenevät lineaarisesti kuoppakulumisen kasvaessa. Lastuamissyvyyttä ja syöttöä lisättäessä päälastuamisvoima ja syöttövoima kasvavat. Sen sijaan lastuamisnopeutta lisättäessä lastuamisvoimat ensin kasvavat ja lastuamisnopeuden saavuttaessa tietyn rajan lastuamisvoimat alkavat pienetä. Syöttövoima on useimmilla terän geometrioilla työstövoimista tehokkain mittari viistekulumisen mittaamiseen. (Auvinen 1994, 40–41.)

7.2.3 Tasosorvauskoe

Pikaterästyökalulla sorvataan suurihalkaisijaisen koekappaleen otsapintaa siten, että syöttö ja lastuamissyvyys pysyvät vakioina. Lastuttavuuden mittarina pidetään terän nirkon kulkemaa matkaa työkalun keskiöstä säteen suunnassa kohtaan, jossa terä on kulunut loppuun. Terän kulkemaa matkaa verrataan standardimateriaalilla tehdyn vastaavan kokeen tulokseen. Vertailukohta voidaan määrittää myös samalla teräslajilla (seostuksella), jolloin voidaan vertailla teräksen lastuttavuutta saman teräslajin sisällä. (Andersson 1997c, 137; Šalák et al. 2005, 131–132) Periaatekuva tasosorvauskokeesta (short time tool life test at face turning) on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Periaatekuva tasosorvauskokeesta (Šalak et al. 2005, 132).

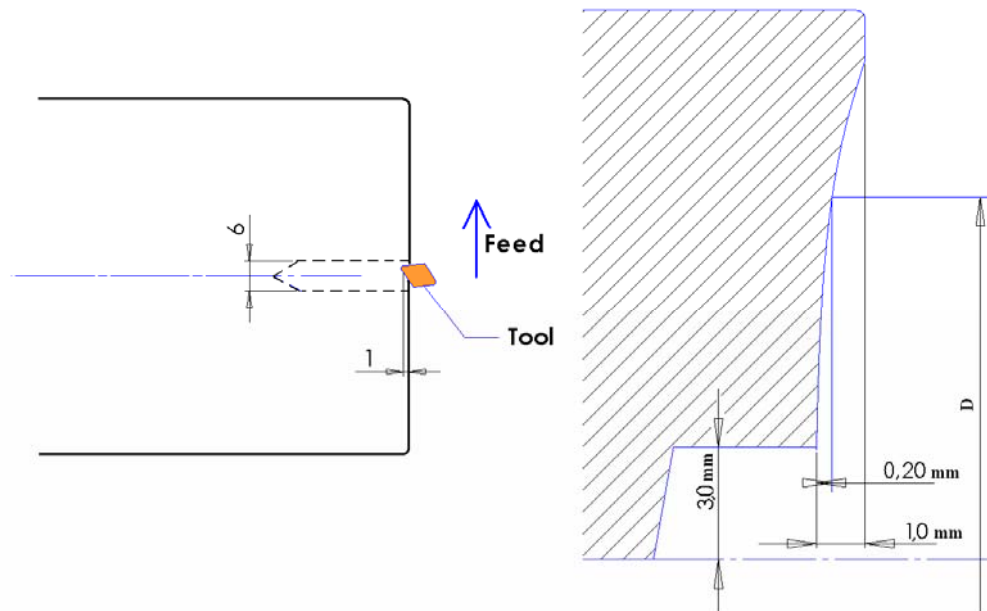
Tasosorvauskokeella on muitakin sovelluksia. Terän nirkon kulkeman matkan sijaan voidaan mitata työstöaikaa terän loppuun kulumiseen asti tai poistetun materiaalin määrä. Lisäksi on mahdollista määrittää terän kestoajalle ja lastuamisnopeudelle Taylorin kestoaikasuorat. Jos käytettävä koesorvi (sorvinistukka liian pieni) tai -materiaalin halkaisija (halkaisija liian pieni) asettavat rajoituksia, pystytään koetta soveltamaan siten, että sorvataan edestakaisin useampi lastu terän loppuun kulumiseen saakka. (Šalak et al. 2005, 132.)

Tällaisten koemuotojen etuna voidaan pitää sitä, että lastuamisnopeus vaihtelee koko ajan sorvaushalkaisijan mukaan, jolloin teräpalaan saadaan kohdistettua koko ajan vaihtelevat olosuhteet (Šalak et al. 2005, 132).

7.2.4 MATHON-RENAULT-koe

MATHON-RENAULT-kokeen kehittämissvaiheessa tavoitteeksi oli asetettu nopeus, toistettavuus ja luotettavuus. Syynä kokeen kehittämiseen olivat autoteollisuuden sarjavalmisteisissa tuotteissa havaitut lastuttavuusongelmat, joiden ratkaisemiseksi oli päätetty kehittää lastuttavuuskoe kriittisten koneistusosa-alueiden tutkimiseksi.

Koe suoritetaan otsapintasorvauksena. Koekappaleen keskiössä on halkaisijaltaan 6 mm:n reikä, jonka sisään asetetaan pikaterästeräpala 1 mm:n syvyyteen siten, että se ei kosketa koekappaletta (kuva 17). Kokeessa käytetään vakiopyörimisnopeutta (rpm) ja syöttöä (0,9017 mm/r). Lastuamisnopeus on sitä suurempi, mitä lähempänä nirkko on lastuttavan kappaleen ulkoreunaa, jolloin myös terän kulumisnopeus kasvaa. Koe päättyy, kun teräpala on kulunut niin paljon, ettei se enää lastua koekappaleen otsapintaa tai nirkko saavuttaa kappaleen ulkopinnan. Kokeen jälkeen mitataan kuvan 19 mukaisesti kappaleen keskiöstä kohta, jossa teräpala on kulunut 0,2 mm (viistekuluminen). Kappale, joka saavuttaa kauimpana keskiöstä viistekulumisen arvon 0,2 mm, on parasta lastuttavuudeltaan. (Bäcker, Haik & Luciani 1978, 239–243.)



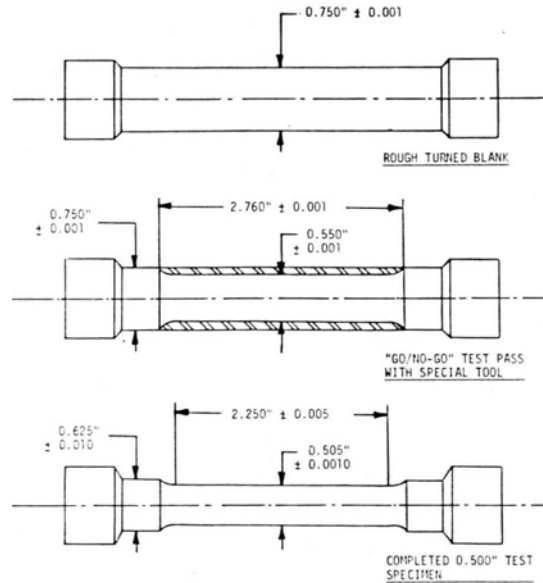
Kuva 19. Vasemmalla kokeen lähtötilanne ja oikealla koekappaleen otsapinta, kun teräpalan viistepinta on kulunut 0,20 mm. Halkaisijan D suuruus kertoo, kuinka hyvää materiaali on lastuttavuudeltaan (Bäcker, Haik & Luciani 1978, 241).

7.2.5 LaSalle-koe

LaSalle-koe on amerikkalaisen LaSallen terästehtaan kehittämä sorvaamalla tehtävä lastuttavuuspikakoe. Koe kehitettiin korvaamaan Taylorin kestoaikasuoraan perustuva koe, koska Taylorin koe on aikaa vievä ja suuren koemateriaalitarpeen vuoksi kallis. LaSallen

kokeen etuna ovat nopeus, luotettavuus ja hyvä toistettavuus. LaSalle-koe perustuu terän rikkoutumiseen, ja kokeen lopputuloksena on ”Go” tai ”No-go” tulos. ”Go” -tuloksella koe on hyväksytty, ja tällöin materiaali täyttää siihen kohdistetut vaatimukset. Kokeen etuna on myös, että lopputuloksena saadaan vetokoesauva, jota voidaan käyttää myöhemmin myös materiaalin lujuusominaisuuksien testaamiseen. (Keane & Wannell 1984, 13–14.)

LaSalle-kokeessa käytetään vakiolastuamisnopeutta, -syvyyttä ja syöttöä. Syötön suuruus riippuu testattavasta materiaalista. Koe tehdään neljässä vaiheessa, ja lopputuloksena on ASTM-standardin A370-77 mukainen halkaisijaltaan 12,8 mm:n (0,505 tuuman) vetokoesauva (kuva 20). Ensimmäisessä vaiheessa rouhintasorvataan kovametalliterällä halkaisijaltaan 25,4 mm:n (1 tuuman) aihio. Toisessa vaiheessa halkaisija sorvataan 19 mm:n (0,750 tuumaan). Kolmas vaihe on lastuttavuuskoevaihe, jossa koekappale sorvataan 12,8 mm:n halkaisijaan kokeeseen soveltuvalla hiiliterästeräpalalla. Jos teräpala rikkoutuu koevaiheen aikana, saa koe arvon ”No-go” eli koe on tällöin hylätty. Kokeessa tulisi käyttää sellaista syötön arvoa, että 0,0254 mm/r (0,001 ipr:n) lisäys syöttöön antaisi ”No-go” -arvon. Jokaiselle materiaaliladulle on siis oltava oma syötön raja-arvo, jota kokeessa käytetään. Jos teräpala ei kokeessa rikkoudu, saa koe arvon ”Go” eli hyväksytyn arvon. Tämän jälkeen tehdään vielä neljäs työvaihe, jossa suoritetaan viimeistelysorvaus kovametalliterällä. (Keane & Wannell 1984, 14–17.)



Kuva 20. LaSalle-kokeen ensimmäinen, toinen ja kolmas vaihe, jonka lopputuloksena on ASTM-standardin mukainen vetokoesauva (Keane & Wannell 1984, 14).

Taulukossa 4 on esitetty koetuloksia erilaisilla syötön arvoilla. Kuten taulukosta nähdään, kaikki kuusi satunnaisesti valittua koeotosta saa arvon ”Go” syötön arvolla 0,46 mm/r (0,018 ipr). Syötön arvolla 0,48 mm/r (0,019 ipr) saa muutama koeotos arvon ”No-go”. Sen sijaan syötön arvolla 0,51 mm/r (0,020 ipr) vain yksi koeotos läpäisee kiistatta kokeen. Kokeen voidaan siis havaita olevan herkkä materiaalin laatuvaihteluille. Tulosten perusteella lastuttavuuskokeeseen sopiva syötön arvo olisi 0,48–0,51 mm/r (0,019–0,020 ipr). (Keane & Wannell 1984, 14–17.)

Taulukko 4. LaSalle-kokeen ”Go/No-go” -tulokset (Keane & Wannell 1984, 17).

Sulatus	Kokeiden määrä	Syöttö mm/r [ipr]		
		0,46 [0,018]	0,48 [0,019]	0,51 [0,020]
		”Go/No-go”		
A	21	1/0	1/3	1/15
B	15	8/0	1/1	0/5
C	17	5/0	2/3	1/6
D	17	4/0	0/0	8/5
E	33	6/0	0/0	2/25
F	27	13/0	0/0	14/0

7.2.6 Jatkuvasti kasvavaan lastuamisnopeuteen perustuva koe

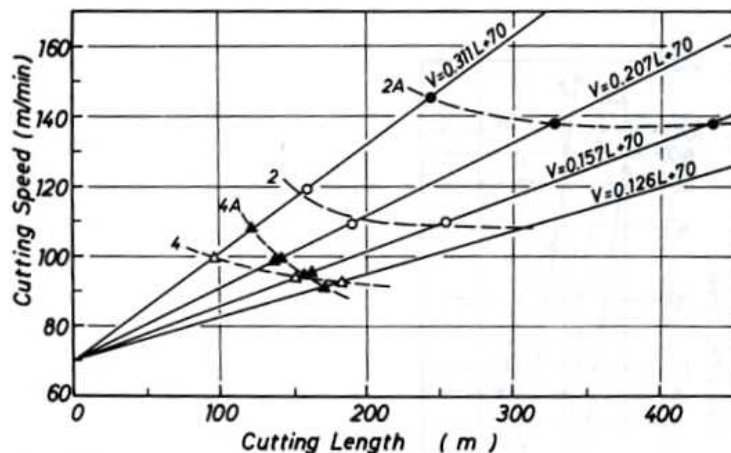
Taylorin kestoaikasuorien (vT -suorat) määrittäminen tavanomaisella standardi (ISO 3685:1993) -kokeella vie paljon aikaa ja materiaalia. Ajan ja materiaalin säästämiseksi on Japanissa kehitetty kasvavaan lastuamisnopeuteen perustuva koe (continuously accelerating cutting test), jolla saadaan määritettyä materiaalin lastuttavuus nopeammin ja pienemmällä materiaalin tarpeella. Kuten kokeen nimi kertoo, kasvaa työstöprosessissa lastuamisnopeus jatkuvasti noudattaen kaavaa

$$v = v_0 + AL, \quad (4)$$

jossa v_0 on lastuamisnopeus alussa ja A on lastuamisnopeuden kiihtyvyys. L kuvaa lastuttua matkaa ja se määritetään kaavalla

$$L = \frac{\pi D l}{f}, \quad (5)$$

jossa D on koekappaleen halkaisija, l on pitkittäin lastuttu pituus ja f on syöttö. Työstöprosessia jatketaan ennalta määritettyjen v_0 :n ja A :n arvoilla, kunnes pikaterästeräpala rikkoutuu. Lopputuloksena saadaan tietty lastuttu matka ja lastuamisnopeus. Koe toistetaan vähintään kolmella erisuuruusella kiihtyvyyden arvolla. Saatujen tulosten perusteella pystytään määrittämään lastuttu matka–lastuamisnopeus-kuvaajat (Lv -kuvaajat). (Hamahata, Ohno, Sakai & Takahashi 1978, 164–174.) Kuvassa 21 on esitetty lastuttu matka–lastuamisnopeus-kuvaajat neljälle eri materiaalille ja neljällä erilaisella kiihtyvyyden arvolla. Materiaalien kuvaajat on piirretty kuvaan katkoviivalla. Kuvaajista nähdään, että materiaali 2A on lastuttavuudeltaan parasta, koska se saa suurimmat lastuamisnopeuden ja lastutun matkan arvot. Vastaavasti materiaali 4 on lastuttavuudeltaan huonointa, koska se saa pienimmät arvot.



Kuva 21. Neljälle eri materiaalille 2 ja 2A (0,2 % C) sekä 4 ja 4A (0,4 % C) kasvavalla lastuamisnopeudella laaditut Lv-kuvaajat (Hamahata et al. 1978, 168). Suomennot: Cutting Speed = Lastuamisnopeus, Cutting Length = Lastuttu matka

7.2.7 Pistosorvauskoe

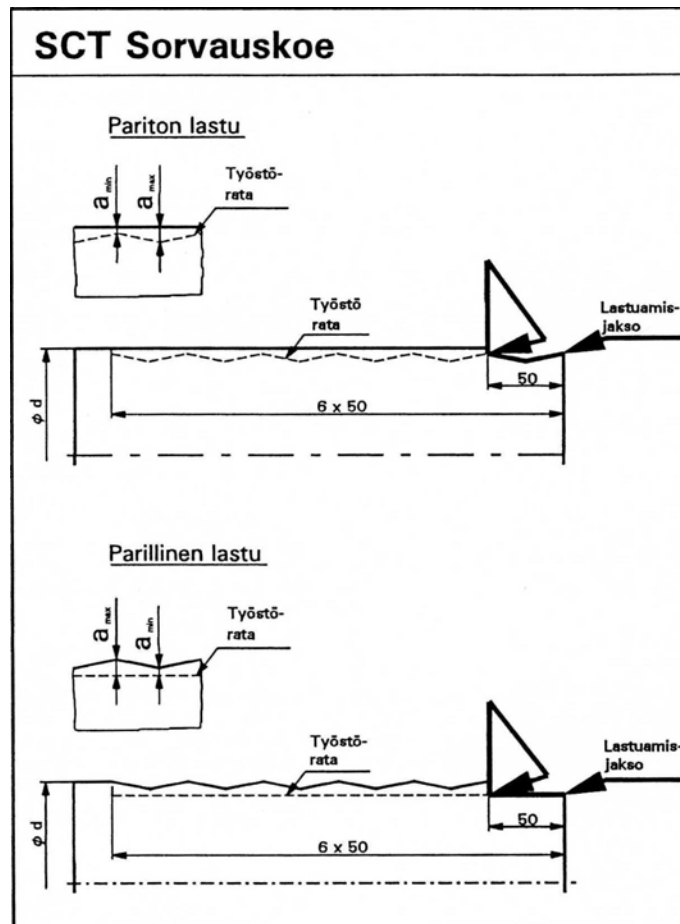
Kokeessa pistosorvataan tankoon samansyvyisiä uria terän rikkoutumiseen saakka. Lastuamisnopeus on pitänyt valita niin, että saadaan sorvattua 20–100 uraa ennen terän rikkoutumista. Yhden uran materiaalitylavuuden ja urien yhteislukumäärän perusteella lasketaan yhteensä pois sorvattu materiaalitylavuus V . Kokeen aikana lastuamisnopeus pidetään vakiona. Koe toistetaan vähintään kolmella eri lastuamisnopeuden arvolla. Saatujen arvoparien (v_0 , V) perusteella saadaan muodostettua lastuamisnopeus–lastuttu tilavuus-koordinaatistoon vertailusuora, jota käytetään eri materiaalien lastuttavuuden vertailussa. (Ripatti 1982, 32–33.)

7.2.8 SCT-koe

SCT-koe on sorvauskoe (short cycle turning), ja se on kehitetty standardin ISO 3685:1977 pohjalta. Kokeen tavoitteena on jäljitellä todellisia lastuamisolosuhteita eli aivan kuten käytännön osavalmistuksessa SCT-kokeessa lastuamissyvyys ja sorvausjaksojen pituudet vaihtelevat koko ajan. (Heiskala 1995a, 34)

SCT-koe noudattaa pääpiirteittäin ISO 3685:1977 standardia, mutta poikkeaa siitä kahdella eri tavalla (kuva 22) (Heiskala 1995a, 34–35):

1. Lastuaminen tapahtuu kuudessa 50 mm:n jaksossa siten, että terä nousee jaksojen välillä ylös koekappaleen pinnasta 10 sekunnin ajaksi.
2. Lastuamissyvyys vaihtelee jatkuvasti välillä $a_p = 0,5\text{--}3$ mm siten, että työstettävän pinnan ollessa suora terä aloittaa 50 mm:n jakson minimilastuamissyvyydellä ja saavuttaa maksimin keskellä jaksoa. Jälleen jakson lopussa lastuamissyvyys on minimissä. Näin kuuden jakson jälkeen koekappaleen pintaan on syntynyt sahalaita 300 mm:n matkalle. Seuraavalla lastulla sahalaita oikaistaan, jolloin lastuamissyvyys luonnollisesti vaihtelee koko ajan.



Kuva 22. SCT-kokeen periaate. Parittomalla lastulla lastutaan sahalaita ja parillisella lastulla pinta oikaistaan (Heiskala 1995a, 36).

SCT-kokeessa koekappaleen halkaisijan ja pituuden on oltava sama jokaisessa kokeessa, jotta lastuamisjaksojen työstöajat olisivat kestoiltaan samanpituiset. Aivan kuten standardin ISO 3685:1977 mukaan tehtävässä kokeessakin SCT-kokeessa määritetään vT -suora. Tämän vuoksi terät sorvataan rikkoutumiseen saakka käyttäen joka kerralla erisuuruista lastuamisnopeutta. Koko ajan muuttuva lastuamissyvyys ja työstön jaksollisuus (terä jäähtyy välillä) aiheuttaa SCT-kokeessa terään mekaanisen ja termisen väsymyksen. Siitä syystä SCT-koe antaa huonommat v_{15} -arvot kuin stabiileissa olosuhteissa tehtävä perinteinen standardin mukainen koe. Lisäksi SCT-koe kaventaa M-teräksen ja normaalin teräksen välistä eroa, koska ISO 3685:n mukaan määritetyissä vT -suorissa M-teräksen ja normaaliteräksen välinen ero on suurempi kuin SCT-kokeen antamissa tuloksissa. (Heiskala 1995a, 34–37.)

7.3 Jyrsintäkoe ja sen sovellukset

Tiettyihin sovelluksiin jyrsimällä tehtävä lastuttavuuskoe soveltuu paremmin kuin aiemmin esitetyt poraus- ja sorvauskokeet. Esimerkiksi kappaleen koko ja muoto voivat joskus olla edullisempia jyrsintäkokeelle. Ennen sorvauskoetta koekappale saatetaan joutua jyrsimään, jotta koe voidaan suorittaa sorvaamalla. Jos tällaisissa tapauksissa voidaan käyttää suoraan jyrsintäkoetta, säästetään aikaa ja materiaalia. Tässä luvussa esitellään muutama lastuttavuutta mittaava jyrsinkoesovellus.

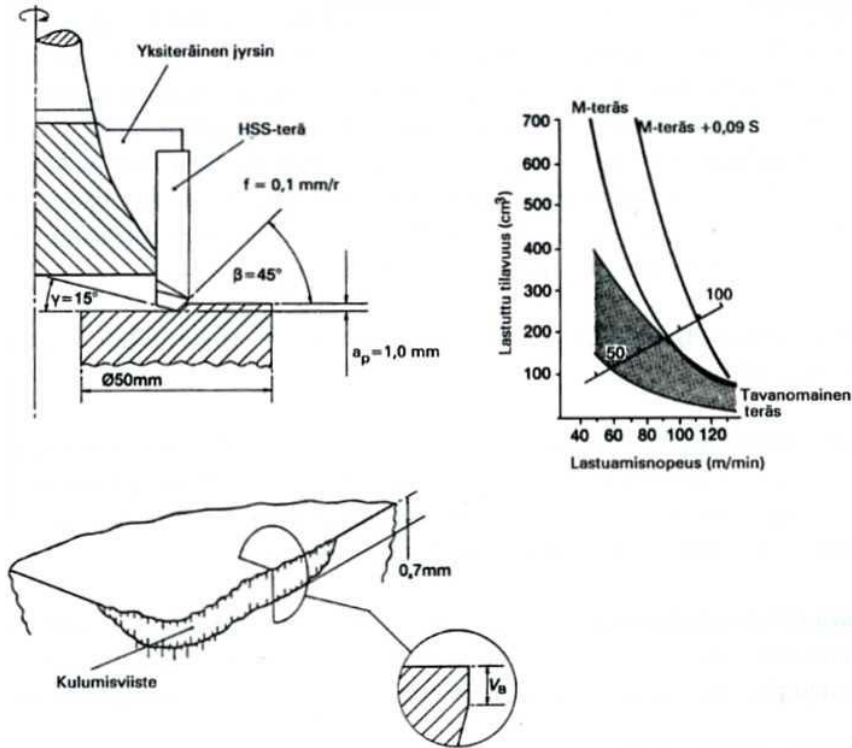
7.3.1 VOLVOn lastuttavuuskoe

Volvon vuonna 1958 laatima lastuttavuuskoe tehdään taso jyrsimellä, jossa on vain yksi työstävä hammas. Lastuamisgeometria ja -olosuhteet on standardissa (Std. 1018.712) tarkasti määritetty. Teräpala on valmistettu pikateräksestä (SIS 142756 mod. vastaa AISI-T5), jonka kemiallinen koostumus ja kovuus ovat myös tiukasti määritetyt (64–65 HRC). Lastuamisparametrit esitetään taulukossa 5.

Taulukko 5. Volvon tasoajrsintäkokeen lastuamisparametrit (Volvo 1978).

Lastuamisparametri	Kirjaintunnus	Arvo
Lastuamissyvyys	a	$1,0 \pm 0,05$ mm
Syöttö	s	$0.1 \pm 0,002$ mm/hammas
Lastuamisnopeus	v_c	20 – 200 m/min
Koetangon halkaisija valmisteltuna	d	$50 \pm 0,1$ mm

Tasoajrsintä suoritetaan vaiheittain siten, että jokaisen vaiheen jälkeen teräpala irrotetaan ja mitataan viistekuluminen mikroskoopilla. Koe lopetetaan, kun keskimääräinen viistekuluminen (VB_B) saavuttaa arvon 0,7 mm. Kuvan 23 mukainen $v_c V_k$ -kuvaaja laaditaan siten, että materiaaleja sorvataan eri lastuamisnopeuksilla ja teräpalan keskimääräisen viistekulumisen saavutettua arvon 0,7 mm lasketaan lastuttu tilavuus. Koordinaatistoon laaditaan referenssisuora, joka saa maksimiarvon 100 tietyssä määritetyssä pisteessä. Tämä piste voi olla esimerkiksi tiettyä lastuamisnopeutta, lastuttua tilavuutta ja lastuttavuudeltaan parasta materiaalia vastaava piste. Referenssisuoran avulla pystytään vertailemaan eri materiaalien lastuttavuutta suhteutettuna arvoon 100. (Volvo 1978.)



Kuva 23. Volvon tasojyrsintäkokeen periaate, lastuamisgeometria ja indeksointikuvaaja, jossa referenssisuora materiaalien lastuttavuuden vertailemiseksi (Andersson 1997c, 138).

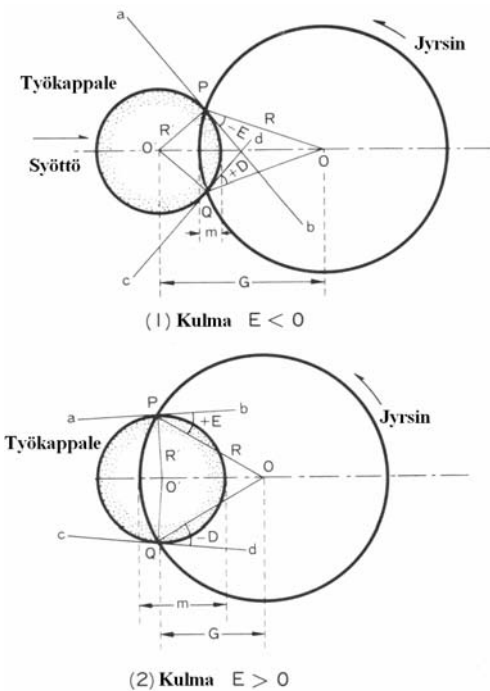
7.3.2 Lastuamiskokeet tasojyrsimellä

Tässä luvussa esitellään kaksi erilaista tasojyrsimellä tehtävää lastuamiskoesovellusta, joista toinen tehdään sylinterin muotoiselle kappaleelle ja toinen suorakaiteen muotoiselle. Molemmat kokeet soveltuvat tietyin muunnelmin niin lastuttavan materiaalin kuin lastuavan terän lastuttavuusominaisuuksien vertailuun.

Sylinterin muotoisen kappaleen tasojyrsintäkoe (face-milling end of cylindrical workpiece) on luonteeltaan pikakoe. Kokeessa käytettävä koekappale on halkaisijaltaan pienempi kuin otsajyrsimen halkaisija. Siksi koe ei vaadi paljon kallista materiaalia.

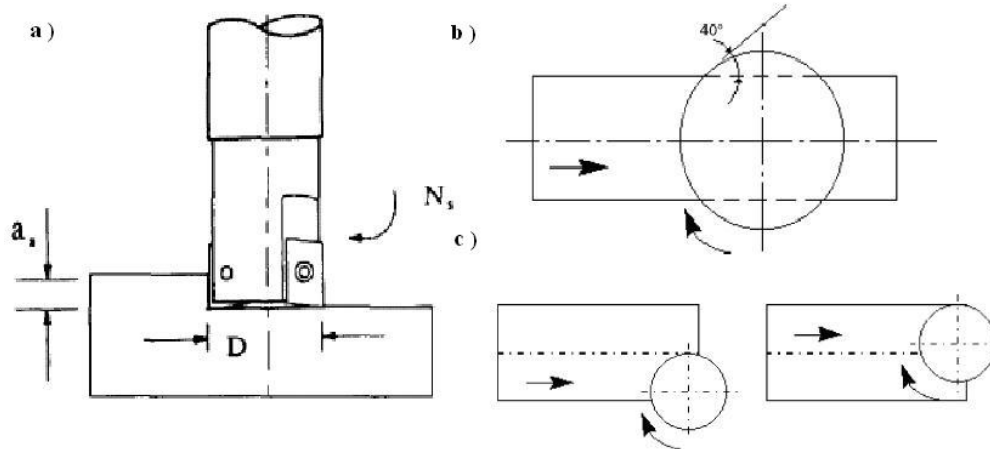
Kuvassa 24 esitetään kokeen kulku. Koekappaleen ja tasojyrsimen keskipisteet pysyvät samalla linjalla koko kokeen ajan. Koekappaletta lastutaan edestakaisella liikkeellä, kunnes terä rikkoutuu tai saavuttaa tietyn kulumiskriteerin. Terää tai terien kuoppakulumista onkin

mitattava tietyin väliajoin. Kuoppakulumisen lisäksi myös viistekulumiselle voidaan asettaa raja-arvo. Lastuamisparametrit pidetään vakioina koko kokeen ajan ja lastuamisnestettä ei käytetä. Ainoastaan lastuamisnopeutta voidaan vaihdella vT -suorien määrittämiseksi. Koe voidaan suorittaa myös vakiolastuamisnopeudella, jolloin mitattavana muuttujana on terän kestoikä ja vertailun kohteena lastuttava materiaali. (Akasawa, Kitagawa & Okusa 1978, 36–45.)



Kuva 24. Pyörötangon tasojyrsinkokeen periaate (Akasawa et al. 1978, 38).

Toinen tasojyrsintäkoesoovellus on samanlainen kuin ensimmäinenkin, mutta koekappale on suorakaiteen muotoinen. Kuvassa 25 on periaatekuva kahdesta erilaisesta kokeen suoritustavasta. Kohdissa a ja b tasojyrsimen halkaisija on suurempi kuin koekappaleen leveys. Jos koe halutaan suorittaa tällä tavoin, käytettävän tasojyrsimen halkaisija rajoittaa koekappaleen leveyttä. Kohdassa c koekappale voi olla leveämpi tai jyrsin kapeampi, koska yhden kerroksen jyrsintä suoritetaan kahteen tai useampaan kertaan. Aivan kuten ensimmäisessäkin tapauksessa koetta jatketaan edestakaisella liikkeellä, kunnes terä rikkoutuu tai saavuttaa määritetyn kulumiskriteerin. Materiaalin tai terän lastuttavuusominaisuudet arvioidaan samalla tavalla kuin ensimmäisessä tapauksessa. (Bonney, Ezugwu, Machado, Richetti & Da Silva 2004, 695–700)



Kuva 25. Suorakaiteen muotoisen kappaleen tasoajyrintäkoete kahdella eri tavalla toteutettuna. Kohdat a ja b kuvaavat samaa tapausta eri kuvakulmasta (Alauddin, El Baradie & Hashmi 2004, 321; Bonney et al. 2004, 697).

Molemmissa edellä esitetyissä tasoajyrintäkokeissa voidaan käyttää yhtä tai useampaa teräpalaa. Yhdellä teräpalalla työstettäessä materiaalia kuluu vähemmän kuin esimerkiksi kuudella teräpalalla lastuttaessa, toisaalta esimerkiksi kuuden teräpalan käyttö vastaa normaaleja lastuamisolosuhteita. Lisäksi kuuden teräpalan käyttö nopeuttaa suuremman lastuamislämpötilan vuoksi teräpalojen kulumista. Siksi on suositeltavaa käyttää esimerkiksi kuutta teräpalaa yhden sijaan. (Bonney et al. 2004, 695–700)

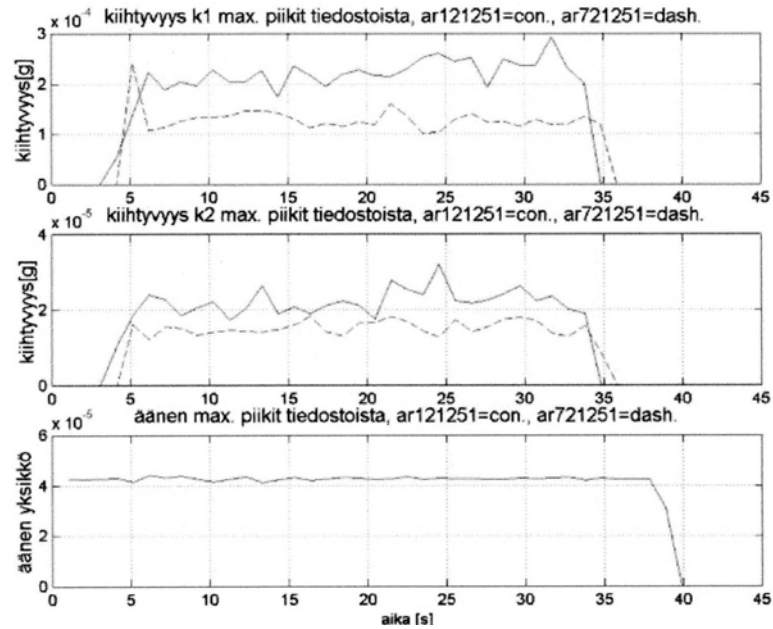
8 AIEMMAN LASTUTTAVUUSPIKAKOETUTKIMUKSEN TARKASTELU

Ovakon nykyisen lastuttavuuspikakokeen uusimiseksi teki Artturi Sukkela vuonna 2000 diplomityön, jossa hän tutki anturitekniikan hyväksikäyttöä CNC-sorvilla tehtävissä lastuttavuuskokeissa. Tarkastelun kohteena olivat muun muassa huonosti onnistuneen ja hyvin onnistuneen M-käsitellyn teräksen erot lastuamisvärähtelyissä, -voimissa ja -lämpötiloissa. Tässä luvussa tehdään katsaus aikaisemmin saatuihin tuloksiin. (Sukkela 2000, 1–5.)

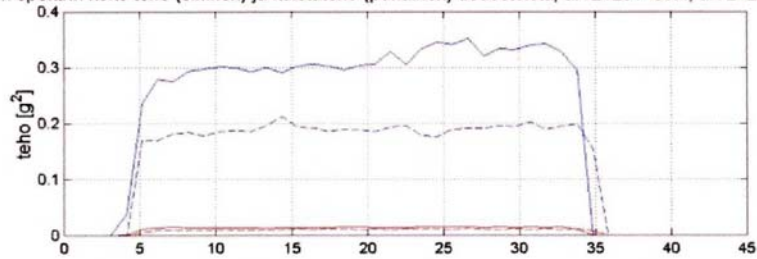
8.1 Lastuamisvärähtelyt

Kuten luvussa 6.2.4 selvitettiin, pystytään lastuamista arvioimaan lastuamisvärähtelyjä mittaamalla. Sukkela tutki diplomityössään Ovakon M-terästen lastuttavuutta värähtelyjä mittaamalla. Tarkastelun kohteena olivat muun muassa huono 520M-teräs ($M_q = 3,8$) ja hyvä 520M-teräs ($M_q = 9,5$). Kyseisten terästen mekaaniset ominaisuudet olivat lähes samat, joten ne eivät aiheuta virhemahdollisuutta koetuloksiin. Lisäksi työssä tarkasteltiin eri terien käytön vaikutusta lastuamisvärähtelyihin. (Sukkela 2000, 1–5.)

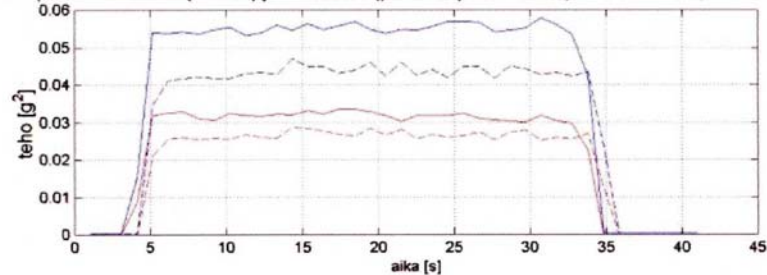
Sukkelan tekemissä lastuamiskokeissa syötön suuntaisia värähtelyjä mitattiin kiihtyvyyssanturilla K2 ja päälastuamisvoiman suuntaisia värähtelyjä kiihtyvyyssanturilla K1. Kuvassa 26 on esitetty kuvaajat antureilta K1 ja K2 saaduista kiihtyvyyden maksimipiikeistä. Lisäksi kuvassa näkyy terästen lastuamisvärähtelyjen komponenttien tehospektrien koko tehon vertailu. Näissä kokeissa lastuamisparametreina käytettiin lastuamisnopeutta $v_c = 450$ m/min, syöttöä $f = 0,4$ mm/r ja lastuamissyvyyttä $a_p = 2$ mm. Teräpalana käytettiin SECON kääntöterää SNUN 120408 S1F eli samaa terää kuin Ovakon nykyisessäkin lastuttavuuspikakokeessa käytetään. (Sukkela 2000, 63–66.)



K1:n spektrin koko teho (sininen) ja kaistateho (punainen) tiedostoista, ar121251=con., ar721251=dash



K2:n spektrin koko teho (sininen) ja kaistateho (punainen) tiedostoista, ar121251=con., ar721251=dash



Kuva 26. Kolmessa ylimmissä kuvissa on esitetty päälastuamisvoiman ja syötön suuntaisten lastuamisvärähtelyjen maksimipiikit Ovakon teräkselle 520M ($M_q = 3,8$ jatkuva viiva ja $M_q = 9,5$ katkoviiva). Vastaavasti kahdessa alimmassa kuvassa on lastuamisvärähtelyjen komponenttien koko tehon vertailu (Sukkela 2000, 65–66).

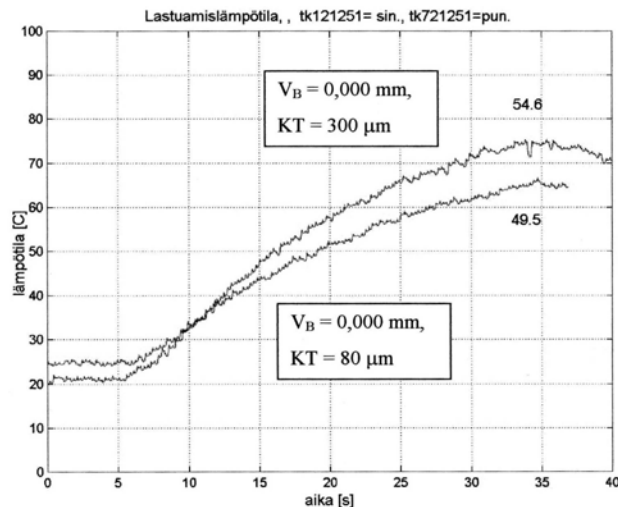
Kuten kuvista havaitaan, saadaan huonosti onnistuneelle M-teräkselle suuremmat lastuamisvärähtelyjen arvot kuin hyvin onnistuneelle. Etenkin koko tehon mittaamisessa on

saavutettu selvät erot. Sukkelan tekemät kokeet osoittavat, että värähtelyjen mittaamisella pystyttäisiin testaamaan M-käsittelyn onnistumista.

Sukkela testasi myös eri teräpalojen (aine/pinnoite) vaikutusta lastuamismäärätyiden suuruuteen. Edellä kuvattu koe tehtiin myös TiC/Al₂O₃ pinnoitetulla kääntöterällä (Kennametal SNUN 120408 KC910). Tuloksista havaittiin, että kyseisellä teräpalalla ei saada niin suuria eroja kuin SECON SNUN 120408 S1F teräpalalla ja lisäksi tulokset voivat olla jopa päinvastaiset. Käytettävällä teräpalalla on näin ollen suuri vaikutus kokeen onnistumiseen ja luotettavuuteen. (Sukkela 2000, 63–70.)

8.2 Lastuamislämpötilat

Aiemmin luvussa 6.2.3 esiteltiin lämpötilaan perustuvan lastuamiskokeen teoriaa. Sukkelan kokeissa lastuamislämpötilaa mitattiin kääntöterän aluspalaan kiinnitetyllä K-tyypin termoparilla. Kuvassa 27 ovat koetulokset Ovakon 520M ($M_q = 3,8$) ja 520M ($M_q = 9,5$) lastuamislämpötilan vertailusta. Kokeessa käytettiin samaa teräpalaa ja aivan samoja lastuamisparametreja kuin lastuamismäärätyjen mittauskokeessakin. (Sukkela 2000, 89–93.)

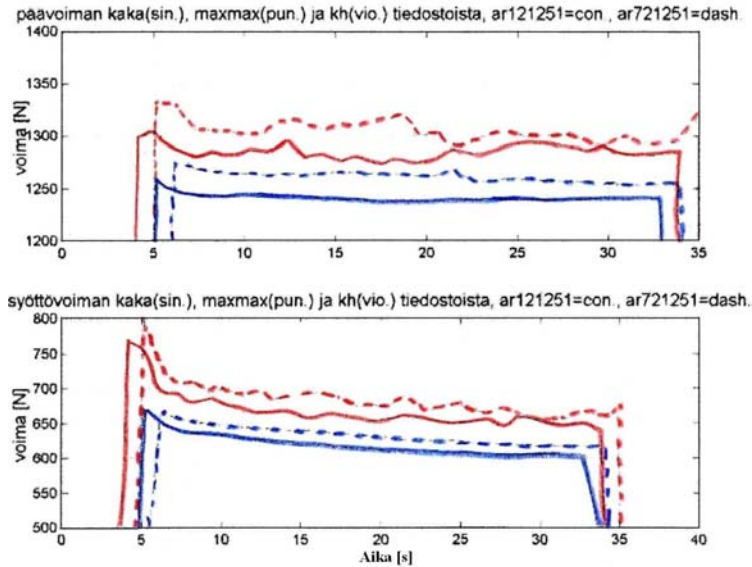


Kuva 27. Lastuamislämpötilojen kuvaajat. Kuvaaja, joka saa suuremman loppulämpötilan, on heikosti onnistuneen ($M_q = 3,8$) ja alempi hyvin onnistuneen ($M_q = 9,5$) M-teräksen (Sukkela 2000, 89).

Koetuloksista käy ilmi, että loppulastuamislämpötila on alhaisempi paremmin onnistuneella M-teräksellä, vaikka lähtölämpötila onkin ollut korkeampi kuin heikommalla M-teräksellä. Myös lastuamislämpötilan vertailukokeissa testattiin eri teräpalojen vaikutusta koetuloksiin. Vertailun kohteena olivat pinnoitettu kääntöterä Kennametal SNUN 120408 KC910 ja TiC/TiC-N/TiN-pinnoitettu Kennametal KC850. Kokeissa havaittiin, että lämpötilan vertailemiseen eri M-terästen välillä soveltuu paremmin Kennametalin teräpala SNUN 120408 KC910. Sen sijaan teräpala KC850 antoi lähes identtiset koetulokset huonosti onnistuneelle ja hyvin onnistuneelle M-teräkselle. Tulosten perusteella myös lämpötilan vertailuun perustuvaa lastuamiskoetta voidaan käyttää M-terästen laadun vertailuun. (Sukkela 2000, 89–93.)

8.3 Lastuamisvoimat

Lastuamisvoimiin perustuvia lastuttavuuskokeita on käsitelty edellä luvussa 6.2.2. Sukkelan kokeissa verrattiin myös Ovakon huonon ($M_q = 3,8$) ja hyvän ($M_q = 9,5$) M-teräksen lastuamisvoimia. Sorvauskokeissa mitattiin päälastuamis- ja syöttövoimaa terävarteen rakennetuilla venymäliuska-antureilla. Kokeissa käytettiin samoja lastuamisparametreja kuin edellä mainituissakin sillä erotuksella, että lastuamisnopeus v_c oli ollut 529 m/min. Kuvassa 28 esitetyissä tuloksissa teräpalana käytettiin SECO:n SNUN 120408 S1F teräpalaa. (Sukkela 2000, 105–106)



Kuva 28. Päälastuamis- ja syöttövoiman kuvaajat huonolle ($M_q = 3,8$ katkoviiva) ja hyvälle ($M_q = 9,5$ jatkuva viiva) M-teräkselle (Sukkela 2000, 107).

Sukkelan koetuloksista nähdään, että myös lastuamisvoimien suuruudessa on eroja erilaatuisten M-terästen välillä. Lastuamisvoimia vertailtaessa testattiin samoja Kennametalin teräpaloja kuin aiemmin esitetyissä kokeissa. Lastuamisvoimien mittauksessa Kennametalin SNUN KC910 antoi paremmat tulokset kuin KC850, jolla saadut koetulokset olivat päinvastaiset toisiin teräpaloihin verrattuna. Täten voidaan havaita, että myös lastuamisvoimien mittaamisessa teräpala vaikuttaa suuresti tuloksiin. (Sukkela 2000, 107–110)

Vaikka koetulokset olivat näyttäneet, että myös lastuamisvoimia mittaamalla voidaan M-terästen laatua vertailla, Sukkela kyseenalaisti saadut koetulokset. Sukkelan mielestä ei voida sanoa, johtuvatko tulokset pelkästään kalsiumkäsittelyn onnistumisesta tai epäonnistumisesta. Syynä tähän epävarmuuteen on terän rintapintaan muodostuvan kalvon vaikutus. Jos pinnoittamattomalla terällä kalvoa ei muodostu (eli M-käsittely on epäonnistunut), voi kuoppakulumisen vaikutuksesta rintakulma muuttua positiivisemmaksi ja lastuamisvoimat pienenevät. Tämän takia lastuamisvoimia mittaamalla ei M-teräksen laatua pystytä luotettavasti testaamaan. Epävarmuutta aiheuttaa myös otoksen pieni koko, joten tulosten hajontaa ei ollut analysoitu ollenkaan. Lisäksi materiaalin pienetkin kovuuden vaihtelut voivat vaikuttaa merkittävästi lastuamisvoimiin, mikä sekkin lisää epävarmuutta koetulosten luotettavuudesta. (Sukkela 2000, 107–110.)

9 JOHDANTO SOVELTAVAAN OSUUTEEN

Diplomityön tavoitteeksi oli asetettu suunnitelma uuden lastuttavuuspikakokeen laatimiseksi. Oman pohdinnan apuna työssä käytetään taustakirjallisuutta, asiantuntijanäkemyksiä ja työn ohjaajien kanssa pidettyjä yhteisiä palavereja. Tutkimusongelma voidaan muotoilla kysymysten avulla seuraavasti:

1. Millainen uuden kokeen täytyy olla?
2. Mitä kokeella käytännössä mitataan?
3. Miten uusi koe toteutetaan?

Ensimmäiseen kysymykseen voidaan vastata, että kokeen pitää olla nopea, luotettava sekä halpa käyttää ja toteuttaa. M-teräksen laadusta pitää saada tietoa nopeasti, ja kokeen suorittamiseen on aikaa rajallisesti. Lastuttavuuskokeen on siis oltava pikakoe. Luotettavuudella tarkoitetaan kokeen hyvää toistettavuutta ja kokeen kykyä erotella onnistunut ja epäonnistunut M-teräs. Kokeen halvalla käytöllä tarkoitetaan esimerkiksi sitä, että siinä tarvitaan vain vähän kallista koemateriaalia. Ensimmäinen kysymys asettaa lastuttavuuskokeelta vaadittavat ominaisuudet.

Lastuttavuuskokeella mitataan M-käsittelyn onnistumista. Asia ei ole kuitenkaan yksinkertainen. Ristiriitaiseksi asian tekee se, että teräksen valmistaja ja asiakas voivat nähdä M-teräksen laadun erilailla. Suunniteltavalla uudella kokeella pitäisi mitata M-käsittelyn onnistumista teräksen valmistajan ja myös asiakkaan näkökulmasta. Uuden kokeen olisi siis vastattava todellisia lastuamisolosuhteita. Kahden ensimmäisen kysymyksen asettamat haasteet ohjaavat uuden kokeen suunnitteluprosessia, jonka pohjalta työn lopussa on vastaus myös kolmanteen kysymykseen.

Uuden lastuttavuuskokeen suunnittelussa on otettava huomioon nykyiset resurssit. Etuna olisi, jos koe voitaisiin toteuttaa nykyisiä resursseja hyödyntäen, jolloin välttyttäisiin suurilta investoinneilta. Sorvauskokeen etuna ovat olemassa olevat sorvit, jotka soveltuvat hyvin tutkimus- ja testauskäyttöön. Lisäksi sorveilla on riittävästi vapaata kapasiteettia tehdä lastuttavuuskokeita. Imatran terästehtaalla on myös poraus- ja CNC-jyrsin koneita, mikäli lastuttavuuskokeet halutaan suorittaa jyrsimällä tai poraamalla. Edellytykset tehdä

uusi koe jyrsimällä tai poraamalla eivät kuitenkaan ole yhtä hyvät kuin sorvaamalla tehtävällä lastuttavuuskokeella. Sorvauskokeen etuna on muun muassa se, että myös nykyinen koe on sorvauskoe ja sen vuoksi kokeen suoritus ja siihen liittyvät oheistoimenpiteet ovat rutinoituneita. Uusi koe olisikin helpoin toteuttaa sorvauskokeena.

10 ASiantuntijanäkemykset

Uuden kokeen laatimiseksi on alan asiantuntijoilta kerätty mielipiteitä ja ehdotuksia. Haastateltavina olivat Ovakon jatkojalostuksen tuotantopäällikkö Markku Huhtiranta, lastuavien työkalujen valmistaja SECO TOOLilta Sakari Ruppi ja Mikpolis Oy:n materiaalitekniikan toimialajohtaja Paavo Ripatti.

Markku Huhtiranta on pääosin kehittänyt Ovakon nykyisen lastuttavuuskokeen. Huhtirannan kanssa käydyssä keskustelussa 21.7.2008 nousi esiin seuraavia seikkoja (Huhtiranta 2008):

- On hyvä idea keskittyä huolelliseen suunnitteluun sen sijaan, että lähettäisiin suin päin kokeilemaan jotakin koemallia.
- Anturitekniikan hyödyntäminen uudessa kokeessa on mahdollista, koska kokeet tehdään laboratoriossa ja virhemahdollisuudet ovat siten pienemmät kuin tuotanto-olosuhteissa.
- Sorvauskoe on paras koemuoto M-terästen lastuttavuuden tutkimiseen, mutta esimerkiksi poraus- ja sorvauskokeen yhdistäminen ei ole mahdoton ajatus.
- Nykyisten olemassa olevien resurssien hyödyntäminen on tärkeää.

Sakari Ruppi on kokenut lastuavan työstön asiantuntija. Rupun kanssa käydyssä puhelinkeskustelussa 23.7.2008 tuli seuraavia mielipiteitä (Ruppi 2008):

- Terän rintapinnalle muodostuvaan kalvoteoriaan on suhtauduttava kriittisesti, koska M-teräksen hyvä lastuttavuus voi johtua aivan muista tekijöistä, eli muodostunut kalvo ei välttämättä suojaa ja voitele terää niin kuin väitetään.
- Anturitekniikkaa voidaan hyödyntää lastuttavuuskokeessa, mutta lastuamislämpötilaan perustuva koe on epävarmuuden tähden suljettava pois.
- Miksi mitata kuoppakulumista, jos kerran teräriikon syynä on yleensä viistekuluminen ja on näin tärkeämpi asiakkaan näkökulmasta?
- Miksi käyttää nykyisin pinnoittamatonta teräpalaa, jos asiakkaat käyttävät nykyaikaisia pinnoitettuja teräpaloja?

- Olisiko M-käsittelyn onnistuminen mahdollista nähdä suoraan teräksen mikrorakenteesta, jolloin lastuamista ei tarvittaisi?

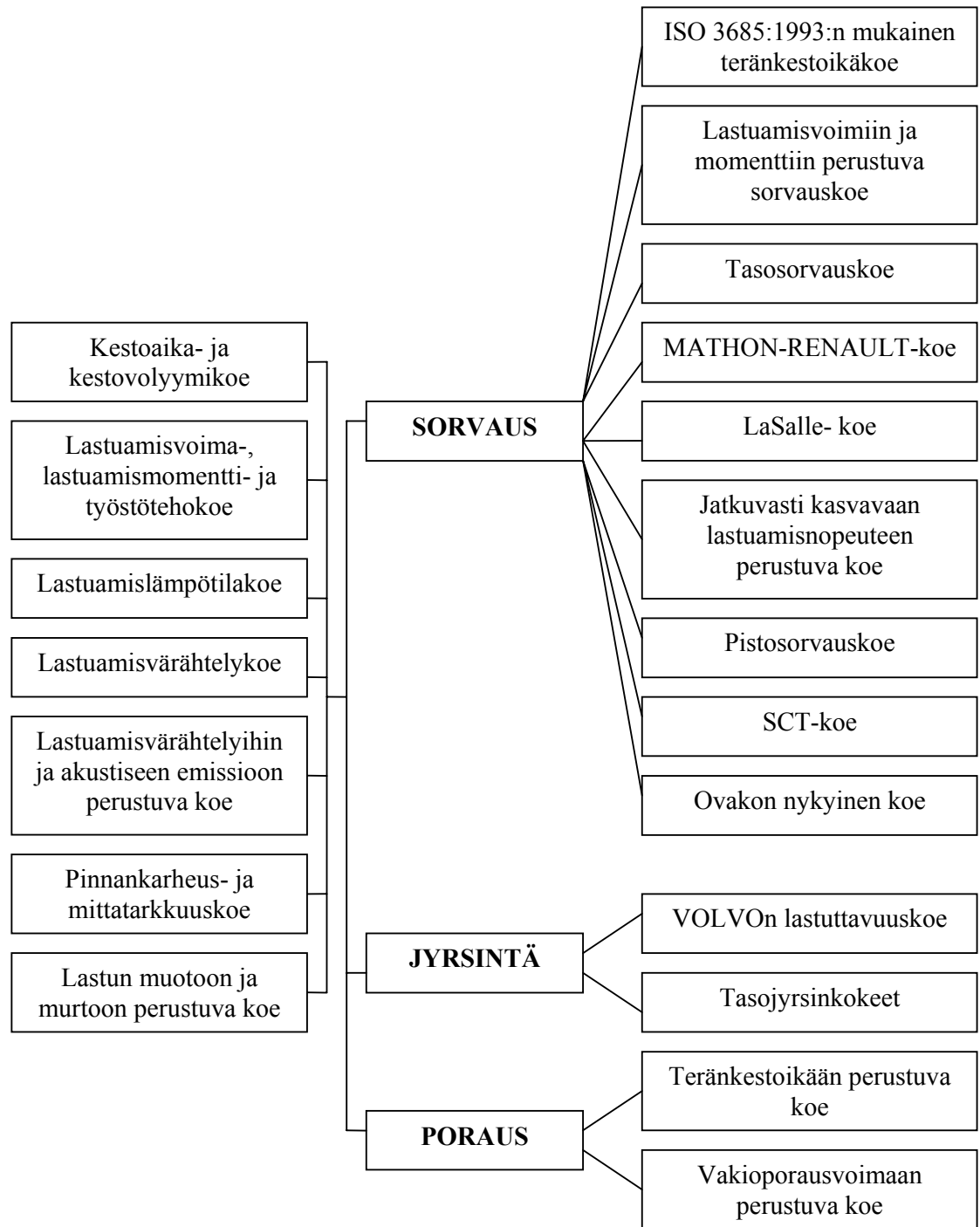
Paavo Ripatti on materiaalitekniikan asiantuntija ja, sen lisäksi hän on tehnyt vuonna 1982 diplomityön lastuttavuuspikakokeista. Ripatin kanssa käytiin aiheeseen liittyen puhelinkeskustelu 23.7.2008. Keskustelussa tuli esiin seuraavia näkökulmia (Ripatti 2008):

- Lastuamisvoimien mittauksella pystytään näkemään erot hyvän ja huonon M-teräksen välillä.
- Lämpötilakuvauksella pystytään tarkkailemaan teräpalan ja työkappaleen lämpötiloja koko prosessin ajan.
- Lämpötilakuvauksen ohella toinen vaihtoehto prosessin seurantaan on suurnopeuskuvaus.
- SEM-kuvauksen hyödyntäminen.
- Akustisen emission mittaaminen terän kulumisen arvioimiseksi.

Asiantuntijoiden näkemykset eivät antaneet selkeää näkemystä siitä, millainen koe soveltuisi hyvin M-terästen tutkimiseen. Kuitenkin heidän mielipiteistään saatiin arvokasta tietoa siitä, mihin suuntaan soveltavaa osaa lähdetään tekemään.

11 UUDEN LASTUTTAVUUSKOKEEN MUODOSTAMINEN

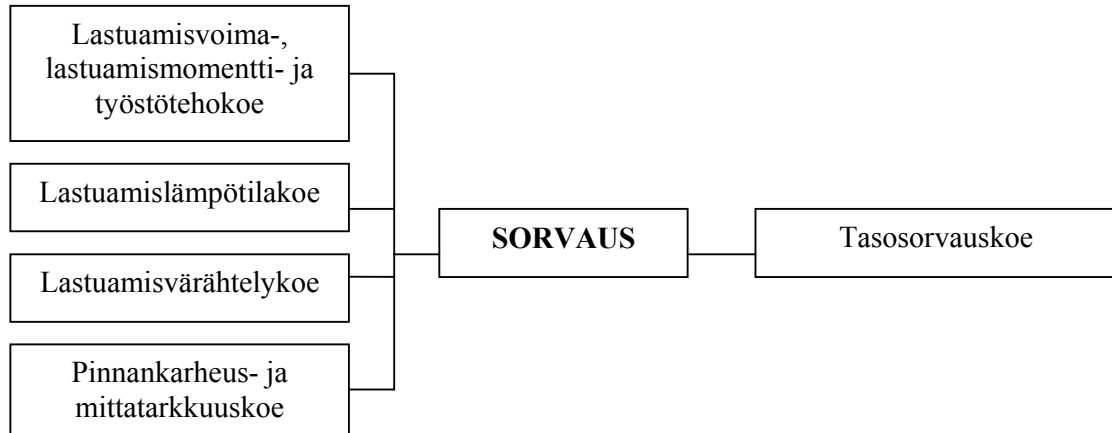
Uuden lastuttavuuskokeen laatimisen helpottamiseksi laadittiin kuvan 29 mukainen kaavio, joka on koottu kirjallisuusosuudessa esitetyistä lastuttavuuskokeista. Kuvan keskellä on lastuttavuuskokeiden kolme päämenetelmää: sorvaus, jysintä ja poraus. Vasempaan laitaan on kerätty koemuodot, joita voidaan soveltaa kaikkiin kolmeen päämenetelmään. Oikeaan laitaan on listattu kirjallisuusosuudessa käsitellyt kolmen päämenetelmän koesovellukset.



Kuva 29. Lastuttavuuskokeissa käytetyt kolme päämenetelmää, päämenetelmiin sovellettavat kokeet ja tietyille päämenetelmälle räätälöidyt lastuttavuuskokeet.

Kuvan kaaviota voidaan hyödyntää kokeen suunnittelussa siten, että ensimmäiseksi valitaan päämenetelmä, minkä jälkeen valitaan kokeessa käytettävä koemuoto. Kokeessa käytettäviä koemuotoja voidaan valita useita. Lisäksi voidaan poimia koesovelluksista

joitakin tiettyjä yksityiskohtia, joita sitten sovelletaan suunniteltavaan kokeeseen. Kuvassa 30 on esimerkki, kuinka voidaan tehdä uuden lastuttavuuskokeen runko.



Kuva 30. Kaaviota hyväksi käyttäen muodostettu esimerkki lastuttavuuskokeen rungosta.

Kuvan 30 mukainen lastuttavuuskoe tehdään siis tasosorvauksena. Kokeen aikana mitataan lastuamislämpötilaa, -värähtelyä, -momenttia ja -voimia sekä työstökoneen tarvitsemaa tehoa. Kokeen jälkeen mitataan koekappaleesta pinnankarheus ja halkaisija, jota verrataan suunniteltuun halkaisijaan (mittatarkkuuskoe). Näin siis saadaan kokeen runko. Valmiin kokeen saamiseksi on kuitenkin määritettävä useita asioita ennen kuin materiaalin lastuttavuutta pystytään luotettavasti mittaamaan. Esimerkiksi lastuamislämpötilalle, -värähtelyille ja -voimille on asetettava raja-arvot, jotta tiedetään, täyttääkö tutkittava materiaali asetetut kriteerit. Voiman mittausta voidaan tietysti käyttää apuna myös teräriikon havaitsemiseen, jolloin saadaan tieto terän kestoiästä. Kuten esimerkki osoittaa, pystytään tällaisesta kokeen rungosta laatimaan jo useita erilaisia kokeita.

12 ENSIMMÄINEN KOEVARIAATIO KEHITETTY VERSIO M_q -KOEESTA

Ensimmäinen koevariaatio on Ovakon nykyisen lastuttavuuskokeen eli M_q -kokeen kehittäminen. Kehittämisprosessi voidaan jakaa kahteen osaan:

1. M_q -kokeen kehittäminen ratkaisemalla kokeen ongelma- ja virhetekijät.
2. M_q -kokeen kehittäminen yhdistämällä siihen muita lastuttavuutta mittaavia koemuotoja.

Kun nykyisin käytössä olevaa koetta lähdetään kehittämään, pidetään kokeen perustoimintaperiaate samana.

12.1 M_q -kokeen ongelmat ja virhetekijät

Nykyisessä kokeessa on havaittu seuraavia ongelmia ja virhettä aiheuttavia tekijöitä:

1. Kokeessa nykyisin käytettävät teräpalat loppuvat kolmen vuoden sisällä.
2. Suuremmilla lastuamisnopeuksilla saadaan huonompia M_q -arvoja.
3. Kovuuden mittauksessa syntyvät virheet.
4. Teräpalan rikkoutuminen heti kokeen alussa.
5. Virheet viiste- ja kuoppakulumisen mittaamisessa.
6. Jalostusasteen erot teelmästä otetun koekappaleen ja pyörötangosta otetun koekappaleen välillä.
7. M_q -kokeen luotettavuuden vaihtelu eri teräslajien välillä.

Ensimmäisenä ongelmana siis on SECON SNUN 120408 S1F P10-teräpalojen loppuminen kolmen vuoden sisällä. Kun teräpala vaihdetaan uuteen, joudutaan koetta joiltakin osin muuttamaan, koska ominaisuuksiltaan täysin vastaavaa teräpalaa ei ole. Tehtävillä muutoksilla uuden teräpalan antamat erilaiset tulokset pyrittäisiin muuttamaan siten, että ne vastaisivat nykyisin saatavia M_q -arvoja.

Kirjallisuusosuudessa mainitaan ongelmaksi, että suuremmilla lastuamisnopeuksilla saadaan huonompia M_q -arvoja. Syynä voi olla virhe kovuus-lastuamisnopeus korrelaatioissa.

Kolmas kehittämiskohde on kovuuden mittauksessa tapahtuvien virheiden eliminointi. Eri mittaajien välillä voi mittauksissa tulla pieniä kovuseroja ja sen takia kokeessa käytettävä lastuamisnopeus valitaan väärin. Virheitä kovuuden mittauksessa voivat aiheuttaa myös erot teelmästä otetun ja pyörötangosta otetun koekappaleen välillä. Teelmästä leikataan kovuuslaikka samalla kun sille suoritetaan päidenoikaisusahaus. Tämän jälkeen teelmästä otetun koekappaleen kulmat jyrksitään pyöreämmäksi ja lopuksi ennen varsinaisen kokeen aloittamista koekappale sorvataan täysin pyörähdyssymmetriseksi. Pyörötangosta otetulle koekappaleelle tehdään kovuuden mittauksen jälkeen vain puhdistussorvaus ennen varsinaista koetta. Teelmästä otettua koekappaletta työstetään siis kovuuden mittauksen jälkeen paljon enemmän kuin pyörötangosta otettua. Koetta edeltävässä lastuamisprosessissa teelmästä otettu koekappale lämpenee, ja näin sen kovuus muuttuu ennen varsinaista koetta. Mitattu kovuus ei siis täysin vastaa koekappaleen kovuutta, joka sillä on ennen varsinaisen kokeen alkua.

M_q -kokeita tehtäessä teräpala saattaa rikkoutua heti kokeen alussa. Syynä voi olla teräpalan iskeytyminen koekappaleeseen lastuamisen alkaessa, jolloin teräpala murtuu. Tällaisissa tapauksissa koe keskeytyy ja tuloksena on M_q -arvosana 0, vaikka tutkittava teräs voikin täyttää M-teräsvaatimukset.

Viides kehittämiskohde on kuoppa- ja viistekulumisen mittaamisen vakiointi. Kokeita suorittaa useampi henkilö, ja jokainen henkilö mittaa terän kulumisen hiukan eri tavalla ja erilaisella tarkkuudella. Mittaustulosten eri mittaajien väliset virheet tulisi mahdollisuuksien mukaan minimoida.

Lisäksi on huomioitava, että teelmästä otetut koekappaleet eivät vastaa lopullista asiakkaalle menevää tuotetta. Teelmää jatkojalostetaan monessa vaiheessa, ennen kuin se on asiakkaan tilauksen mukainen. Työvaiheita ovat esimerkiksi tankovalssaus ja lämpökäsittely. Näissä työvaiheissa teräksen ominaisuudet muuttuvat. Jos lastuttavuuskoe

tehdään vasta jatkojalostuksen jälkeen, on kokeen tulos erilainen kuin teelmästä otetulla koekappaleella, vaikka kyseessä onkin aivan sama teräs. Kun koe tehdään pyörötangosta otetulle koekappaleelle, tiedetään tarkalleen asiakkaalle lähetettävän teräksen laatu.

12.1.1 M_q -kokeen luotettavuuden arvioiminen eri teräslajien välillä

M_q -kokeen tuloksissa on havaittu eroja teräslajien välillä. M_q -koe ei siis välttämättä toimi kaikilla teräslajeilla luotettavasti. Taulukkoon 6 on kerätty kolmen keskeisen teräslajin M_q -kokeista saatuja tuloksia. Saadut tulokset on laskettu vuodesta 2000 lähtien kerätyistä koetuloksista.

Taulukko 6. Kolmen keskeisimmän teräslajin M_q -koetuloksia.

	Laji		
	2723	4548	6082
Kokeiden lukumäärä 1.1.2000–15.9.2008	968	500	680
Hyväksytyt kokeet (M_q -arvosana ≥ 4)	958	494	569
Hylätyt kokeet (M_q -arvosana < 4)	10	6	111, joista 87 viistekulumisen takia ($VB_B \geq 0,3$ mm) Kokeista 20:ssä oli sekä kuoppa- että viistekuluminen yli sallitun raja-arvon
Keskimääräisen viistekulumisen keskiarvo [mm]	0,119	0,101	0,234
Keskimääräisen viistekulumisen keskihajonta [mm]	0,0283	0,0332	0,166
Keskimääräisen viistekulumisen normaalijakauma oletusarvolle 0,3 [mm]	1,00	1,00	0,654
Kuoppakulumisen keskiarvo [μm]	48,24	55,98	65,01
Kuoppakulumisen keskihajonta [μm]	44,92	52,81	50,344
Kuoppakulumisen normaalijakauma oletusarvolle 180 [μm]	0,998	0,991	0,989
M_q -arvosanan keskiarvo	8,399	8,168	7,816
Lastuamisnopeuden keskiarvo [m/min]	515,20	451,65	298,29
Kovuuden keskiarvo [HB]	171,78	189,96	258,73

Taulukosta 6 nähdään, että lajilla 2723 on M_q -arvosanojen keskiarvo parempi kuin lajeilla 4548 ja 6082. Lisäksi lajilla 2723 hylättyjä tuloksia on vain 10 kappaletta 968 kokeesta, kun taas lajilla 6082 hylättyjä tuloksia on 111 kappaletta 680:stä. Näyttäisi siltä, että M_q -koe erottelee hyvän ja huonon M-teräksen paremmin lajilla 6082 tai sitten lajin 6082 laatu vaihtelee huomattavasti enemmän kuin lajin 2723 laatu. Mahdollista on sekin, että koe antaa jommassakummassa tapauksessa virheellisiä tuloksia. Lajilla 2723 käytetään huomattavasti suurempaa lastuamisnopeutta kuin lajilla 6082. M_q -arvosanojen keskiarvon ero voi selittyä sillä, että M-teräs toimii paremmin suurilla lastuamisnopeuksilla, jolloin myös M_q -arvosanat ovat paremmat. Tämä tarkoittaisi sitä, että M_q -koe ei ole täysin luotettava niillä teräslajeilla, joilla käytetään pientä lastuamisnopeutta (eli kovilla teräslajeilla). Tämä oletus on ristiriidassa kirjallisuusosuudessa esitetyn havainnon kanssa. Kirjallisuusosuudessa luvussa 5 ja kuvassa 11 on esitetty, kuinka huonot M_q -arvosanat painottuvat yhden teräslajin sisällä suurille lastuamisnopeuksille eli pehmeämmille koeotoksille. Syyksi on arveltu virhettä kovuus-lastuamisnopeus korrelaatiossa, mikä selittäisi tulosten vaihtelun. Onkin huomioitava se mahdollisuus, että lajin 4548 ja etenkin lajin 6082 laatu voi vaihdella 2723:a enemmän, jolloin koetulokset olisivat täysin oikeita. Lajien 4548 ja 6082 valmistusprosessissa Ca-käsittelyn onnistuminen voi olla vaikeampaa kuin lajin 2723, mikä selittäisi laatuvaihtelut.

Toinen merkittävä seikka ovat erot viistekulumisessa eri lajien välillä. Laji 6082 saa huomattavasti muita suuremmat viistekulumisen arvot. Kaikille kolmelle lajille on laskettu viistekulumisen normaalijakauma, kun oletusarvona on käytetty 0,3 mm:ä eli M_q -kokeen viistekulumisen hyväksymisraja-arvoa. Lajeilla 2723 ja 4548 normaalijakauma on 1,00, joten viistekulumisen raja-arvo 0,3 mm ei ole ylittynyt yhdessäkään tarkastelujakson kokeista. Sen sijaan lajilla 6082 normaalijakauma on 0,654, toisin sanoen 0,3 mm:n ylityksiä ja täten hylättyjä kokeita tulee huomattavasti enemmän. Sen vuoksi haluttiin tutkia viistekulumisen ja kuoppakulumisen välistä yhteyttä. Liitteessä IV on piirretty jokaisen kolmen teräslajin 100:n tuoreimman kokeen osalta kuvaajat. Kuvaajissa on kaksi y-akselia, joista toisella on kuoppakulumisen ja toisella keskimääräisen viistekulumisen arvot. Kuvaajista nähdään etenkin lajin 6082 kohdalla, että jos kuoppakulumisen on suuri, on myös viistekulumisen normaalia suurempi. Myös lajeilla 2723 ja 4548 on havaittavissa sama ilmiö, tosin ei niin selvästi. Kuoppa- ja viistekulumisen siis korreloivat keskenään. Tämä tarkoittaa sitä, että M-käsittelyn onnistumista pystytään arvioimaan myös

viistekulumisen avulla ja erityisesti lajilla 6082 tämä on mahdollista. Syytä, miksi juuri lajilla 6082 on suuremmat viistekulumisen arvot, ei tiedetä. Selityksiä voi olla useita. Esimerkiksi hidas lastuamisnopeus voi olla yksi tai yksinkertaisesti viistekulumisen on kyseiselle lajille ominaista, eikä syy varsinaisesti ole itse kokeessa. Ovakolla on myös havaittu, että laji 6498 (34CrNiMo6) saa M_q -kokeessa parempia tuloksia kuin laji 6082 (42CrMo4), vaikka kyseiset lajit ovat koostumukseltaan lähes samoja. Syynä voi olla, että M -käsittely onnistuu paremmin lajilla 6498, mutta todennäköisempää on, että virhe on M_q -kokeessa. Kokoavasti M_q -kokeen toimivuudesta eri teräslajien välillä voidaan sanoa, että koe toimii hiukan eritavoin eri lajeilla. Kokeen luotettavuus voidaankin kyseenalaistaa joillakin teräslajeilla.

12.2 M_q -kokeen kehittäminen ratkaisemalla kokeen ongelma- ja virhetekijät

Yksinkertainen tapa kehittää nykyistä koetta on ratkaista ja eliminoida luvussa 12.1 esitetyt ongelmat ja virhetekijät. Tässä luvussa esitetään keinoja ja ehdotuksia ongelmien ratkaisemiseksi ja virhelähteiden poistamiseksi.

12.2.1 Uuden teräpalan etsiminen

Työn yhden tavoitteen ja SECON Sakari Rupin kanssa käydyn keskustelun perusteella paras teräpala olisi sellainen, joka vastaisi nykyisin normaalissa teollisessa tuotannossa käytettäviä teräpaloja (Ruppi 2008). Näin uusi koe mittaisi myös teräksen käyttäjän eli asiakkaan kokemaa laatua. Kirjallisuusosuudessa on vertailtu nykyistä pinnoittamatonta teräpalaa ja Toshibaan pinnoittamattomia teräpaloja. Vertailusta käy ilmi, että teräpalat eivät vastaa ominaisuuksiltaan toisiaan. Jos uuden kokeen halutaan vastaavan todellisia tuotannon lastuamisolosuhteita, pitää uuden teräpalan olla esimerkiksi pinnoitettu kovametalliteräpala. On selvää, että jos nykyisin käytettävän pinnoittamattoman teräpalan tilalle ei ole löydetty ominaisuuksiltaan vastaavaa pinnoittamatonta teräpalaa, ei vastaavaa löydy myöskään pinnoitetuista teräpaloista.

M_q -kokeessa mitataan kuoppakulumista, ja kokeen lopputulos määräytyy kuoppakulumisen suuruuden mukaan. Jos kokeessa käytetään pinnoitettua teräpalaa, on kuoppakulumisen hidasta ja epälineaarista. Aluksi, kun pinnoite on ehjä, teräpala kuluu hitaasti, mutta pinnan rikkouduttua kulumisen kiihtyy nopeasti. Tämä tekee pinnoitetun teräpalan käytön ongelmalliseksi. Pinnoitetun teräpalan käyttö aiheuttaa sen, että koe ei ole enää pikakoe, koska kulumisen aikaan saamiseksi kokeeseen kuluu liian paljon aikaa ja materiaalia. Jos uutena teräpalana käytettäisiin pinnoitettua teräpalaa, yhtenä kulumiskriteerinä voisi olla pinnoitteen kulumisen. Koe olisi hyväksytty, jos kokeen jälkeen pinnoite olisi ehjä, ja päinvastoin hylätty, mikäli pinnoite olisi kulunut puhki.

Rupin kanssa käydyssä keskustelussa tuli ilmi, että teollisuudessa terärikkot johtuvat yleensä enemmän viiste- kuin kuoppakulumisen vaikutuksesta. Siksi voisi harkita, että voitaisiinko kuoppakulumisen mittaamisesta luopua ja M_q -arvosana määritettäisiin ainoastaan viistekulumisen perusteella. M-teräksen lastuttavuusominaisuudet eivät kuitenkaan tue tätä koemuotoa, koska hyvin onnistunut Ca-käsittely suojaa erityisesti teräpalan rintapintaa (kuoppakulumisen). Viistekulumisen mittaamisella ei saada yhtä helposti eroa huonon ja hyvän M-teräksen välille, kuten luvussa 12.1.1 käy ilmi.

Uuden teräpalan pitäisi olla sellainen, että siihen saataisiin joko viiste- tai kuoppakulumaa nopeasti ja lähes samoilla lastuamisparametreilla kuin nytkin. Paras vaihtoehto olisi, jos löytyisi pinnoitettu kovametalliteräpala, johon kulumista saataisiin aikaan varsin nopeasti. M_q -koetta sellaisenaan ei ehkä saada toteutettua pinnoitetulla teräpalalla riittävän luotettavasti. Sen vuoksi uutena teräpalana jouduttaisiin todennäköisesti käyttämään pinnoittamatonta terälaatua. Uusi teräpala saadaan vastaamaan nykyistä teräpalaa muuttamalla koeparametreja tai M_q -arvosanan määräytymisperusteita. Varteen otettavia keinoja ovat syötön lisäys/lasku ja kovuutta vastaavan lastuamisnopeuden lisäys/lasku. Pois lastuttavaa ainemäärää saatetaan myös joutua lisäämään tai pienentämään riippuen terän kulumisnopeudesta. Lisäksi M_q -arvosananmääräytymiskuvaajaan saatetaan joutua tekemään muutoksia. Uusi teräpala voidaan saada käyttöön hyvinkin helposti muuttamalla vain yhtä tekijää tai parametria, mutta pahimmassa tapauksessa nykyistä koetta joudutaan muuttamaan todella merkittävästi.

12.2.2 Virhelähteiden poistaminen

Ensimmäinen virhetekijä on hylättyjen tulosten painottuminen suurille lastuamisnopeuksille, eli yhden teräslajin sisällä pehmeämmät koeotokset saavat helpommin huonoja tuloksia. Kirjallisuusosuudessa esitetty kuva 11 näyttää, kuinka tulokset huononevat lastuamisnopeuden kasvaessa. Virhetekijän poistamiseksi on kovuutta vastaavaa lastuamisnopeutta muutettava. Tulosten perusteella tämä tarkoittaisi sitä, että pehmeämpien koeotosten lastuamisnopeuksia laskettaisiin. Asian voi kääntää myös toisin päin: onko kovilla koeotoksilla liian alhainen lastuamisnopeus? Pitäisikö kovien otosten kohdalla lastuamisnopeutta siis nostaa? Paras ratkaisu voisi olla kovuus-lastuamisnopeuskuvaajan kulmakertoimen muuttaminen. Ennen kuin tällaisiin toimenpiteisiin ryhdytään, on otettava tarkemmin selvää, johtuvatko huonot tulokset juuri kovuus-lastuamisnopeuskorrelaation virheestä vai onko kyseessä jokin muu virhetekijä.

Toisena virhetekijänä mainittiin edellä (12.1) kovuuden mittauksessa esiintyvät virheet. Kovuuden mittaamisesta syntyvät virheet ovat varmasti varsin pieniä, koska vaikka mittaajia on useita, he ovat kokeiden suuren määrän vuoksi rutinoituneita mittausten tekemiseen. Myös teelmästä otetun ja pyörötangosta otetun koekappaleen välillä syntyvät kovuuserot ovat kokeen lopputuloksen kannalta melko mitättömiä, koska nuorrutusterästeelmät lämpökäsitellään haluttuun, kokeen kannalta edulliseen kovuuteen. Teelmästä otettu kappale joutuu kovuuden mittauksen jälkeen moneen työvaiheeseen, joiden aikana koekappale kuumenee ja jäähtyy, jolloin kovuus luonnollisesti muuttuu jonkin verran, mutta ei merkittävästi. Jos tämä pieni virhe halutaan eliminoida, voidaan kovuuslaikka sahata vasta kulmienpyöristysjyrsinnän jälkeen tai vasta pyöristyssorvauksen jälkeen. Nykyistä käytäntöä kuitenkin puoltaa se, että kovuuslaikan sahaus on helpointa suorittaa samalla kun teelmästä otetun koekappaleen päät oikaistaan. Laikan sahaus jyrsinnän jälkeen vielä onnistuisi aika helposti, mutta pyöristyssorvauksen jälkeen koekappale jouduttaisiin irrottamaan sorvista, mikä saatuun hyötyyn nähden aiheuttaisi turhan paljon lisätyötä.

Kolmantena virhelähteenä mainittiin teräpalan rikkoutuminen. Teräpalan rikkoutuminen heti kokeen alussa tuottaa lastuttavuuskokeessa nollatuloksen, vaikka teräs saattaisikin

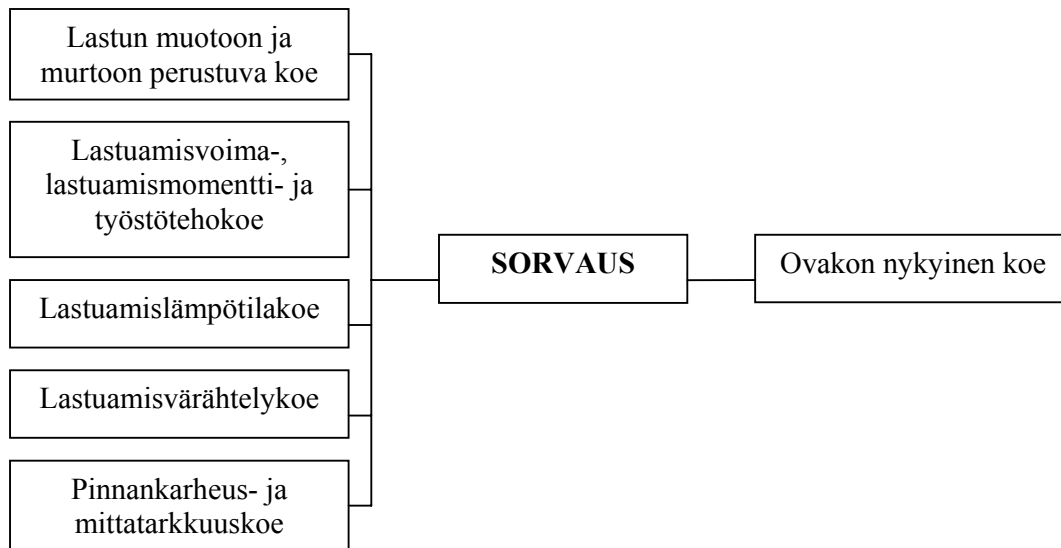
täyttää laatukriteerit. Syynä teräpalan rikkoutumiseen heti kokeen alussa voi olla lastuamisvoimien nopea kasvu nollasta täyteen lastuamisen arvoon. Terän nirkko ”törmää” työkappaleeseen ja murtuu. Teräpalan rikkoutuminen voidaan estää käyttämällä kokeen alussa alhaisempaa syöttöä tai a-mittaa. Näin välttyttäisiin terän rikkoutumiselta kokeen alussa ja aiheettomilta nollatuloksilta.

Neljäntenä virhelähteenä tuotiin esille kuoppa- ja viistekulumisten mittaamisessa tapahtuvat virheet. Kovuuden mittauksen tapaan teräpalan kuoppa- ja viistekulumista mittaa useampi henkilö, mikä voi aiheuttaa eroja mittaustuloksiin eri mittaajien välillä. Erot ovat kuitenkin melko pienet mittaajien rutiinin vuoksi. Mittausvirheiden eliminoimiseksi voitaisiin käyttää uudempaa mittalaitteistoa, mikä estäisi mittaajista tulevat erot ja mittausvirheet. On kuitenkin mietittävä tapauksittain saavutetaanko tällaisella investoinnilla investoinnin arvoiset edut.

Yhdeksi huomioitavaksi seikaksi mainitaan lisäksi jalostuserot teelmästä otetun ja valmiista pyörötangosta otetun koekappaleen välillä. Teelmästä näyte otetaan logististen syiden vuoksi, joten ei ole mahdollista muuttaa prosessia niin, että näyte otettaisiin aina pyörötangosta. Teelmästä otettu koekappale lisäksi lämpökäsitellään ennen koetta, jolloin koekappaleen ominaisuudet ovat todella lähellä pyörötangon ominaisuuksia. Kokeen luotettavuuden kannalta ei siis ole suurta merkitystä, missä vaiheessa prosessia näyte otetaan.

12.3 M_q -kokeen kehittäminen muiden kokeiden avulla

Vaikka nykyiseen kokeeseen liitettäisiin koetta parantavia muita ominaisuuksia, on silti luvussa 12.1 esitetyt ongelmat ja virhetekijät ratkaistava kuten edellisessä luvussa on tehty. Nykyistä koetta voidaan kehittää lisäämällä siihen muita lastuttavuutta mittaavia koemuotoja. Kuvan 31 kaavio kuvaa M_q -kokeeseen liitettäviä ominaisuuksia. Muiden kokeiden tuloksia voidaan käyttää tukena nykyisin saatavien tulosten rinnalla. On myös mahdollista, että luovuttaisiin nykyisestä käytännöstä mitata kuoppa- ja viistekulumista ja siirryttäisiin mittaamaan jotakin muuta materiaalin lastuttavuudesta riippuvaa muuttujaa.



Kuva 31. Ovakon M_q -kokeeseen mahdollisesti lisättävät muut kokeet.

12.3.1 Lastun muotoon ja murtoon perustuva koe

M_q -kokeessa rutiinitehtävien (teräpalan kulumisen mittaus) lisäksi sorvaustapahtumasta kirjataan tavallisesta poikkeavat asiat laatuajestelmään, joten käytännössä nykyiseen kokeeseen sisältyy jossain määrin myös lastun muodon ja murron arvioimista. Systemaattista ja tarkkaa arviointia ei kuitenkaan ole. Lastuttavuuskokeita Ovakolla tekevän koneistaja Tero Ahokkaan kanssa käydyn keskustelun pohjalta M-teräksillä esiintyy joskus ei-toivottua katkeamatonta lastua (Ahokas 2008). Tällaisten poikkeamien kirjaaminen laatuajestelmään on perusteltua. Siten olisi myös mahdollista arvioida M-teräksen lastuttavuutta hiukan tarkemmin. Lisäksi voitaisiin tehdä havaintoja, onko katkeamattomalla ja huonon M_q -arvosanan saaneella teräksellä yhteyttä toisiinsa. Syynä joskus esiintyvään huonoon lastun murtoon voi olla nykyinen teräpala, joka on ilman lastunmurtajaa, kun taas nykyiset modernit teräpalat on varustettu lähes aina lastunmurtajalla. Huomioitavaa onkin se, että jos M_q -kokeessa lastu katkeaa ilman lastunmurtajaa, katkeaa se myös lastunmurtajan kanssa. Uuden teräpalan valinnassa kannattaakin pohtia, olisiko järkevää valita lastunmurtajalla vai ilman lastunmurtajaa varustettu teräpala.

12.3.2 Pinnankarheus- ja mittatarkkuuskokeet

Lastun muodon ja murronkin arviointi sekä pinnankarheuden ja mittatarkkuuden mittaaminen ovat täysin M_q -kokeen rutiinitoimia tukevia koemuotoja. Kokeen jälkeen voitaisiin pinnankarheus mitata nopeasti ja luotettavasti siihen tarkoitettulla mittarilla. Saatu pinnankarheuden arvo kirjattaisiin laatujärjestelmään, josta olisi helppo vertailla pinnankarheuden ja M_q -arvosanan mahdollista yhteyttä.

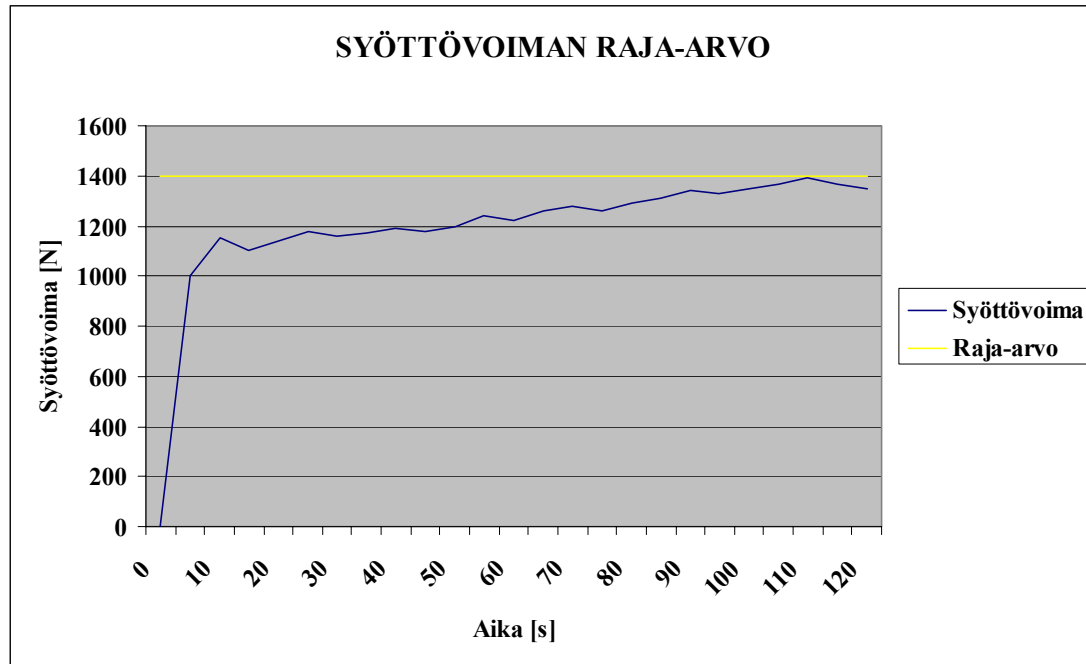
Mittatarkkuuskokeen käyttäminen sen sijaan on vaikeaa, koska lastuttavuuskokeen lopussa jäävän hukkakappaleen halkaisija saattaa vaihdella joka kokeessa sillä koekappaleen aihion mitatkin vaihtelevat. Koekappaleen loppuhalkaisijaa ei tiedetä ilman työläitä laskutoimituksia. Lisäksi mittatarkkuuskoe ei anna informaatiota materiaalin lastuttavuudesta riittävästi, jotta sen käyttö olisi perusteltua.

12.3.3 Lastuamisvoima-, lastuamismomentti- ja työstötehokokeet

Kirjallisuusosuudessa käsiteltiin Artturi Sukkelan aikaisemmin tekemää tutkimusta, jossa oli selvitetty huonosti onnistuneen ja hyvin onnistuneen M-teräksen lastuamisvoimien eroja. Tutkimus osoitti, että huonolla ja hyvällä M-teräksellä on lastuamisvoimissa havaittavissa eroja. Lastuamisvoimien erot ovat kuitenkin varsin pienet, joten luotettavan koejärjestelyn rakentaminen voi olla vaikeaa. Lastuamisvoima-, lastuamismomentti- ja työstötehokoe mittaavat kaikki lastuamisvoimia. Mittaustapa vain on erilainen. M-terästen testaamiseksi soveltuu kuitenkin parhaiten lastuamisvoimakoe, jossa käytetään venymäliuskoja tai pietsosähköisiä voima-antureita, koska ne ovat herkkiä voiman muutoksille. (Sukkela 2000, 1–5)

Lastuamisvoimat ovat hyvin riippuvaisia teräksen kovuudesta. Yhden teräslajin sisällä voivat kovuudet vaihdella huomattavasti standardin sallimissa rajoissa. Tämä merkitsee sitä, että jos lastuamisvoimien mittaukseen perustuvaa koetta halutaan käyttää, pitää yhden teräslajin sisällä olla useita kovuudesta riippuvia raja-arvoja. Raja-arvot määräävät joko kokeen onnistumisen tai epäonnistumisen. Raja-arvon ylittyessä lastuamisvoimat ovat liian suuret eikä materiaali täytä M-teräkseltä vaadittavia kriteereitä. Kuvassa 32 on

kuvitteellinen esimerkki tietyn teräslajin tietylle kovuudelle laaditusta raja-arvosta ja päälastuamisvoiman kuvaajasta.



Kuva 32. Esimerkki kuvaajasta, jossa syöttövoima on jäänyt alle raja-arvon, joten testattu materiaali läpäisee kokeen.

Kirjallisuusosuudessa todettiin, että kokeita tehdään aktiivisesti noin kymmenelle eri teräslajille. Jokaisen teräslajin sisällä kovuus voi vaihdella noin 30 HB. Yhden teräslajin sisällä pitäisi siis määrittää 30 raja-arvoa. Kun koe tehdään aktiivisesti noin 10 teräslajille, raja-arvoja täytyy määrittää 300. Näin menetellen tarvittaisiin suuri määrä työtä, aikaa ja rahaa kaikkien raja-arvojen määrittämiseksi. Järkevämpi ja helpompi tapa määrittää raja-arvot on käyttää siihen kokeellisesti laadittua kaavaa. Kaavaan syötetään teräksen laji ja kovuus, jonka perusteella tietokone laskee voiman hylätty–hyväksytyy-raja-arvon. Tarkempi kuvaus kaavan määrittämisestä on seuraavassa luvussa ja kuvassa 33.

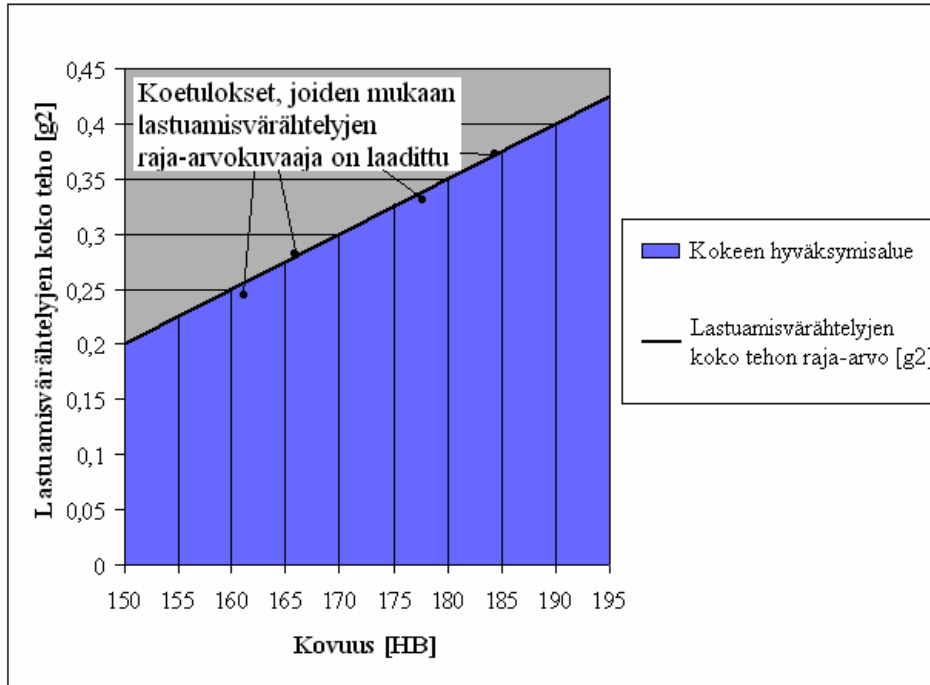
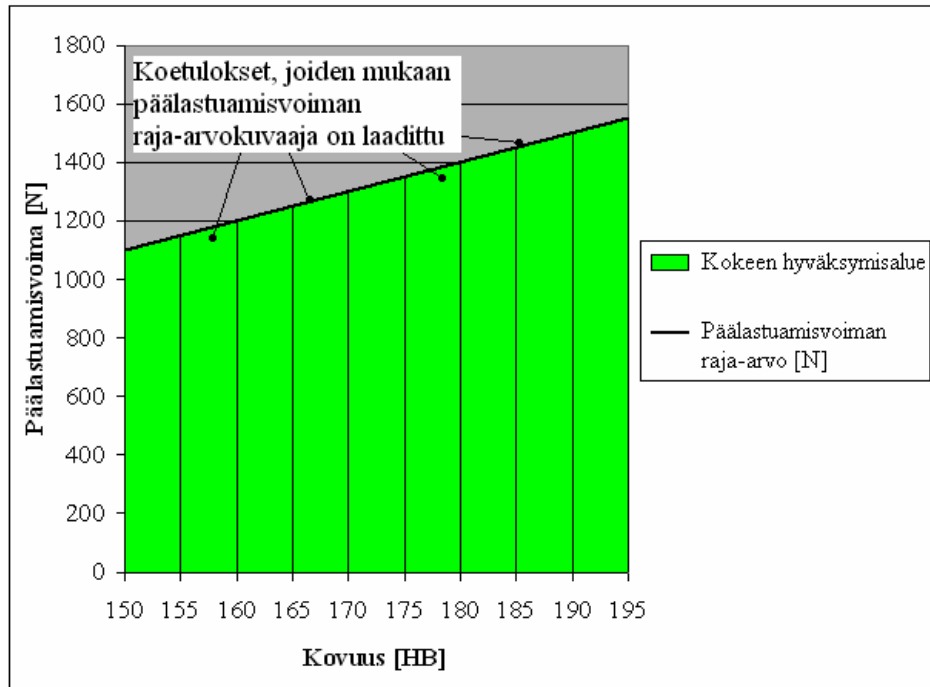
Kirjallisuusosuudessa käsitellyssä aiemmin tehdyssä Sukkelan tutkimuksessa esitettiin, että M-terästä lastuttaessa lastuamisvoimat voivat vaihdella merkittävästi eri teräspaloilla niiden geometrian ja pinnoitteen mukaan. Mikäli lastuamisvoimia halutaan mitata, tämä seikka on otettava huomioon uutta teräspalaa valittaessa. Jos voimien mittaus liitetään M_q -kokeeseen, se voisi olla aluksi vain tukevana tekijänä lastuttavuuden testaamisessa. Tällä tavoin

kerättäisiin tietoa lastuamisvoimien ja M_q -arvosanojen korrelaatiosta sekä saataisiin tärkeää tietoa hylätty–hyväksyty-raj-arvojen määrittämisessä käytettävän kaavan laatimiseksi. Jos havaittaisiin, että huonommilla M_q -arvosanoilla lastuamisvoimat ovat aina suuremmat, voitaisiin kuoppa- ja viistekulumisen mittaamisesta ehkä luopua kokonaan. Ongelmalliseksi tämän järjestelyn tekee se, että tarvitaan uusi teräpala, ja teräpalan vaihtaminen aiheuttaa muutoksen lastuamisvoimiin. Aluksi nykyinen lastuttavuuskoe, johon on yhdistetty voimien mittausta, voidaan tehdä nykyisellä teräpalalla ja kerätä näin dataa lastuamisvoimista. Kun uusi teräpala löytyy, voidaan saadut raja-arvot tai raja-arvojen määrittäyskaava kertoa korjauskertoimella siten, että ne pätevät myös uuteen teräpalaan. Teräpalan vaihdosta aiheutuvat muutokset M_q -kokeeseen tehdään, kuten luvussa 12.2.1 on kerrottu.

12.3.4 Lastuamisvärähtelykoe

Lastuamisvärähtelyjen mittaamiseen perustuvan kokeen lisääminen M_q -kokeeseen noudattelee samaa kaavaa kuin voimien mittaukseen perustuvassa kokeessa. Nämä kaksi koetta voitaisiinkin liittää yhdessä nykyiseen kokeeseen, jolloin ne tukisivat koetuloksia ja myös toisiaan. Kirjallisuusosuudessa käsitelty aiempi tutkimus osoittaa, että värähtelyjen mittauksella pystytään erottelemaan varsin hyvin laadullisesti huono ja hyvä M-teräs toisistaan.

Lastuamisvärähtelyt ovat lastuttavan materiaalin kovuudesta riippuvaisia, joten lastuamisvärähtelyille on määritettävä raja-arvot hylätty–hyväksyty kuten lastuamisvoimissakin. Eroja lastuamisvärähtelyihin aiheuttaa myös materiaalin mikrorakenteen epähomogeenisuus. Lastuamisvärähtelyissä värähtelyiden koko tehon mittauksella oli kokeissa saavutettu suurimmat erot huonon ja hyvän M-teräksen välillä. Perusteltua onkin määrittää raja-arvot vain värähtelyn koko tehon arvoille. Kuvassa 33 on esimerkki teräslajille X laadituista lastuamisvoimien ja -värähtelyjen hylätty–hyväksyty-raj-arvoista ja periaate raja-arvokuvaajan määrittämisestä.



Kuva 33. Esimerkki lastuamisvoimien ja -värähtelyjen raja-arvokuvaajien ja kokeen hyväksymisalueen määrittämisestä.

Kuvassa pisteet, joiden perusteella kuvaajat on piirretty, määritetään kokeellisesti. Pisteiden määrittäminen on tehtävä eri kovuuksilla ja sellaisella M-teräksellä, joka läpäisee juuri ja juuri laatuvaatimukset. Tällöin kuvaajan alle jäävä alue on hyväksymisalue, jossa koe on

hyväksytyt, ja M-teräs täyttää laatuvaatimukset. Kuvaajille pystytään määrittämään yhtälöt, joiden avulla pystytään määrittämään tietyn teräslajin jokaiselle kovuudelle lastuamisvärähtelyjen tai -voimien raja-arvot hylätty–hyväksytyt. Näin saadaan laadittua suhteellisen helposti kaikille teräslajeille kovuutta vastaavat hyväksymisrajat.

Kirjallisuusosuudessa esitellyssä tutkimuksessa lastuamisvärähtelyjen yhteydessä oli selvitetty eri teräspalojen vaikutusta värähtelyjen suuruuteen. Kuten voimienkin kohdalla, on teräspalalla vaikutusta värähtelyjen suuruuteen. Tämä on otettava huomioon, jos M_q -kokeeseen liitetään voimien- ja värähtelyjen mittaus. Uuden teräspalan on toimittava molemmissa kokeissa.

12.3.5 Lastuamislämpötilakoe

Sukkelan tutkimuksessa on todistettu, että myös lastuamislämpötilat poikkeavat onnistuneen ja epäonnistuneen Ca-käsittelyn välillä (Sukkela 2000, 89–93). Sakari Rupin kanssa käydyn keskustelun perusteella lastuamislämpötilakoe kuitenkin pitäisi unohtaa, koska siihen liittyy lukuisia epävarmuustekijöitä (Ruppi 2008). Jos koetta kuitenkin halutaan käyttää, pitää raja-arvot hylätty–hyväksytyt määrittää voimien ja värähtelyjen mittaamiseen perustuvien kokeiden tapaan. Juuri tämä saattaa olla lastuamislämpötilakokeen suurin ongelma. Esimerkiksi kokeen aloituslämpötiloissa eri kokeiden välillä voi olla suuria eroja, jotka luonnollisesti aiheuttavat poikkeamaa loppulämpötilaan. Lämpötila-anturointi (termopari) ei ole kovin kallis, joten sen voisi liittää lastuamisvoimien ja -värähtelyjen mittaamisen rinnalle ja katsoa pystytäänkö sitä hyödyntämään lastuttavuuden arvioinnissa. Kalliimpina vaihtoehtona on hankkia infrapunakamera, jolla lastuamisprosessia pystytään kuvaamaan ja näin määrittämään teräspalan, lastujen ja koekappaleen lämpötilat. Tämä on mahdollista toteuttaa myös lastuamisprosessin aikana. Lastuttavuuskokeita Ovakolla tekävän koneistaja Tero Ahokkaan mukaan koekappale on kokeen jälkeen erittäin kuuma, jos koe on epäonnistunut (Ahokas 2008). Sen sijaan kokeen onnistuessa koekappaleesta jääneen hukkapalan pystyy nostamaan sorvin istukasta paljain käsin. Koekappaleen infrapunakuvaamisella pystyttäisiin mittaamaan sen lämpötilaa ja mahdollisesti määrittämään M-käsittelyn onnistuminen.

12.3.6 Porausko

Nykyiseen kokeeseen on mahdollista liittää myös porausko. Ovakon sorveissa ei ole pyöriviä työkaluja, joten reikä on porattava koekappaleen keskiöön. Porana voidaan käyttää tavallista kierukkaporaa tai kääntöpalaporaa (U-pora). Porausko voidaan suorittaa esimerkiksi sorvauksen jälkeen. Lastuamisen mittarina voidaan käyttää lastun murtoa, porausvoimaa tai/ja ääntä. Porausko tukisi varsinaisesta sorvaamalla tehtävästä kokeesta saatuja tuloksia.

12.3.7 Teräpalan kuoppa- ja viistekulumisen mitta

Aiemmin käsitellyt lastuamisvoimien, -värähtelyjen ja -lämpötilan mittaamiset kertovat epäsuorasti, kuinka nopeasti ja kuinka paljon teräpala kuluu. M_q -kokeessa teräpalan kuoppa- ja viistekulumista mitataan työkalumikroskoopilla ja mittakellolla. Kirjallisuusosuudessa käsiteltiin myös konenäön hyödyntämistä teräpalan kuluneisuuden mittauksessa. Mahdollista olisi, että sorvin sisään asennettaisiin 3D-kamera, jolla teräpalan kuoppa- ja viistekulumisen saataisiin nopeasti määritettyä. Nykyisin manuaaliseen mittaukseen menee noin viisi minuuttia, joten kalliin konenäölaitteiston hankkiminen ei liene järkevää.

12.4 Kooste M_q -kokeen kehittämistä

Edellisten lukujen pohjalta voidaan koota tärkeimmät kehitysideat ja niiden pohjalta laatia nykyiseen M_q -kokeeseen pohjautuva uusi lastuttavuusko. Yksinkertaisimmillaan uusi ko on samanlainen kuin nykyinen ko, mutta ko on muutettu toimimaan erilaisella teräpalalla ja koetuloksiin virhettä aiheuttavat tekijät on poistettu. Kuitenkin M_q -kokeen rinnalle kannattaisi liittää muita lastuttavuuden mittareita. Seuraavien koemuotojen lisääminen olisi perusteltua:

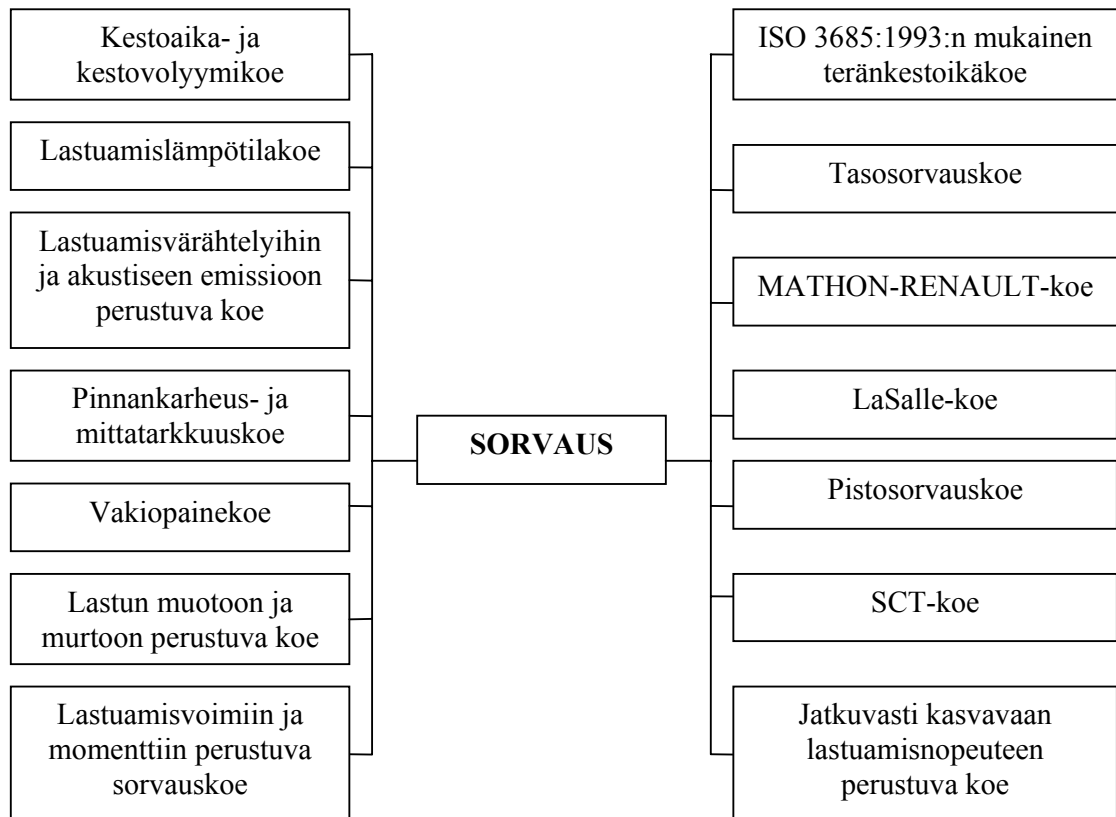
- Lastun muodon ja murron sekä pinnankarheuden arvioiminen ja kirjaus laatujärjestelmään.

- Värähtelyjen mittauksen ja tietyin varauksin myös voimien mittauksen lisääminen.
- Porauskokeen lisääminen sorvauskokeen loppuun lastun murron ja porausvoimien arvioimiseksi (varauksella).

Onnistuneen ja epäonnistuneen M-teräksen välisten lastuamisvärähtelyiden ja -voimien eroja on tutkittu liian vähän, jotta niiden avulla lastuttavuuskoe pystyttäisiin muodostamaan välittömästi. Aluksi voitaisiin nykyisen lastuttavuuskokeen rinnalla koesorvauksissa mitata lastuamisvärähtelyjä ja -voimia. Myös porauskokeen yhdistämiseksi voitaisiin laatia koejärjestelyt. Koetulosten pohjalta voitaisiin tehdä päätös, kannattaako lastuamisvärähtelyihin ja -voimiin sekä poraukseen perustuvaa koetta lähteä kehittämään. Jos värähtelyjen ja voimien mittaamisen sekä porauskokeen avulla saadaan luotettavia tuloksia, kuoppa- ja viistekulumisen mittaamisesta voidaan mahdollisesti luopua kokonaan ja vaihtaa nykyinen teräpala esimerkiksi nykyaikaiseen pinnoitettuun kovametalliteräpalaan.

13 TOINEN KOEVARIAATIO PISTOSORVAUSKOE

Kuvassa 34 on kaavio, jonka avulla muodostetaan toinen koevariaatio. Kaaviossa on kaikki kirjallisuusosuudessa käsitellyt koemuodot, joita voidaan käyttää sorvauskokeessa. Yksi sorvauskokeen sovellus valitaan rungoksi, jonka pohjalta laaditaan toinen M-teräksen laatua mittaava koevariaatio. Valinnan nopeuttamiseksi ja helpottamiseksi vertailu koemenetelmien paremmuudesta tehdään arvoanalyysillä. Kaaviossa esitetyistä kokeista lastuamislämpötilakoe, pinnankarheus- ja mittatarkkuuskoe sekä lastun muotoon perustuva koe jätetään vertailun ulkopuolelle, koska ne eivät yksistään riitä todistamaan M-käsittelyn onnistumista. Kyseiset koemuodot voivat kuitenkin olla rungoksi valitun kokeen tuloksia tukevin kokeina. Diplomityön aikana mietittiin, kuinka rungoksi valittua koetta voidaan kehittää juuri M-teräksen laadun tutkimiseen soveltuvaksi. Koetta voidaan kehittää esimerkiksi muiden koemuotojen avulla.



Kuva 34. Sorvauskokeen eri sovellukset.

13.1 Arvoanalyysi

Arvonanalyysin ensimmäisessä vaiheessa määritellään ominaisuudet, joiden perusteella eri koemuotoja vertaillaan. Seuraavat ominaisuudet valittiin:

- a) kokeen luotettavuus
- b) koeaika
- c) hinta
- d) materiaalinkulutus
- e) käytettävyys

Kokeen luotettavuudella tarkoitetaan, kuinka hyvin ja miten varmasti koe pystyy erottelamaan onnistuneen ja epäonnistuneen M-teräksen. Koeaika on kokeeseen tarvittava kokonaisaika eli myös apuaika ennen varsinaista koetta. Tavoitteena on mahdollisimman lyhyt koeaika sillä työvoimakustannukset ovat kalliit ja kokeeseen käytettävissä oleva aika on rajallinen. Ovako on asettanut kokeen lastuamisosuuden maksimipituudeksi 20 minuuttia, koska kokeen on oltava luonteeltaan pikakoe. Hinnalla tarkoitetaan investoinnin suuruutta, kuinka kallis on koejärjestely (osat ja asennus) rakentaa. Materiaalinkulutuksessa pyritään tarvittavan koemateriaalin mahdollisimman vähäiseen käyttöön. Raja-arvoksi Ovako on asettanut M_q -kokeessa käytettävän koekappaleen koon. Käytettävyydellä mitataan kokeen käytön helppoutta ja sitä tarvitaanko kokeen suorittajalta erityisosaamista. Kokeen kannalta parasta olisi, että se ei riippuisi käyttäjästä ja hänen ammattitaidostaan.

Ominaisuuksien painokertoimet saadaan parivertailun avulla, joka on esitetty taulukossa 7. Ominaisuuksia vertaillaan keskenään ja merkittävämpi ominaisuus saa aina yhden painokerroinpisteen. Lopullinen painokerroin on kaikkien painokerroinpisteiden summa.

Taulukko 7. Ominaisuuksien painokertoimen määrittäminen parivertailun avulla.

Ominaisuus	a) Kokeen luotettavuus	b) Koe- aika	c) Hinta	d) Materiaalin- kulutus	e) Käytet- tävyys	Paino- kerroin P
a) Kokeen luotettavuus	a	a	a	a	a	9
b) Koeaika	a	b	b	d	b	5
c) Hinta	a	b	c	d	e	1
d) Materiaalin kulutus	a	d	d	d	d	7
e) Käytettä- vyys	a	b	e	d	e	3
Painokertoimien summa ΣP						25

Kun painokertoimet on määritetty, tehdään varsinainen kokeiden vertailu. Kokeille annetaan arvosana $a = 1-5$ sen mukaan, kuinka hyvin ne täyttävät kyseisen ominaisuuden. Kyseisen ominaisuuden painokertoimella P kerrotaan kokeen saama arvosana a . Saadut tulot summataan yhteen ja jaetaan painokertoimien summalla, jolloin saadaan vertailuluku K . Suurimman K -luvun saanut koe valitaan kehitettävän kokeen rungoksi. K -luvun yhtälö on muotoa

$$K = \frac{\sum a \times P}{\sum P} \quad (6)$$

Sorvauskokeiden vertailu (arvoanalyysi) on taulukossa 8. Kokeiden vertailun helpottamiseksi taulukkoon on sijoitettu myös Ovakon nykyinen M_q -koe, joka toimii referenssitasona. M_q -kokeen arvosanat a on asetettu arvoon 3. Vertailtavia kokeita verrataan tähän arvoon jokaisen ominaisuuden suhteen. Jos esimerkiksi jonkin kokeen luotettavuus on huonompi kuin M_q -kokeen, se saa arvon 1 tai 2, yhtä hyvä saa arvon 3 ja

jos luotettavuus on parempi, on arvosana 4 tai 5. Kokeiden keskinäinen vertailu on osittain vaikeaa, koska ilman käytännön kokeita ei tiedetä tarkalleen, miten hyvin kokeet soveltuvat M-teräksen laadun testaamiseen. Etenkin kokeiden luotettavuuden vertailu on vaikeaa. Kokeiden joukosta ne kokeet, joissa lastutaan paljon, ovat useasti luotettavampia kuin kokeet, joissa lastuaminen on vähäistä. Vastaavasti, jos lastutaan paljon, kuluu useasti paljon koeaikaa ja -materiaalia. Arvioitavista sorvauskokeista SCT-koe, jatkuvasti kasvavaan lastuamisnopeuteen perustuva koe, LaSalle-koe ja ISO 3685:1993:n mukainen terän kestoikäkoe ovat kokeita, joissa lastutaan paljon ja joissa myös koeaikaa ja -materiaalia kuluu paljon. Tavoitteena on, että valittava koe on pikakoe (kesto max 20 min) ja tarvittavan koemateriaalin tarve on mahdollisimman pieni, joten tämä on nähtävissä näiden kokeiden kohdalla arvoanalyysin tuloksissa. Lisäksi on muistettava Ovakon asettama raja-arvo materiaalin määrälle, joka on nykyisessä kokeessa käytettävä määrä. Tämän perusteella pitäisi sulkea pois kaikki kokeet, joissa lastutaan paljon.

Luotettavuuden vertailussa on pyritty miettimään sitä, miten koe pystyy erottelemaan laadullisesti hyvän ja huonon M-teräksen. ISO 3685:n mukainen koe ja SCT-koe ovat lähes identtiset, mutta erona on se, että SCT-koe jäljittelee todellisia lastuamisolosuhteita. Kirjallisuusosuudesta käy ilmi, että SCT-koe ei pysty erottelemaan yhtä hyvin M-teräksen ja tavallisen teräksen eroja. Tämän vuoksi luotettavuusarvosanat poikkeavat niin paljon näiden kokeiden välillä. Luotettavuusarvosanoissa merkille pantavaa on myös pistosorvauskokeen hyvä arvosana. Pistosorvauskokeen etuna on herkkä teräpala, jolla pystytään sorvaamaan normaaleilla lastuamisparametreilla 15 minuuttia kuitenkin siten, että materiaalia kuluu vähän. Pistosorvauskokeen saamia luotettavuuden ja materiaalinkulutuksen hyviä arvosanoja voidaankin perustella edellä mainituilla seikoilla.

Hinnan arvioiminen eri kokeiden välillä on helpompaa. Arvioitavat kokeet eivät vaadi kovin suuria investointeja, jos ne toteutetaan mahdollisimman yksinkertaisesti. Hinnan arvioinnissa lastuamisvärähtelyiden ja -voimien mittaukseen perustuvat kokeet saavat heikomman arvosanan kuin muut. Syynä tähän ovat antureiden, tietokoneohjelman ja muiden tarvittavien varusteiden hinta ja asennuksesta aiheutuvat kustannukset.

Käytettävyyden arvioinnissa vertailtavat kokeet ovat varsin tasaväkisiä. Heikomman arvosanan saamisen yhtenä perusteena on, että osa kokeista tarvitsee erityisosaamista.

Esimerkiksi lastuamisvärähtelyiden ja -voimien mittaukseen perustuvat kokeet vaativat kokeen käyttäjältä kykyä analysoida saatuja tuloksia. Nämä kokeet voidaan toki laatia tietokoneen ja tulosten arviointiin soveltuvan ohjelman avulla sellaisiksi, että tulokset ovat nähtävissä yksiselitteisesti tietokoneen kuvaruudulta. Tämä aiheuttaa arviointiin osittain ristiriitaisuutta ja virhemahdollisuutta. Toisena käytettävyyden arviointikriteerinä on pidetty kokeen helppokäyttöisyyttä ja vaivattomuutta. Kokeet, joissa on monta työvaihetta ja jotka ovat kestoltaan pitkiä, saavat myös huonommat käytettävyyden arvosanat.

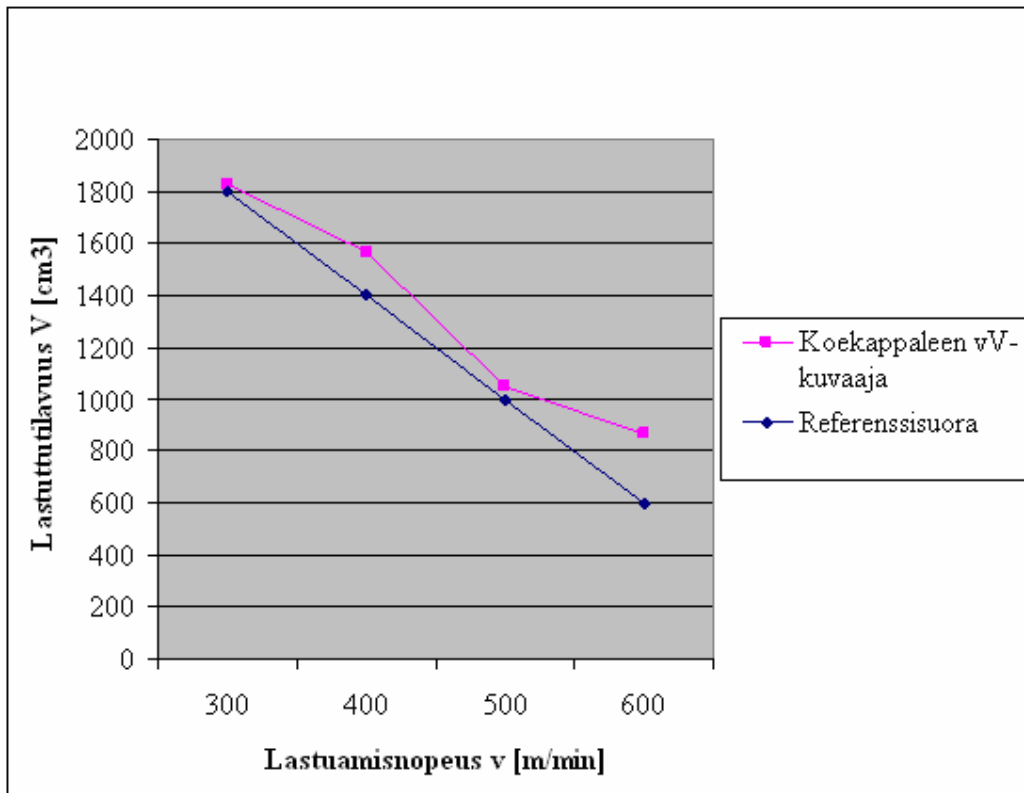
Taulukko 8. Toisen koevariaation valitseminen.

Koe	a)	b)	c)	d)	e)	K-luku
	Kokeen luotettavuus	Koe-aika	Hinta	Materiaalin kulutus	Käytettävyys	$K = \frac{\sum a \times P}{\sum P}$
	Painokerroin P					
	9	5	1	7	3	
Arvosana a 1–5						
Ovakon M _q -koe (referenssitaso)	3	3	3	3	3	3,00
Kestoaja- ja kestoalokymikoe	3	3	3	3	3	3
Lastuamisvärähtelyihin ja akustiseen emissioon perustuva koe	2	5	1	5	2	3,40
Jatkuvasti kasvavaan lastuamisnopeuteen perustuva koe	4	2	3	3	2	3,04
Lastuamisvoimiin ja momenttiin perustuva sorvauskoe	1	4	2	4	2	2,6
ISO 3685:1993:n mukainen terän kestoajakoe	5	1	3	1	2	2,64
Tasosorvauskoe	2	3	3	4	3	2,92
MATHON-RENAULT-koe	1	4	3	4	2	2,64
LaSalle-koe	4	1	3	1	2	3,00
Pistosorvauskoe	4	3	3	4	3	3,64
SCT-koe	3	1	3	1	2	1,92

Suurimman K-luvun sai pistosorvauskoe. Sen pohjalta kehitetään toinen koevariaatio.

13.2 Toisen koevariaation periaate

Pistosorvauskokeen etuna muihin kokeisiin nähden on, että pienellä koemateriaalimäärällä pystytään lastuamaan terävalmistajan suosittelimilla lastuamisparametreilla 15 minuuttia. Tällöin päästään sellaisiin lastuamisolosuhteisiin, joita käytetään normaalissa teollisessa tuotannossa. Kirjallisuusosuudessa esitetyssä pistosorvauskokeessa koekappaleeseen pistosorvataan terän rikkoutumisesta riippuen 20–100 uraa, minkä jälkeen lasketaan lastuttu materiaalitylisyys. Koe toistetaan vähintään kolme kertaa eri lastuamisnopeuksilla, minkä jälkeen muodostetaan kuvaaja lastuamisnopeus-lastuttu materiaalitylisyys. Saatua kuvaajaa verrataan referenssisuoraan ja näin pystytään määrittämään, täyttääkö materiaali sille asetetut laatuvaatimukset. Kuvassa 35 on esitetty kuvitteellinen esimerkki koekappaleelle pistosorvauskokeella laaditusta vV-kuvaajasta.



Kuva 35. Koekappaleelle piirrettyä vV-kuvaajaa verrataan referenssisuoraan. Jos kuvaaja on referenssisuoran yläpuolella, koe on hyväksytty.

Koetta voidaan yksinkertaistaa siten, että mitataan lastuttujen urien määrää lastutun tilavuuden sijaan, minkä jälkeen voidaan muodostaa kuvaaja lastuamisnopeus-lastuttujen urien määrä. Tällöin säästyttäisiin lastutun materiaalitylavuuden laskemiselta. Tässä tapauksessa koekappaleen halkaisijan on oltava aina vakio, jotta yhdellä pistolla poistettavan ainemäärän tilavuus on kokeesta riippumatta sama. Jos koekappaleen mitat muuttuvat kokeesta toiseen, on viisainta mitata lastuttua tilavuutta sorvattujen urien lukumäärän sijaan. Jos koetta halutaan yksinkertaistaa ja nopeuttaa, käytetään vain yhtä teräpalaa, jolloin koe tehdään vain kerran. Tosin tällöin kokeen luotettavuus saattaa kärsiä. Tässä tapauksessa voidaan M-käsittelyn onnistumista arvioida pistosorvauskokeessa kolmella tavalla:

1. Lastutaan aina sama materiaalitylavuus. Eri teräslajeista ja kovuuksista johtuvat erot huomioidaan aivan kuten M_q -kokeessakin. Jokaista teräslajia ja kovuutta vastaa siisti tietty lastuamisnopeus. Koe on onnistunut, jos teräpalan viistekuluminen ei ylitä kokeen lopussa määritettyä arvoa. Teräs, joka saa pienimmät kulumisen arvot, on parasta lastuttavuudeltaan.
2. Käytetään teräksen lajista ja kovuudesta riippuvaa lastutun materiaalitylavuuden raja-arvoa hylätty–hyväksytty ja muut parametrit pidetään vakiona. Koe on onnistunut, jos tilavuuden raja-arvo ylittyy ennen asetettua kulumiskriteeriä tai terän loppuun kulumista.
3. Lastutaan aina sama materiaalitylavuus ja mitataan teräpalan viistekuluminen tiettyin säännöllisin väliajoin. Tulosten perusteella piirretään viistekulumisen kuvaaja ajan funktiona. Kuvaajan avulla lastuttavuutta pystytään arvioimaan.

Jos käytetään ensimmäistä tai kolmatta vaihtoehtoa, on eri teräslajeille ja kovuuksille määritettävä kokeessa käytettävät lastuamisnopeudet. Lastuamisnopeuksien määrittäminen tehdään kokeellisesti laaditun kaavan perusteella. Vastaavasti toisessa tapauksessa käytetään myös kokeellisesti laadittua kaavaa, mutta kaavalla määritetään teräksenlajia ja kovuutta vastaava lastutun materiaalitylavuuden raja-arvo hylätty–hyväksytty.

13.3 Terän ja teränpitimen valinta

Pistosorvauskokeeseen soveltuu periaatteessa neljä erityyppistä teräpalaa: katkaisuterä, uransorvausterä, muotosorvausterä tai yleissorvausterä. Pistosorvauskokeessa sorvataan uria, joten uransorvausterä on järkevin valinta, mutta myös katkaisuterä voi olla varteen otettava vaihtoehto. Muototerän etuna on, että kokeessa ei välttämättä tarvitse pistosorvata, koska muototerällä pystyy sorvaamaan myös pitkittäissuunnassa. Silloin lastuamiskoe ei olisi enää varsinaisesti pistosorvauskoe, mutta kokeen periaate olisi kuitenkin muilta osin sama kuin tavallisessa pistosorvauskokeessa. Muototerällä tehtävässä kokeessa käytettäisiin pistosorvauskokeen tapaan terävalmistajan suosittelemia lastuamisparametreja, jolloin koe vastaisi normaaleja teollisuudessa käytettäviä lastuamisolosuhteita.

Terän valinnassa oleellista on terän kestoikä. Terän tyyppi ja lastuamisparametrit tulisi valita niin, että terä kestää 20–100 pistoa. Onkin mietittävä, kannattaako valita heikompi teräpala vahvan sijaan, jotta terä saataisiin kulumaan nopeammin. Näin säästettäisiin koeaikaa ja -materiaalia. Terägeometrian määrää se, millaisia uria halutaan sorvata. Terän leveys vaikuttaa terän kestoon ja koemateriaalin kulutukseen. Uransorvaus- ja katkaisuterien leveys vaihtelee yleensä 1,5 mm:stä 8,00 mm:iin. Kapea teräpala olisi materiaalin kulutuksen kannalta edullinen, mutta alttiimpi värähtelyille, ja vaarana voi myös olla liian nopea rikkoutuminen. Materiaalinkulutukseen, terän kestoikään, terän tyyppiin ja teränpitimeen vaikuttaa sorvattavien urien syvyys. Sorvattavan uran syvyyttä rajoittaa myös koekappaleen halkaisija. Noin 20 mm:n syvyyteen saakka löytyy monia erilaisia terätyyppejä, terän leveyksiä ja teränpitimiä. Pistosorvauskokeen kannalta noin 20 mm:n urasyvyys on varmaankin sopiva. Tällöin koekappaleen halkaisijan on oltava vähintään noin 60 mm, jotta koekappale ei mene liian ohueksi urien kohdalta ja jotta näin pystytään säilyttämään vakiolastuamisnopeus koko piston ajan.

Teränpidin voi olla joko varsimallinen tai katkaisulehti yhdistettynä lehdenpitimeen. Varsimalliset teränpitimet soveltuvat paremmin uransorvausterälle, muotosorvausterälle ja yleissorvausterille, kun taas katkaisulehti on parempi katkaisuterille. Teränpitimen valintaan vaikuttaa se, kuinka urat koekappaleeseen sorvataan. Jos urat ovat aivan vierä

vieressä, teränpidin ei rajoita sorvattavan uran syvyyttä ja tällöin pistot voivat olla syvyydeltään mielivaltaisia. Jos taas urat sorvataan siten, että urien väliin jää ehjä kannas, teränpidin rajoittaa uran syvyyttä, sillä teränpidin voi ottaa kiinni koekappaleeseen. Katkaisulehti–lehdenpidin-yhdistelmällä päästään suurempiin syvyyksiin kuin perinteisellä varsimallisella pitimellä.

13.4 Muiden kokeiden lisääminen pistosorvauskokeeseen

Pistosorvauskokeesta saatavien koetulosten tueksi voidaan pistosorvauskokeeseen liittää muita lastuttavuutta mittaavia kokeita. Pistosorvauskokeeseen ei pystytä järkevästi liittämään kovinkaan montaa muuta koemuotoa, mutta esimerkiksi lastuamisvärähtelyjen ja -voimien mittaamiseen sekä lastun muotoon perustuvien kokeiden lisääminen on mahdollista. Lastun muodon ja murron arvioiminen kokeen yhteydessä on helppoa eikä se vaadi lisäinvestointeja. Lastuamisvärähtelyjen ja -voimien mittaamisella ei välttämättä saada mitään lisäarvoa. Pistosorvauskokeessa teräpala saatetaan sorvata loppuun kulumiseen saakka. Lastuamisvärähtelyjen ja -voimien mittaus antaa tietoa lähinnä terän kuluneisuudesta ja rikkoutumisesta. Jos koneistaja voi huomata terärikon, ei värähtelyjen ja voimien mittaus tässä mielessä anna lisäarvoa. Sen sijaan jos värähtelyjen ja voimien mittauksella voidaan erottaa onnistunut ja epäonnistunut M-teräs pistämisvaiheessa, silloin niiden liittäminen pistosorvauskokeeseen on perusteltua. Ongelmana kuitenkin voi olla yhden sorvauspiston lyhyt kesto, jolloin riittävän informaation saaminen voi olla vaikeaa. Esimerkiksi 100 mm halkaisijaltaan olevaan koekappaleeseen 25 mm syvää uraa pistettäessä syötön arvolla 0,20 mm/r ja lastuamisnopeuden arvolla 150 m/min aikaa kuluu noin 10 sekuntia. Kokeen aikana tulee siis 20–100 kymmenen sekunnin jaksoa, joiden aikana on kyettävä analysoimaan lastuamisvärähtelyjen ja -voimien suuruus ja vaihtelu.

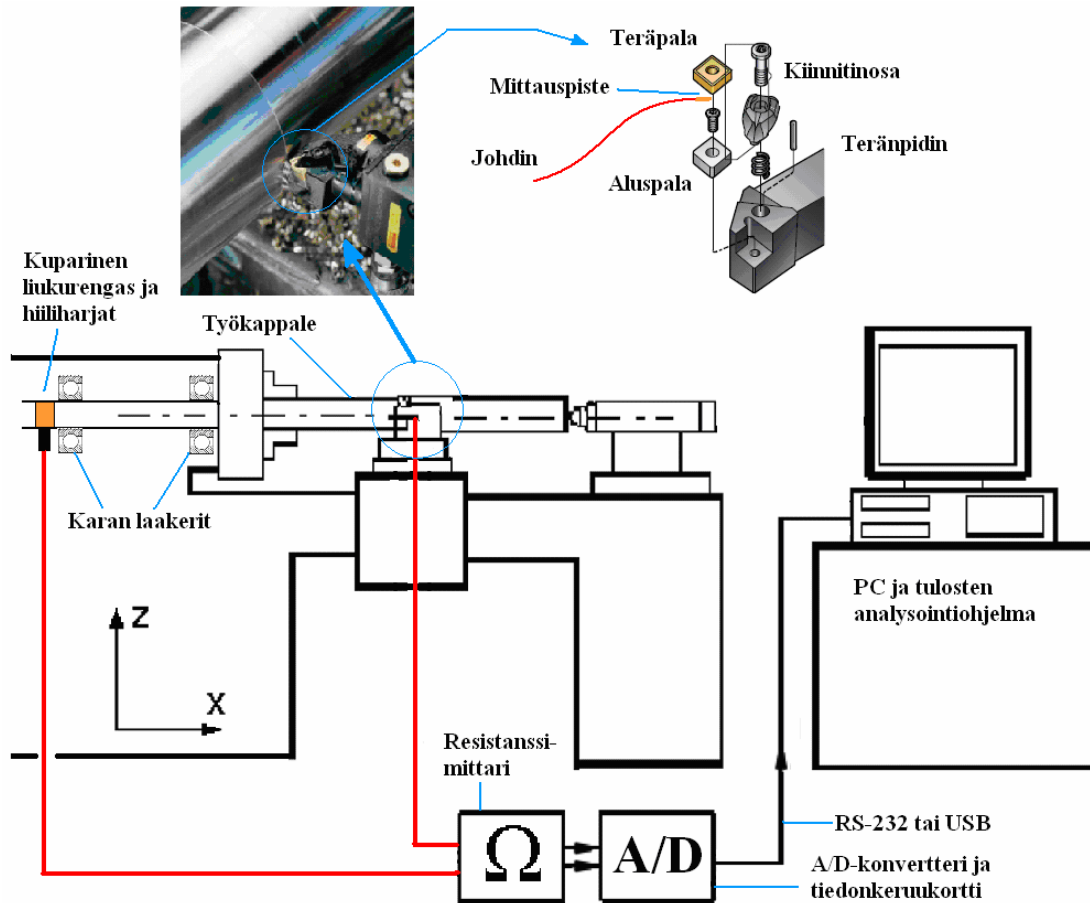
14 KOLMAS KOEVARIAATIO RESISTANSSIIN PERUSTUVA KOE

Työn edetessä on muotoutunut lastuttavuuskokeeksi uusi idea, josta ei aikaisempaa tutkimustietoa paljoa löydy. Kokeessa käytetään keraamisella aineella pinnoitettua kovametalliteräpalaa. Kokeen periaate perustuu pinnoitteen ja sydänmateriaalin erilaiseen sähkönjohtavuuteen. Useat keraamiset pinnoitemateriaalit, kuten Al_2O_3 ja ZrO_2 ovat eristeitä, kun taas sydänmateriaalina käytettävä kovametalli johtaa sähköä (Accuratus 2008; Hydro Carbide 2008). Kokeessa mitataan koekappaleen ja teräpalkan sydänmateriaalin välistä resistanssia. Pinnoitteen kuluessa resistanssi pienenee ja näin pystytään arvioimaan terän kulumista. Tällaista koetta ei siis tiettävästi ole aikaisemmin kokeiltu, joten tarkoituksena on herättää ajatuksia hiukan erilaisesta koejärjestelystä.

14.1 Kokeen periaate ja koejärjestelyjen kuvaus

Kuvassa 36 esitetään koekappaleen ja terän väliseen resistanssiin perustuvan kokeen periaate ja koelaitteisto. Resistanssin mittaamiseksi on valittava kaksi mittauspistettä. Toisen mittauspisteistä täytyy olla mahdollisimman hyvässä sähköisessä kontaktissa koekappaleeseen. Tämän vuoksi sorvin karan akseliin on asennettava kuparinen liukurengas ja hiiliharjat, joihin asennetaan resistanssimittarista tuleva johdin. Jos johdin asennettaisiin sorvin runkoon, jännite kulkisi koekappaleeseen karan laakereiden kautta ja aiheuttaisi siksi virhettä mittaustulokseen. Toinen resistanssimittarista tuleva johto asennetaan teräpalaan siten, että se on kontaktissa vain teräpalkan sydänmateriaaliin eli kovametalliin. Jotta kontakti kovametalliin saataisiin, on teräpalasta poistettava keraaminen pinnoite siltä kohtaa, johon johdin asennetaan. Johdin voidaan asentaa esimerkiksi teräpalkan ja teränpitimen väliin. Eristäminen on tehtävä huolellisesti, jotta sähköinen kontakti on vain johtimen ja teräpalkan välillä. Resistanssimittarista lähetettävän jännitteen on oltava riittävän suuri, jotta resistanssi saadaan mitattua riittävän luotettavasti. Resistanssimittarista saatu signaali johdetaan A/D-muuntimeen ja tiedonkeruukorttiin, minkä jälkeen tietokoneen ymmärtämässä muodossa oleva signaali voidaan siirtää tietokoneelle RS-232- tai USB-väylää pitkin. Myös langaton siirto on mahdollinen, mutta lastuamismeste, kuumat lastut, koneen signaalia eristävä vaikutus (Faradayn häkki) ja

laitteiston suojaaminen voivat olla este tällaisen järjestelmän käyttöönotolle. Tietokoneessa signaali muutetaan siihen soveltuvalla ohjelmalla kuvaajaksi, jossa resistanssin suuruus on ajan funktiona.



Kuva 36. Koekappaleen ja teräpalan väliseen resistanssiin perustuvan lastuttavuuskokeen periaate.

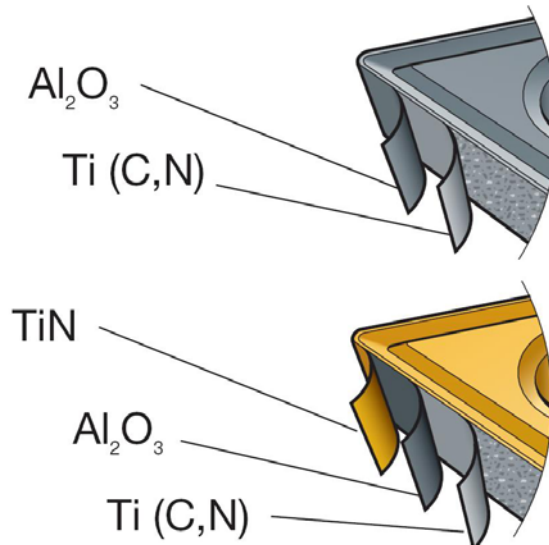
Terän kuluessa keraaminen pinnoitemateriaali (eriste) kuluu. Pinnoitteen ohentuessa resistanssi vähenee eli virta pääsee kulkemaan helpommin koekappaleen ja terän sydänmateriaalin välillä. Pinnoitteen kuluessa puhki pinnoitteen eristävä vaikutus häviää ja resistanssi laskee huomattavasti. Kokeessa materiaalin lastuttavuutta voidaan arvioida kahdella eri tavalla:

1. Mitataan lastuamisaikaa, kunnes resistanssi on laskenut tiettyyn raja-arvoon. Saatua lastuamisaikaa verrataan referenssiaikaan, minkä jälkeen voidaan arvioida, täyttääkö materiaali sille asetetut lastuttavuusvaatimukset.
2. Vaihtoehtoisesti sorvataan tietty vakioaika, minkä jälkeen mitataan resistanssi. Saatua resistanssia verrataan resistanssin referenssitason ja näin materiaalin lastuttavuusominaisuudet saadaan määritettyä.

Itse lastuamistapahtuma voidaan toteuttaa siten, että lastuamisnopeus, lastuamissyvyys ja kenties myös syöttö vaihtelevat koko ajan, jolloin koe saadaan vastaamaan teollisuudessa käytettyjä lastuamisolosuhteita. Lastuamisparametrien vaihtelun pitää kuitenkin tapahtua aina samalla tapaa, jotta koetulokset ovat vertailukelpoisia.

14.2 Teräpalan valinta

Kokeen toimiminen riippuu suuresti teräpalasta. Kuvassa 37 on esitetty kaksi Sandvikin teräpalaa, joista ylempi luultavasti soveltuu kokeeseen paremmin, koska sen päällimmäinen pinnoitemateriaali Al_2O_3 (alumiinioksidi) on eriste (Bandorf, Biehl, Lüthje & Stint, 2004, 134). Alemman teräpalan pinnoiterakenne on hyvin tyypillinen pinnoitetuissa kovametalliteräpaloissa. Ongelmaa kuitenkin saattaa aiheuttaa päällimmäinen sähköä johtava TiN-kerros (Titanium Nitride) (Bandorf, et al. 2004, 134). Resistanssimittarista tulevan johtimen asentamiseksi on teräpalasta siis jostain kohtaa poistettava kaikki pinnoitekerrokset (hionta). Tässä vaiheessa on vaarana, että päällimmäinen sähköä johtava TiN-kerros ja alin sähköä johtava Ti (C, N)-kerros pääsevät kontaktiin. Jos sähköä johtavat kerrokset pääsevät kontaktiin, tulokset ovat epäluotettavia. Kuvassa olevalla ylemmällä teräpalalla ei tätä ongelmaa ole, mutta sen ongelmana on sen harvinaisuus. Kyseistä pinnoiterakennetta ei ole kovin monessa terämällissä, mikä voi aiheuttaa ongelmia kokeen laadinnassa. Sopivan pinnoitemateriaalin etsiminen vaatii lisäselvitystä.



Kuva 37. Yläkuvassa kokeeseen soveltuva teräpala, jonka ylin Al₂O₃-pinnoite on eriste. Alakuvan päällimmäinen TiN-pinnoite voi vaikeuttaa kokeen laadintaa (Sandvik Coromat 2002, K14).

Kirjallisuusosuudessa on käsitelty M-terästen laadun selvittämiseksi lastuamisvoimien, -lämpötilan ja -värähtelyjen mittaamista. Resistanssin mittaamisen lisäksi kokeeseen voitaisiin mahdollisesti liittää myös jokin näistä menetelmistä. Tutkimuskirjallisuuden mukaan lastuamisvoimat, -lämpötila ja -värähtelyt ovat riippuvaisia käytetystä teräpalasta. Sen tähden teräpalan valinnassa on huomioitava myös, kuinka hyvin se soveltuu esimerkiksi lastuamisvärähtelyjen mittaamiseen perustuvaan kokeeseen.

14.3 Edut, ongelmat ja mahdollisuudet

Koekappaleen ja teräpalan välisen resistanssin mittaamiseen perustuvan kokeen suurimpana ongelmana on, että ei tiedetä, toimiiko tällainen koe käytännössä. Jos koe toimii käytännössä, on sillä seuraavia etuja:

- Halpa koelaitteisto
- Edulliset käyttökustannukset
- Kokeella pystytään jäljittelemään teollisuudessa käytettyjä lastuamisolosuhteita.
- Mahdollisuus soveltaa työstönvalvonnassa (terän kulumisen arviointi).

Koska kyseistä koejärjestelmää ei tiettävästi ole aikaisemmin tutkittu, siihen liittyy paljon avoimia ja epävarmoja seikkoja:

- Mitä eristeen resistanssille tapahtuu lämpötilan noustessa?
- Mikä teräpala ja pinnoitemateriaali soveltuvat kokeeseen parhaiten?
- Aiheuttaako johdinten asennus ongelmaa? (Esimerkiksi johtimen asennus teräpalaan ja johtimen reititys teränpitimestä työkalurevolverin kautta resistanssimittariin.)
- Kuinka otetaan huomioon kovuuden vaihtelut saman teräslajin sisällä?

15 UUSIEN KOKEIDEN TESTAUSSUUNNITELMA

Edellä esitettyjen kolmen koevariaation soveltuvuudesta M-teräksen testaukseen ei ole täyttä varmuutta. Siksi on suunniteltava koejärjestely, jolla uusia kokeita pystytään testaamaan. Tässä luvussa esitellään koejärjestely, jolla Ovako pystyy valitsemaan M-teräksen testaukseen soveltuvat kokeet. Koejärjestelyn tavoitteena on löytää M-teräksen testaamiseen soveltuvat kokeet. Kolmas koevariaatio on aivan uusi, ja siihen liittyy liian paljon epävarmuustekijöitä, joten sitä ei oteta mukaan suunniteltavaan koejärjestelyyn. Ensimmäisessä koevariaatioissa M_q -kokeeseen on suunniteltu liitettäväksi

1. pinnankarheuden mittaus
2. lastuamisvärähtelyjen mittaus
3. lastuamisvoimien mittaus
4. mahdollisuuksien mukaan myös porauskoe.

Toinen koevariaatio on pistosorvauskoe, jonka toimivuus testataan samassa koejärjestelyssä. Tavoitteena on, että pystytään tekemään normaali M_q -koe ja kaikki edellä mainitut kokeet samassa koejärjestelyssä ja yhdellä koekappaleella. Mikäli kaikkia kokeita ei samalla kappaleella pystytä tekemään, porauskoe jätetään testauksen ulkopuolelle ja se voidaan tehdä tarvittaessa erillisellä koekappaleella. Koejärjestelyn tavoitteena on saada yhteys M_q -arvosanojen ja muista kokeista saatavien tulosten välille. Koejärjestelyn virhe mahdollisuutena on M_q -kokeen luotettavuus ongelmat, minkä takia kokeita on tehtävä paljon. Kun koejärjestely on toistettu riittävän useasti ja tuloksia saatu riittävästi huonoille ja hyvälle M_q -arvosanoille, pystytään erottelemaan kokeet, joilla hyvä ja huono M-teräs voidaan luotettavasti erotella. Kun M-teräksen testaukseen soveltuvat kokeet on löydetty, voidaan niitä alkaa kehittää M-teräksen testaukseen soveltuviksi lastuttavuuskokeiksi.

15.1 Koejärjestely

Koemenetelmien testaamiseksi on suunniteltava koejärjestelyn kulku. M-teräksen lastuttavuutta mittaavien kokeiden testaus jaotellaan seuraaviin vaiheisiin:

1. normaali M_q -koe yhdistettynä lastuamisvärähtelyjen ja -voimien mittaukseen sekä pinnankarheuden mittaukseen
2. pistosorvauskoe vierä viereen tehtävillä pistoilla
3. porauskoe koekappaleen keskiöön (optio)

Kokeiden toimivuuden testaamiseksi suunniteltu koejärjestely on kuvattu tarkasti seuraavissa luvuissa ja liitteissä V, VI ja VII.

15.1.1 Ensimmäinen koevaihe lastuamisvärähtely-, lastuamisvoima- ja pinnankarheuskokeiden testaus

Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan M_q -koe ja samalla mitataan lastuamisvärähtelyt ja syötön suuntainen ominaisvoima. Ensimmäisen vaiheen lopuksi mitataan kappaleen pinnasta pinnankarheus. Oletuksena on, että huonon M_q -arvosanan saavat M-teräkset saisivat suuremmat lastuamisvärähtelyjen ja -voimien arvot. Vastaavasti hyvillä M_q -arvosanoilla lastuamisvärähtelyjen ja -voimien arvojen pitäisi olla pienemmät. Jos saadaan aikaan eroja värähtelyihin ja voimiin huonon ja hyvän M-teräksen välillä, voidaan niitä alkaa kehittää lastuttavuuskokeiksi. Luonnollisesti testauskertoja on oltava riittävästi, jotta saadaan riittävä varmuus kokeiden toimivuudesta. Myös saatua pinnankarheutta verrataan M_q -arvosanaan ja niiden välistä yhteyttä pyritään arvioimaan. Ensimmäinen koevaihe on kuvattu liitteessä V.

15.1.2 Toinen koevaihe pistosorvauskokeen testaus

Terän valmistajat ovat antaneet suosituksia lastuamisparametreista, joilla lastuttaessa teräpala kestää 15 minuuttia. Pistosorvauskokeen etuna onkin, että voidaan lastuta 15 minuuttia pienellä koemateriaalimäärällä. Näin pistosorvauskoe vastaa teollisuudessa käytettyjä lastuamisolosuhteita. Jotta 15 minuutin lastuamisaikaan päästään normaaleilla lastuamisparametreilla, on lastuttavan materiaalityyppisyyden oltava pistosorvauskokeessa noin 800–1600 cm³ (luku 15.2 kuvat 38 ja 39). Lastuttavaan materiaalityypin vaikuttavat piston syvyys, terän leveys ja terän kestoikä eli pistojen määrä.

Pistosorvauskokeen kannalta olisi hyvä, jos kokeessa olisi käytettävissä mahdollisimman paljon koemateriaalia. Tällöin teräpalan leveys, piston syvyys ja terän kestoikä eivät asettaisi kokeelle niin paljon rajoitteita ja 15 minuutin lastuamisaikaan pystyttäisiin pääsemään monilla erilaisilla lastuamisparametreilla ja teräpaloilla. Koekappaleen pienenä kuitenkin rajoittaa pistosorvauskokeessa käytettävää materiaalityyppiä.

Ensimmäisen vaiheen jälkeen koekappale ei ole tasapaksu, joten ennen pistosorvauskoetta koekappale on sorvattava tasapaksuiseksi. Sen jälkeen koekappale kiinnitetään joko kolmielektrijärjestelmään siten, että osa kappaleesta on karputken sisässä ja noin 60–120 mm:n osuus koekappaleesta on pistosorvattavissa. Vaihtoehtoinen kiinnitystapa on, että pidetään sama kiinnitys kuin M_q -kokeessakin. Ehtona kuitenkin on, että halkaisija–pituussuhde on alle 1:7. Tällä toimenpiteellä pyritään estämään värähtelyjä. Yhden piston syvyydeksi on suunniteltu 20 mm ja pistot tehdään vierekkäin. Piston syvyys voi olla suurempikin, mutta on huolehdittava siitä, että pistot eivät mene liian lähelle koekappaleen keskiötä, jolloin sorvin maksimikierronnopeus rajoittaisi vakio lastuamisnopeuden ylläpitoa. Suurempi piston syvyys asettaa myös lisärajoituksia koekappaleen koolle. Yhtenä vaihtoehtona on, että tehdään pistoja terän loppuun kulumiseen saakka ja lastuttavuuden mittarina käytetään lastuttua tilavuutta. Se materiaali, josta pystytään lastuamaan eniten ennen terän loppuun kulumista, on lastuttavuudeltaan parasta. Toisena mahdollisuutena on, että lastutaan vakiomateriaalityyppiä ja mitataan tiettyin väliajoin terän viistekulumista. Näin saadaan muodostettua viistekulumisen kuvaaja ajan funktiona. Kuvaajan avulla pystytään materiaalin lastuttavuutta vertailemaan siten, että materiaali, jota lastuttaessa terä kuluu vähiten, on lastuttavuudeltaan parasta. Kolmas mahdollisuus on, että mitataan keskimääräinen viistekuluminen vasta kokeen lopussa eli kun on lastuttu tietty materiaalityyppi. Materiaali, joka on kulunut vähiten, on lastuttavuudeltaan parasta. Koejärjestelyn toinen vaihe on kuvattu liitteessä VI.

M_q -kokeen ja pistosorvauskokeen tulosten pitäisi korreloida keskenään. M_q -arvosanan ollessa huono ($M_q < 4$) täytyisi pistosorvauskokeessa lastuttavan materiaalityyppiä olla pieni tai arviointitavasta riippuen pitäisi terän viistekulumisen olla suuri. Vastaavasti M_q -arvosanan ollessa hyvä ($M_q \geq 4$) pitäisi pistosorvauskokeessa pystyä lastuamaan suuri materiaalityyppiä tai vastaavasti terän kulumisarvojen pitäisi olla pienet.

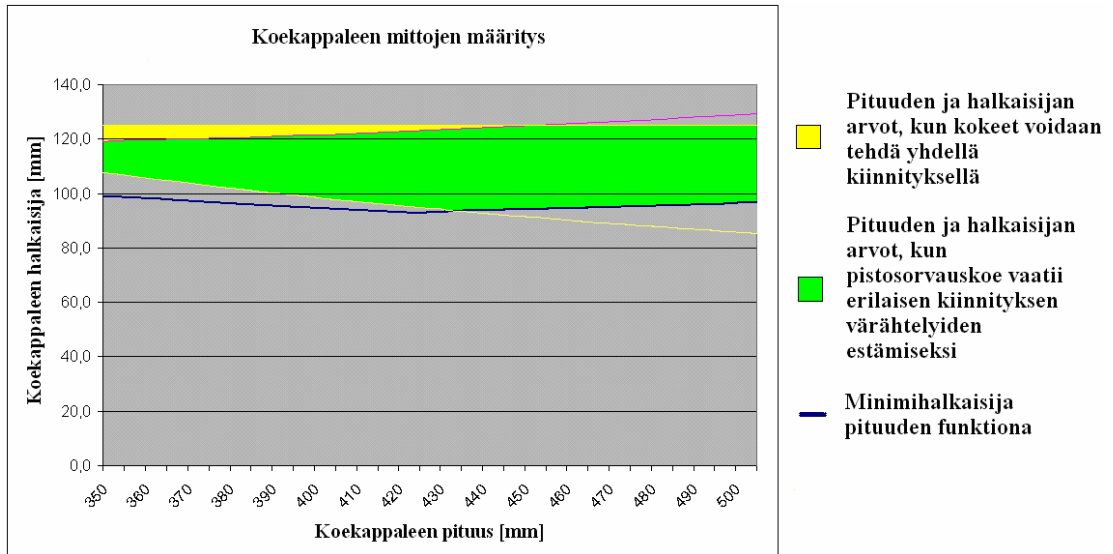
15.1.3 Kolmas koevaihe porauskoe

Kolmannessa vaiheessa eli porauskokeessa koekappale kiinnitetään tukevuuden varmistamiseksi sorvin karaputken sisään (kolmileukaistukkaan). Ennen porauskoetta on koekappaleen otsapinta oikaistava, koska se on epätasainen pistosorvauskokeen jälkeen. Porauskokeessa porataan kappaleen keskiöön reikä. Porauksen aikana lastuttavuutta voidaan arvioida työstöstä syntyvän äänen sekä lastun murron ja muodon perusteella. Kolmas koevaihe on kuvattu liitteessä VII.

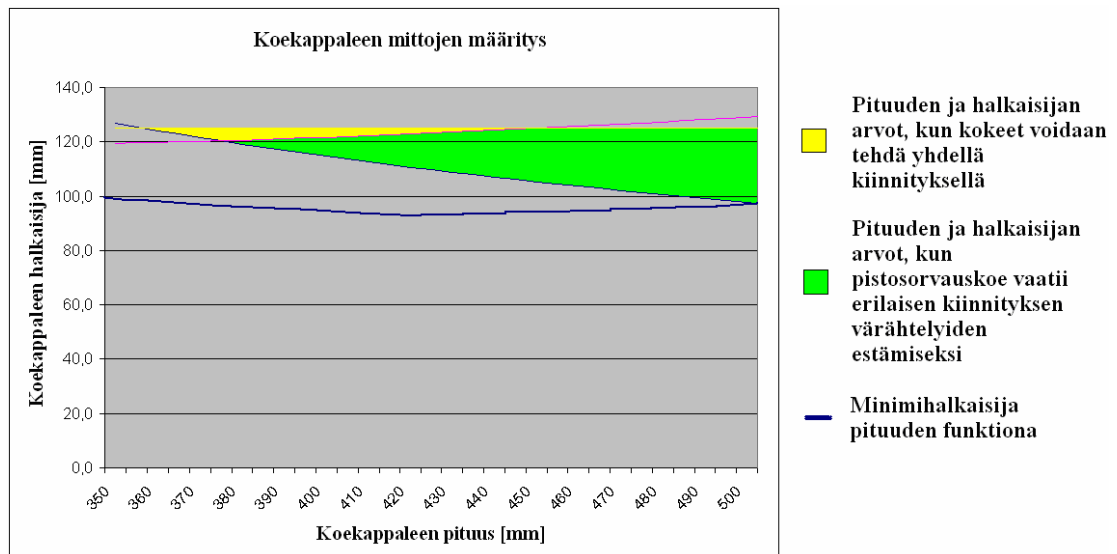
15.2 Koekappale

Kaikkien koemenetelmien testaamiseksi on koekappaleen mittojen oltava sellaiset, että kaikkien kokeiden testaus pystytään suorittamaan. Normaalisissa M_q -kokeissa kappaleen pituus on 300–500 mm ja halkaisija \varnothing 75–125 mm. Koejärjestelyn suunnittelussa täytyy huomioida, että siinä käytettävän koekappaleen mitat eivät saisi poiketa normaalista käytännöstä, koska tällöin koekappale on helppo poimia tuotannosta. Ongelmalliseksi mittojen määrittämisen tekee kolmen lastuavan kokeen yhdistäminen ja koekappaleen aihion mittojen vaihtelu kokeesta toiseen. Kuten edeltä voi päätellä, jokainen koevaihe rajoittaa kappaleen mittoja. Liitteessä VIII on tehty laskelmat koekappaleen mitoista, jotta M_q -koe ja pistosorvauskoe pystytään tekemään samalla koekappaleella. Tarkkoja mittoja ei pystytä määrittämään, koska ei tiedetä pistosorvauskokeessa lastuttavan materiaalitulavuuden tarkkaa arvoa ilman, että tehdään käytännön kokeita sen selvittämiseksi. Liitteessä VIII olevien laskelmien perusteella on kuitenkin koekappaleen lopullinen koko helppo laskea, jos pistosorvauskoe valitaan M-teräksen lastuttavuuskokeeksi. Porauskoetta ei tässä vaiheessa ole otettu huomioon, koska sen testaaminen tehdään samalla koekappaleella vain, jos koekappaleen mitat sen sallivat.

Liitteessä VIII laskettujen arvojen perusteella laadittiin kuvissa 38 ja 39 olevat kuvaajat. Kuvaajien rajaamat alueet näyttävät koekappaleen mittojen sallitut vaihteluvälit kahdessa eri tapauksessa.



Kuva 38. Koekappaleen mitat normaalissa M_q -kokeessa ja pistosorvauskokeessa, jossa lastutaan 1000 cm^3 .

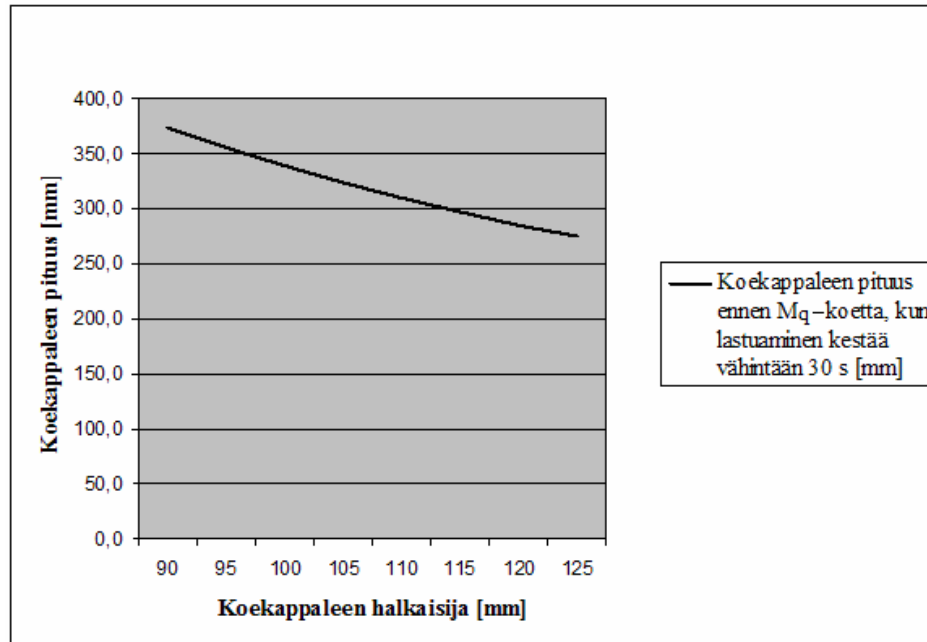


Kuva 39. M_q -koe ja pistosorvauskoe, jossa lastutaan 1500 cm^3 .

Kuvissa 38 ja 39 keltaisella kuvattu alue kuvaa aluetta, jossa koekappaleen mitat saavat vaihdella, kun M_q -koe ja pistosorvauskoe tehdään yhdellä kiinnityksellä. Koekappaleen halkaisija-pituus-suhde pysyy tällöin koko ajan samana tai pienempänä kuin 1:7. Liitteessä VIII, 3 olevassa taulukossa on laskettu arvot, joiden mukaan on piirretty keltaisen alueen raja-arvot. Löytämisen helpottamiseksi nämä arvot ovat liitteen VIII, 3 taulukossa keltaisella pohjalla. Koekappaleen maksimihalkaisija on rajoitettu 125 mm:iin, joten 125

mm on piirrettyjen alueiden ylärajaa. Vihreällä kuvatulla alueella halkaisija–pituus-suhde on yli 1:7, ja koekappale on irrotettava kokeiden välillä ja kiinnitettävä pistosorvauskokeen ajaksi kolmileukaistukkaan siten, että osa koekappaleesta on sorvin karaputken sisässä. Näin varmistutaan riittävästä tukevuudesta. Vihreän alueen arvot on kuvattu liitteessä VIII, 4 vihreällä pohjalla. Kuvien alalaidassa oleva sininen viiva kuvaa halkaisijan minimiarvoa pituuden funktiona (liitteen VIII, 5 taulukossa sinisellä pohjalla olevat arvot). Tämän viivan laskemisessa on huomioitu, että koekappaleen halkaisija–pituus-suhde on vähintään 1:7 M_q -kokeen jälkeen ja että koekappaleen halkaisija on vähintään 60 mm ennen pistosorvauskoetta. Kyseinen kuvaaja ei ota huomioon pistosorvauskokeessa tarvittavaa materiaalitulavuutta. Tämä näkyy kuvassa 40 (pistosorvataan 1500 cm^3), jossa pistosorvauskokeessa tarvittava materiaalitulavuus rajoittaa koekappaleen mittoja. Ylemmässä kuvassa koekappaleen pituudesta riippuva minimi halkaisija rajoittaa kappaleen mittoja. Koekappaleen mitat ja kiinnitystapa pystytään määrittämään tapauksittain joko kuvien tai liitteissä esitettyjen taulukoiden ja kaavojen avulla. Jos kuitenkin halutaan aina olla varmoja siitä, että M_q -koe (värähtelyt, voimat, pinnankarheus) ja pistosorvauskoe pystytään suorittamaan samalla koekappaleella, valitaan koekappaleen pituus väliltä 420–500 mm ja halkaisija väliltä \varnothing 110–125 mm.

M_q -kokeeseen liitettävät lastuamisvärähtelyjen ja -voimien mittaukset asettavat vaatimuksia koekappaleen pituudelle. Lastuamisvärähtelyiden ja -voimien mittaamisen helpottamiseksi yhden lastun sorvaamiseen on kuluttava tarpeeksi aikaa. Hyvänä arvona voidaan pitää 30:tä sekuntia, koska siinä ajassa saadaan mitattua riittävästi tietoa värähtelyiden ja voimien suuruudesta ja vaihteluista. Kuvassa 40 on esitetty koekappaleen pituuden kuvaaja halkaisijan funktiona ennen M_q -koetta, kun lastuamisaika on 30 sekuntia. Alkuarvoina on käytetty M_q -kokeessa käytettävän syötön arvoa 0,4 mm/r ja lastuamisnopeuden arvoa 500 m/min. Tulokset, joiden perusteella kuvaajat on piirretty, ovat liitteessä IX.



Kuva 40. Yhden lastun lastuamiseen kuluvan ajan tarkistaminen.

Kuvasta 40 nähdään likimääräisesti, että kuvaaja leikkaa 350 mm:n arvon halkaisijan arvolla 95 mm. Aikaisemmin esitetyissä kuvissa 38 ja 39 nähdään (sininen viiva), että koekappaleen halkaisija on minimissään noin 95 mm, kun koekappaleen pituus on noin 425 mm. Tämä tarkoittaa sitä, että jos koekappaleen pituus on yli 350 mm, niin M_q -kokeen ensimmäiset lastut kestävät aina yli 30 sekuntia. Tällöin lastuamisvärähtelyiden ja -voimien mittaaminen onnistuu ongelmitta. Koekappale voi kuitenkin olla alle 350 mm pitkä. Yhden lastun lastuamiseen kuluva aika riippuu koekappaleen halkaisijasta. Halkaisija taas on riippuvainen pistosorvauskokeessa tarvittavasta materiaalityluvuksesta ja täten myös koekappaleen pituudesta. Alle 350 mm pitkällä koekappaleilla määräävä tekijä onkin pistosorvauskokeessa lastuttava materiaalitylvyys, joten jos pistosorvauskokeessa lastutaan pieni materiaalitylvyys (800–1000 cm³) ja kappaleen pituus on 300–350 mm, niin valitaan koekappaleen alkuhalkaisija kuvassa 40 esitetyn kuvaajan perusteella.

Jos porauskokeen käyttö lopullisessa lastuttavuuskokeessa nähdään tarpeelliseksi, kannattaa sen soveltuvuus M-teräksen testaamiseen suorittaa erillisellä koekappaleella. Suurimpana ongelmana on, ettei tiedetä tarkasti pistosorvauskokeessa lastuttavaa materiaalitylvyutta, joten ei voida olla varmoja riittääkö koekappaleen materiaali porauskokeen tekemiseen.

16 PISTOSORVAUSKOKEEN TESTAUS

Lyhyessä kokeellisessa osuudessa tarkastelun kohteena oli pistosorvauskokeen soveltuvuus M-teräksen laadun testaukseen. Koelaitteistona käytettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston konepajatekniikan laboratorion Daewoo Puma NC-sorvia, jonka tekniset tiedot ovat taulukossa 9. Koekappaleet saatiin Ovako Bar Oy Ab:n Imatran terästehtaan laatuosastolta. Niille oli jo tehty normaalit M_q -kokeet ja määritetty täten M_q -arvosanat. Koekappaleiden materiaalina käytettiin M-käsiteltyä S355J2-terästä (Imatra 520M, lajikoodi 2723). Lisäksi kokeeseen otettiin mukaan M-käsittelemätöntä Imatra 520-terästä (lajikoodi 2708). Pistosorvauskokeiden tarkoituksena oli selvittää kokeen soveltuvuus M-terästen laadun testaukseen.

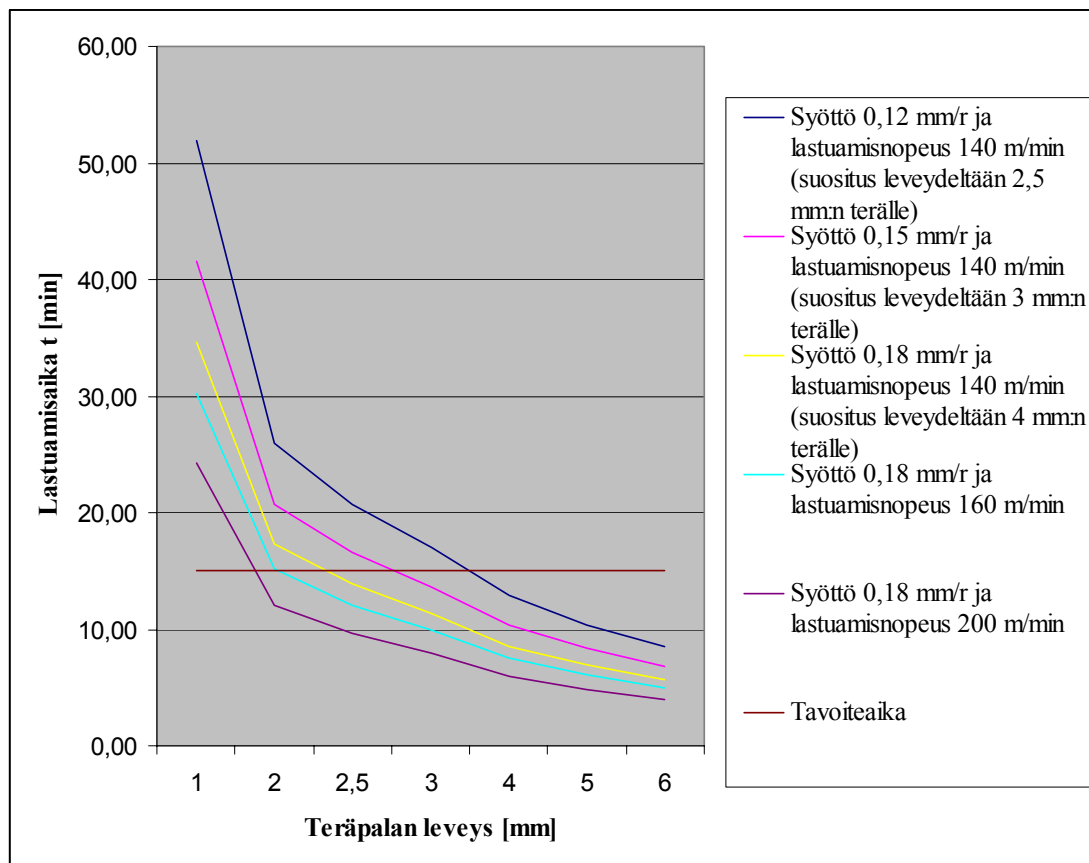
Taulukko 9. Lappeenrannan teknillisen yliopiston NC-sorvin tekniset tiedot (LTY 2008).

NC-sorvin tyyppi	Ohjain	Suurin karan kierrosnopeus [1/min]	Nimellinen karateho [kW]	Max. sorvaus pituus [mm]	Kpl:een max. halk. [mm]	Karaputken halk. [mm]
Daewoo Puma 2500 Y	Fanuc 18iTB	3500	15/22	500	330	75

16.1 Kokeessa käytettävien lastuamisparametrien määrittäminen

Ennen pistosorvauskokeita laaditaan suunnitelma lastuamisparametrien määrittämisestä, minkä tavoitteena on, että kokeen lastuamisaika olisi terävalmistajan suosittelemilla lastuamisparametreilla noin 15 minuuttia. 15 minuutin terän kestoikä on useiden terävalmistajien asettama tavoite. Jotta 15 minuuttia pystytään lastuamaan, koemateriaalia täytyy olla riittävästi. Ongelmallisen tilanteesta tekee se, että saatavilla olevat koekappaleet ovat pituudeltaan lyhyitä (noin 300 mm). Toinen rajoittava tekijä on LTY:n NC-sorvin karaputken halkaisijan pienuus (\varnothing 75 mm), joten koekappale voi ennen pistosorvauskoetta olla halkaisijaltaan enintään 75 mm. Liitteessä X on laskettu materiaalitulavuus, joka

voidaan pistosorvauskokeessa maksimissaan lastuta mitoiltaan 300 x Ø74 mm olevasta koekappaleesta. Tulokseksi saatiin noin 960 cm³. Kun lastuttava materiaalilavuus on selvillä, voidaan muut lastuamisparametrit ja teräpalan tyyppi määrittää siten, että lastuamisaikaksi saadaan noin 15 minuuttia. Lastuamisaikaan vaikuttavat syötön ja lastuamisnopeuden lisäksi piston syvyys ja pistojen määrä (pistoterän leveys). Kuvassa 41 on piirretty erilaisilla syötön ja lastuamisnopeuden arvoilla lastuamisaikan kuvaajia terän leveyden funktiona, kun lastutaan 960 cm³. Kuvaajat on laadittu liitteessä XI esitettyjen taulukoiden perusteella.



Kuva 41. Lastuamisaika teräpalan leveyden funktiona erilaisilla syötön ja lastuamisnopeuksien arvoilla.

Teräpalan valinnassa on pyritty hyödyntämään olemassa olevia resursseja. LTY:llä olevaan pistoterille tarkoitettuun teränpitimeen löytyi Ovakolta sopiva teräpala. Teränpitimen ja teräpalan tyytit ovat taulukossa 10. Oleellista teräpalan valinnassa olisi se, että siihen saataisiin suurempi viestekuluminen huonolla M-teräksellä kuin hyvällä. Tämän työn

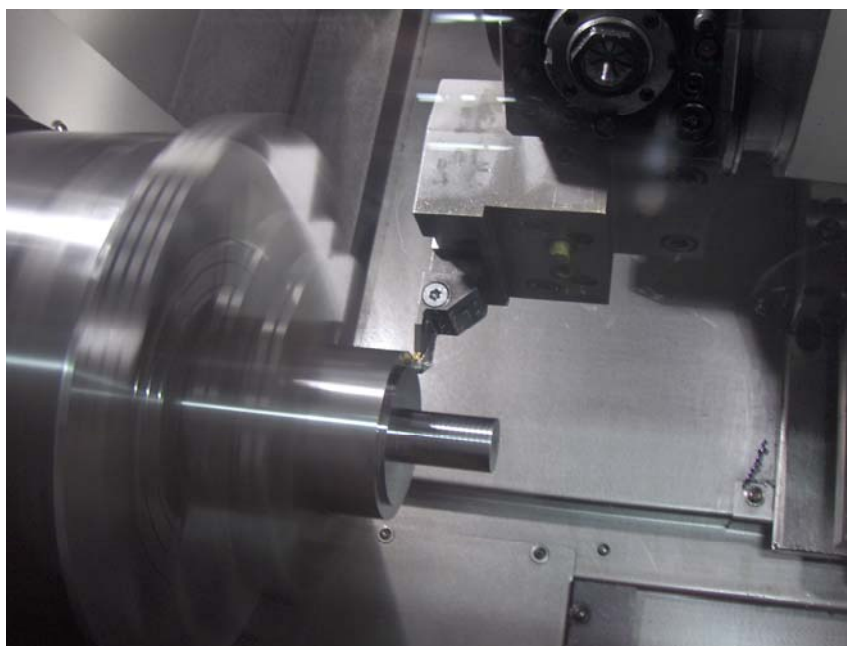
puitteissa ei kuitenkaan ole mahdollista lähteä etsimään juuri oikeanlaista teräpala. Tarkoituksena on vain tutkia pistosorvauskokeen toimivuutta M-teräksen laadun testauksessa. Jos kokeesta saadaan positiivisia tuloksia, siitä voidaan kehittää M-teräksen lastuttavuuskoe diplomityön jälkeen. Kuten kuvan 42 kuvaajista nähdään, ei valitulla terällä (leveys 4 mm) päästä 15 minuutin lastuamisaikaan millään kuvassa esitetyillä syötön ja lastuamisnopeuden arvoilla. Lastuamisaikaa saataisiin lähemmäksi 15:tä minuuttia, jos syöttöä ja lastuamisnopeutta laskettaisiin oleellisesti. Sinisellä piirretty kuvaaja on piirretty käyttämällä Sandvikin Coromat -oppaan valitulle teräpalalle suosittelemia syötön ja lastuamisnopeuden arvoja. Jos lastuamisarvot ovat alhaisempia kuin terävalmistaja suosittelee, ongelmana on, että teräpalaan ei saada kulumaan. Mahdollista kuitenkin on, että teräpalaan 4 mm:n leveydestä käytetään vain esimerkiksi 2,5 mm, jolloin teräpalaan saadaan kulumista helpommin ja nopeammin. Kun tarkastellaan kuvaajaa kohdalta, jossa teräpalaan leveys on 2,5 mm, nähdään lastuamisajan olevan lastuamisparametrien eri arvoilla 15 minuutin molemmin puolin. Järkevää onkin käyttää teräpalaan leveydestä esimerkiksi 2,5 mm, jolloin voidaan käyttää Sandvikin suosittelemia syötön ja lastuamisnopeuden arvoja (kuvaajan keltainen viiva) ja päästään näin lähelle 15 minuutin lastuamisaikoja. Tällöin on myös mahdollista suurentaa lastuamisarvoja ja varmistaa riittävä viistekuluminen.

Taulukko 10. Kokeessa käytettävä teräpala, teränpidin sekä suunniteltu piston syvyys, piston leveys ja lastuttavatilavuus.

Terän malli ja tyyppi	Teränpidin malli ja tyyppi	Piston syvyys [mm]	Piston leveys [mm]	Lastuttava tilavuus [cm³]
Katkaisuterä, Sandvik Coromat N123H-0400-0300-CR 4025 (leveys 4 mm, lastunmurtaja)	Varsimallinen teränpidin LF123H25-2525BM	25	2,5	960

16.2 Kokeen kulku

Kokeet aloitettiin sorvaamalla koekappaleet vakiohalkaisijaan manuaalisorvilla. Lappeenrannan teknillisen yliopiston sorvin karaputken halkaisija on 75 mm, ja koekappaleen piti mahtua sen sisään, joten halkaisijaksi valittiin 74 mm. Sen jälkeen asetettiin ensimmäinen koekappale kiinni sorvin kolmieleukaistukkaan siten, että 70 mm koekappaleesta oli ulkona sorvin karaputkesta. Koekappaleen pää oikaistiin erillisellä teräpalalla ennen jokaista koetta. Pistosorvaus tehtiin vierä vieräen tehtävillä pistoilla siten, että teräpalan 4 mm:n leveydestä käytettiin vain 2,5 mm. Tällä toimenpiteellä pyrittiin nopeuttamaan teräpalan kulumista. Alun perin suunniteltiin, että pistonsyvyys olisi 20 mm, mutta LTY:n sorvin ominaisuudet ja koekappaleen halkaisija mahdollistivat sorvata 25 mm syviä pistoja. Näin saatiin hyödynnettyä koemateriaali tehokkaammin. Pistoja tehtiin 25 kappaletta eli 62,5 mm:n matkalle (kuva 42), minkä jälkeen koekappaleesta katkaistiin hukkaosuus erillisellä katkaisuterällä. Lastuamisnestettä ei käytetty.



Kuva 42. Pistosorvauskoe 2,5 mm leveillä ja 25 mm syvillä pistoilla. Jäljelle jäävä hukkapala katkaistaan erillisellä katkaisuterällä.

25 piston jälkeen sorvi pysäytettiin ja teräpala irrotettiin. Teräpalasta mitattiin standardin ISO 3685:1993 (sivu 17 kuva 7) mukaan keskimääräinen VB_B ja maksimi viistekuluminen

VB_{max} Lappeenrannan teknillisen yliopiston American Optical (Mod. 570 0,7 TO 4,2X) mikroskoopilla ja Mitutoyo (Model: ID-C112B) mittakellolla (kuva 43). Tämän jälkeen koekappaletta siirrettiin ulospäin kolmileukaistukasta 70 mm ja pistosorvattiin jälleen 25 pistoa. Tätä toistettiin niin kauan, että pistoja tuli yhteensä sata kappaletta, jolloin viistekulumisen mittauskertoja tuli yhteensä neljä kappaletta. Lastuamisparametrit valittiin alustavasti Sandvikin Coromat -opasta hyväksi käyttäen valitsemalla kokeessa käytettävälle teräpalalle oppaan suosittelemat syötön ($f = 0,18$ mm/r) ja lastuamisnopeuden ($v = 140$ m/min) arvot (Sandvik Coromat 2002, 111). Valittuja arvoja testattiin sorvaamalla ensimmäinen koekappale. Havaittiin, että viistekulumista ei juuri saatu, joten valittuja lastuamisparametreja päätettiin muuttaa. Uudeksi lastuamisnopeudeksi valittiin 160 m/min ja syöttö pidettiin 0,18 mm:ssä per kierros. Huomattiin, että viistekulumista saatiin heti ensimmäisessä mittauksessa enemmän kuin ensimmäisessä kokeessa neljännellä mittauskerralla. Tämän jälkeen viistekuluminen kuitenkin hidastui oleellisesti ja kolmanteen kokeeseen päätettiin nostaa lastuamisnopeutta 200 m/min. Näillä arvoilla sorvattiin myös neljäs ja viides koe. Viimeiseen kokeeseen lastuamisnopeutta nostettiin 250 m/min. Alustava suunnitelma kokeen suorittamisesta on esitetty luvussa 15.1.2 ja liitteessä VI.



Kuva 43. Työkalumikroskoopi American Optical, mittakello Mitutoyo ja magneetilla tuettu teräpala mittausta varten.

16.3 Tulokset ja analysointi

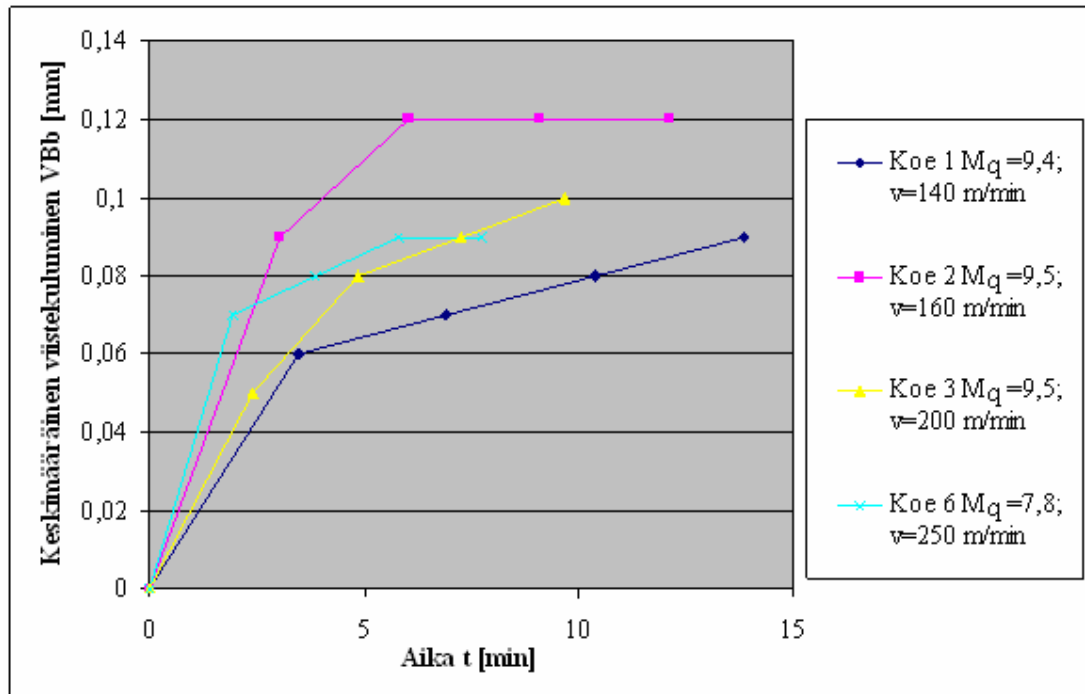
Taulukossa 11 esitetään tiedot koekappaleista. M-teräksillä kovuudet ovat melko samansuuruiset, joten niiden aiheuttamat virheet koetuloksiin ovat M-terästen välillä vähäiset. M-käsittelemätön teräs on huomattavasti pehmeämpää, joten sen lastuaminen on kovuuden perusteella helpompaa.

Taulukko 11. Tiedot koemateriaaleista.

Koe	Teräs		Sulatus	Kovuus [HB]	M _q -arvo-sana
	Ovakon lajikoodi	Standardimerkintä			
1	2723 (M-teräs)	S355J2	717250 XTS	177	9,4
2	2723 (M-teräs)	S355J2	717510 YME	178	9,5
3	2723 (M-teräs)	S355J2	717540 YSR	172	9,5
4	2723 (M-teräs)	S355J2	717550 YTB	183	5,7
5	Normaali Imatra 520	S355J2	227280	149	0
6	2723 (M-teräs)	S355J2	719980 ZRY	170	7,8

Kokeista saadut tulokset on kerätty kokonaisuudessaan liitteessä XII olevaan taulukkoon. Kokeiden lastuamisajat on laskettu liitteessä XI. Lastuamisajat ovat tarkkoja aikoja eli ne mittaavat aikaa, jolloin lastua irtoaa. Sorvin pikaliikkeitä, koekappaleen pään oikaisua ja hukkapalan katkaisua ei siis ole otettu huomioon.

Kuten kokeen kulun kuvauksesta käy ilmi, aluksi etsittiin lastuamisparametreja, joilla saadaan teräpalaan kulumista aikaiseksi. Lisäksi viimeiseen kokeeseen haluttiin lastuamisnopeutta nostaa lähes sorvin maksimipyörimisnopeuden tasolle, koska haluttiin nähdä lastuamisnopeuden vaikutus koetuloksiin. Nämä arvot esitetään kuvassa 44.

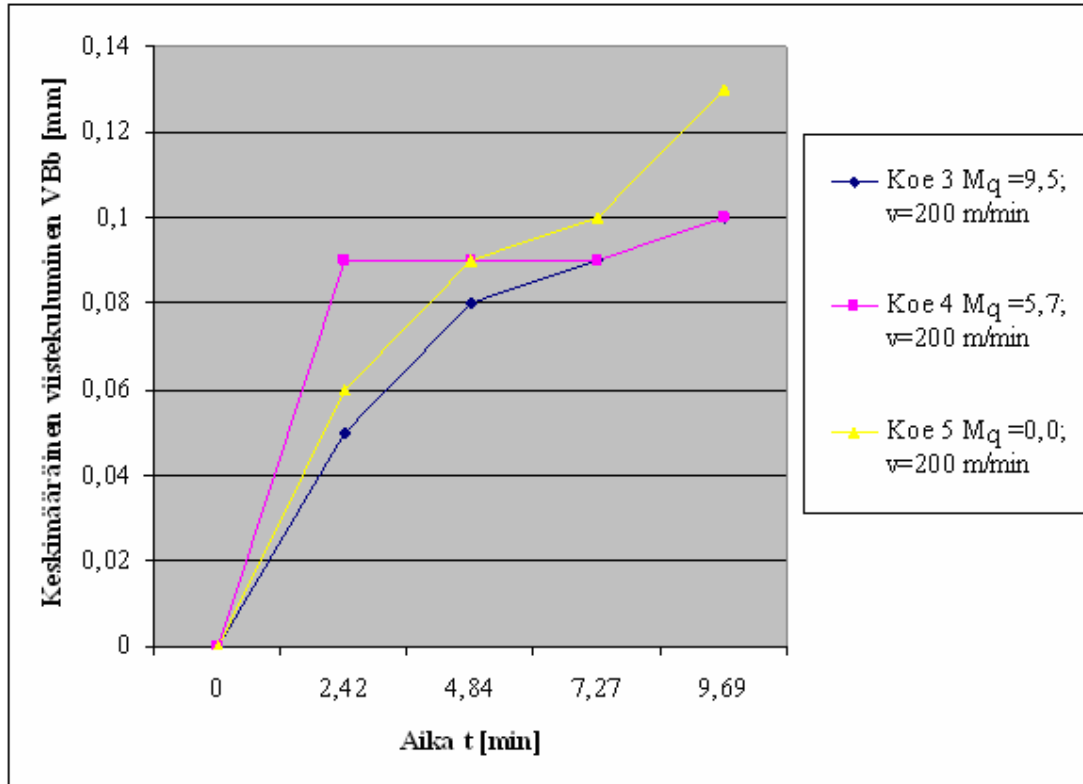


Kuva 44. M-teräksen keskimääräinen viistekuluminen ajan funktiona. Syötön arvona on kaikissa tapauksissa käytetty 0,18 mm/r.

Saaduissa tuloksissa merkitsevä on, että lastuamisnopeudella 160 m/min, saatiin varsin suuret viistekulumisen arvot. Jos lastuamisnopeudella 160 m/min saatuja viistekulumisen arvoja verrataan suuremmilla lastuamisnopeuksilla tehtyihin kokeisiin, tukee tulokset M-teräksen teoriaa. M-teräksestä tehdyissä tutkimuksissa on osoitettu, että M-teräs toimii paremmin suuremmilla lastuamisnopeuksilla. Vastaavasti 140 m/min lastuamisnopeus on niin alhainen, että kulumista ei saada, vaikka teräs olisi M-käsittelemätöntäkin. Mielenkiintoinen havainto oli myös se, että suurimmalla lastuamisnopeudella viistekulumisen maksimi VB_{Bmax} ja keskimääräinen viistekuluminen VB_B sai jokaisella mittauskerralla samat arvot. Teräpalaan ei siis muodostunut teräviä kulumispiikkejä. Myös tämä havainto kertoo M-teräksen toimivan paremmin suurilla lastuamisnopeuksilla. Kuten lastuamisajoista nähdään, ei tavoiteltuun 15 minuutin lastuamisaikaan päästy millään lastuamisnopeudella. Sandvik suosittelee kokeissa käytetylle teräpalalle lastuamisnopeutta 140 m/min ja syöttöä 0,18 mm/r. Kokeissa kuitenkin käytettiin terästä vain 2,5 mm:n leveys, joten olisi luultu, että teräpala olisi

kulunut kyseisillä arvoilla enemmän. Alhaisen kulumisen vuoksi lastuamisnopeutta päätettiin siis nostaa ja tavoitellusta lastuamisajasta jäätin melko paljon.

Kuvassa 45 ovat koetulokset hyvän M-teräksen ($M_q = 9,5$), huonon M-teräksen ($M_q = 5,7$) ja M-käsittämättömän M-teräksen välillä. M-käsittämättömälle teräkselle saatiin suuremmat viistekulumisen arvot etenkin viimeisessä mittauksessa, vaikka M-käsittämätön koekappale olikin huomattavasti pehmeämpi kuin M-käsitelty. Muita havaintoja M-käsittämättömän teräksen kohdalla oli pistojen aikana muodostuva erilainen lastun muoto ja murto. Valitussa teräpalassa oli lastunmurtaja. M-teräksien kohdalla lastu katkesi ennen kuin se taittui lastunmurtajaa vasten. M-käsittämättömän teräksen kohdalla lastu taittui koko ajan murtajaa vasten, minkä jälkeen lastu yleensä murtui. Kuitenkin välillä lastu ei murtunut ja se kiertyi koekappaleen ympärille. Erilainen lastun murtuminen voi osittain selittyä M-käsittämättömän teräksen alhaisemmalla kovuudella ja näin suuremmalla sitkeydellä. Hyvän ja huonon M-teräksen välille ei saatu merkittävää eroa. Huonon M-teräksen kulumisen oli alussa nopeampaa kuin hyvän, mutta kahdessa viimeisessä mittauksessa molemmat saivat samat arvot.



Kuva 45. Hyvän M-teräksen, huonon M-teräksen ja M-käsittelemättömän teräksen keskimääräinen viistekulumisen ajan funktiona.

Näin pienestä otoksesta on vaikea sanoa pystytäänkö pistosorvauskokeella erottelemaan huono ja hyvä M-teräs toisistaan. Kuitenkin nähdään, että M-teräksen ja käsittelemättömän teräksen välille kokeissa saatiin positiivisia eroja, joten koe voi hyvinkin toimia. Kuten tuloksista nähdään, jäätiin tavoitellusta lastuamisajasta melko paljon. Koemateriaalia olisikin pitänyt olla enemmän, jotta 15 minuutin lastuamisaikoihin olisi päästy suuremmilla lastuamisnopeuksilla. Yksi mahdollisuus olisi ollut myös lisätä syöttöä, jolloin kuluminen olisi nopeutunut. Ei kuitenkaan haluttu lähteä muuttamaan kahta lastuamisparametria samalla kertaa. Myös syötön lisäys olisi lyhentänyt lastuamisaikaa. Eroja hyvän ja huonon M-teräksen välille olisi saatettu saada, jos koemateriaalia olisi ollut enemmän. Terän kulumiselle ominaista on, että se on aluksi nopeaa, minkä jälkeen kuluminen lähes pysähtyy ja lopuksi ennen terän rikkoutumista kuluminen on taas nopeaa. Molempien kuvien kuvaajista päätellen terän kuluminen saavutti vaiheen, jossa kuluminen on hidasta. Tämänkin teorian perusteella olisi ollut mielenkiintoista nähdä, miten kulumiskäyrät olisivat käyttäytyneet esimerkiksi viidennellä tai kuudennella

mittauskerralla. Todennäköisesti tällöin olisi saatu suurempi ero käsitellyn ja käsittelemättömän M-teräksen välille. Ehkä myös huono ja hyvä M-teräs olisi saatu eroteltua selvemmin. Myös käytetyllä teräpalalla on vaikutusta tuloksiin, joten jollain muulla teräpalalla olisi saatettu saada parempia tuloksia. Pistosorvauskokeesta tehtyjä johtopäätöksiä ja sen kehittämistä on tarkemmin käsitelty luvuissa 18 ja 19.

17 ARVOANALYYSI KOEVARIAATIOIDEN VÄLILLÄ

Uuden lastuttavuuskokeen valitsemispäätöksen tueksi tehtiin arvoanalyysi (taulukko 12) kahden ensimmäisen koevariaation välillä. Ensimmäisessä koevariaatiossa Ovakon nykyisen kokeen kehittämistä on käsitelty kahdella tavalla. Näistä kahdesta vertailukohteeksi valittiin koemuoto, johon on lisätty muita lastuttavuutta mittaavia tekijöitä. Kolmanteen koevariaatioon liittyy paljon epävarmuustekijöitä, joiden vuoksi kokeen toimivuus käytännössä on epävarmaa. Siksi se jätettiin vertailun ulkopuolelle.

Arvoanalyysissä käytettiin samoja ominaisuuksia ja painokertoimia kuin toisen koevariaation muodostamisessa. Ovakon nykyinen koe oli vertailun helpottamiseksi tässäkin tapauksessa referenssitasona. Arvosanan suuruus määräytyi kirjallisuudesta saatujen tietojen ja oman harkinnan mukaan.

Taulukko 12. Arvoanalyysi kahden koevariaation välillä.

Koe	a)	b)	c)	d)	e)	K-luku
	Kokeen luotettavuus	Koe-aika	Hinta	Materiaalin kulutus	Käytettävyys	$K = \frac{\sum a \times P}{\sum P}$
	Painokerroin P					
	9	5	1	7	3	
Arvosana a 1–5						
Ovakon M _q -koe	3	3	3	3	3	3,00
Ovakon M _q -koe, jonka virhetekijät on eliminoitu ja johon on lisätty koetta tukevia lastuttavuuden mittareita	5	2	2	3	2	3,36
Pistosorvauskoe	4	3	3	4	3	3,64

Arvoanalyysistä ilmenee, että pistosorvauskoe saa suurimman K-luvun, joten arvoanalyysin mukaan se valittaisiin lopulliseksi kehityskohteeksi. Vaikka M_q-koetta ja pistosorvauskoetta käsitellään arvoanalyysissä erillisinä kokeina, on myös mahdollista, että ne toimivat yhdessä samassa kokeessa.

18 ANALYSOINTI LOPULLISEKSI LASTUTTAVUUSKOKEEKSI JA JATKOKEHITYSEHDOTUKSET

Lopullinen lastuttavuuskoe ja diplomityön jälkeiset jatkokehitystoimet riippuvat hyvin paljon siitä, kuinka Ovako haluaa lähteä kehittämään uutta tai vanhaa lastuttavuuskoetta. Mahdollisuuksia on monia. Uusi lastuttavuuskoe voi olla jokin seuraavista vaihtoehtoista:

1. M_q -koe
 - a. Poistetaan virhetekijät ja etsitään uusi teräpala
 - b. Arvioidaan samalla lastun muotoa ja murtoa sekä mitataan pinnankarheus
 - c. Lisätään lastuamisvärähtelyjen ja/tai -voimien mittausta
 - d. Lisätään pistosorvauskoe
 - e. Lisätään porauskoe
2. Pistosorvauskoe

18.1 Ensimmäinen vaihtoehto

Ovakon M_q -kokeen käytön edellytyksenä tulevaisuudessa on, että etsitään uusi teräpala ja muutetaan koe toimimaan uudella teräpalalla. Jos M_q -koetta käytetään myös tulevaisuudessa, kannattaa kokeesta ehdottomasti poistaa työssä esitetyt virhetekijät (luku 12.2.2). Lisäselvitystä kaipaa myös M_q -kokeen erilainen toimivuus eri teräslajien välillä (luku 12.1.1). Lisäksi kokeeseen kannattaa lisätä lastun muodon ja murron arviointi sekä pinnankarheuden mittausta, koska ne ovat yksinkertaisia toimenpiteitä ja kokeesta saadaan näin irti enemmän hyödyllistä tietoa. Tällainen olisi ensimmäinen ja helpoimmin toteutettavissa oleva ehdotus lopulliseksi kokeeksi. Jotta tällainen koe saataisiin toteutettua, on ryhdyttävä seuraaviin jatkotoimiin:

1. Suunnitellaan koejärjestely, jolla etsitään uusia potentiaalisia teräpaloja M_q -kokeeseen.
2. Kun uusi kehityskelpoinen teräpala on löytynyt, muutetaan M_q -kokeen lastuamisparametreja siten, että koe toimii uudella teräpalalla (luku 12.2.1).

3. Laaditaan ohjeistus lastun muodon ja murron arvioimiseksi sekä pinnankarheuden mittaamiseksi (luvut 12.3.1 ja 12.3.2).
4. Laaditaan uudet ohjeet tietojen syöttämiseksi Ovakon laatujärjestelmään.

Jos M_q -koetta halutaan viedä pidemmällä, liitetään siihen lastuamisvärähtelyiden ja -voimien mittaus. Silloin jatkotoimenpiteitä ovat seuraavat:

1. Testataan lastuamisvärähtelyjen ja lastuamisvoimien mittauskokeen toimivuus luvussa 15 esitetyllä tavalla.
2. Jos kokeet havaitaan kehityskelpoisiksi, ne kehitetään luvuissa 12.3.3 ja 12.3.4 esitetyllä tavalla lastuttavuuskokeiksi joko M_q -kokeen rinnalle tai itsenäisiksi kokeiksi.

Pistosorvauskokeen liittäminen M_q -kokeen rinnalle on myös mahdollista, kuten aikaisemmin on jo todettu. Pistosorvauskokeen toteuttamista koskevia jatkotoimenpiteitä käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

Porauskokeella saatava hyöty voi olla melko pieni, joten porauskokeen liittäminen M_q -kokeeseen kannattaa miettiä tapauskohtaisesti. M_q -kokeen rinnalle liitettävien lastuavien kokeiden ongelmana on, että ne rajoittavat koekappaleen kokoa. Mikäli porauskokeen liittäminen M_q -kokeeseen nähdään hyödylliseksi, on luvussa 12.3.6 käsitelty kokeen liittämiseen liittyviä seikkoja. Lisäksi jatkotoimenpiteinä täytyisi laatia toimintaohjeet kokeen suorittamisesta ja tulosten arkistoinnista.

18.2 Toinen vaihtoehto

Toisena vaihtoehtona on laatia lastuttavuuskoe pistosorvauskokeesta. Kokeellisessa osuudessa testattiin pistosorvauskokeen soveltuvuutta M-teräksen laadun testaamiseen. Koetuloksista kävi ilmi, että koetta on todennäköisesti mahdollista käyttää M-teräksen testauskokeena. Jotta pistosorvauskokeesta saadaan toimiva koe, on sitä kehitettävä monelta osalta. Tehtäviä jatkotoimenpiteitä ovat seuraavat:

1. Kokeeseen soveltuvan teräpalan etsiminen
 - a. Teräpalan tyyppi: katkaisu, uran sorvaus tai muotosorvausterä
 - b. Soveltuvan pinnoitemateriaalin etsiminen
 - c. Terän leveys
 - d. Lastun murtajalla vai ilman
2. Teräslajin ja kovuuden huomioiminen koetuloksissa
 - a. Lastuamisparametrien määrittäminen siten, että eri teräslajit ja eri kovuudet ovat vertailukelpoisia keskenään
 - b. Oikeiden lastuamisparametrien määrittäminen koejärjestelyn avulla
3. Lastuttavan materiaalilavuuden valitseminen (suositus 1500 cm³)
4. Kokeen toimintaperiaatteen valitseminen (eri vaihtoehdot esitetty luvussa 13.2)
5. Toimiiko pistosorvauskoe itsenäisesti vai jonkun toisen kokeen kanssa

Edellä esitetyistä kohdista osa vaatii koejärjestelyä, jolla pystytään avoimet kohdat ratkaisemaan.

18.3 Muut jatkokehitysehdotukset

Koekappaleen ja teräpalan väliseen resistanssiin perustuvan kokeen soveltuvuudesta M-terästen laadun testaamiseen ei ole varmuutta. Kokeen soveltuvuuden testaamiseksi ei tässä työssä laadittu suunnitelmaa kokeeseen liittyvien epävarmuustekijöiden vuoksi. Luvussa 14.3 on lueteltu kokeella saavutettavia etuja ja mahdollisuuksia, jos koe toimisi niin kuin on suunniteltu. Kokeessa olevien lukuisten epävarmuustekijöiden takia kokeen kehittäminen lastuttavuuskokeeksi on pitkä prosessi. Ensimmäisenä toimenpiteenä kannattaisi kartoittaa kokeeseen soveltuvia teräpaloja, eli sellaisia teräpaloja, joissa on terän sydänmateriaalin ja pinnan välissä sähköisesti eristäväkerros. Paras vaihtoehto olisi, jos eristäväkerros olisi teräpalan uloin kerros. Kirjallisuuden mukaan tällaisia teräpaloja on olemassa, mutta tämän asian varmistaminen kannattaa kuitenkin tehdä ensimmäiseksi. Jos ominaisuuksiltaan tällaisia teräpaloja löytyy, voi koetta kehittää eteenpäin. Kiinnostuksen kohde tämän jälkeen on resistanssin muutoksen käyttäytyminen työstön aikana. Jos resistanssin muutoksella pystytään tekemään luotettavia havaintoja terän kuluneisuudesta, on koe helppo kehittää lastuttavuuskokeeksi tai työstön valvontaan soveltuvaksi

järjestelmäksi. Jos kuitenkin kokeeseen soveltuvasta teräpalasta ei löydy kaupallista versiota, voi kokeeseen valmistaa myös erikoisvalmisteisen teräpalan. Tällainen ratkaisu on kuitenkin kallis toteuttaa.

19 POHDINTA JA TUTKIMUKSEN JOHTOPÄÄTÖKSET

19.1 Lastuttavuuskokeiden kartoitus

Erilaisten lastuttavuuskokeiden kartoituksessa kävi ilmi, että materiaalin lastuttavuutta tutkivia lastuttavuuskokeita on useita, mutta suurin osa niistä on yli 20 vuoden takaa ja nykyaikaisen tekniikan käyttäminen on jätetty hyödyntämättä. Työstön aikana tapahtuvaa lastuamisvärähtelyiden, -voimien ja -lämpötilan mittausta on tutkittu melko paljon, mutta niihin perustuvista lastuttavuuskokeista ei löytynyt kovin tarkkaa tietoa. Lastuamisvärähtelyiden, -voimien ja -lämpötilan mittaamiseen perustuvista kokeista löytyi tietoa vain periaatetasolla ja kaivattuja käytännön sovelluksia ei löytynyt. Anturitekniikkaa kuitenkin hyödynnetään nykyaikaisessa teollisessa tuotannossa, joten ihmeellistä on, että nykyaikaista tekniikkaa ei ole hyödynnetty lastuttavuuskokeissa sen paremmin, vaikka edellytykset olisivatkin hyvät. On toki ymmärrettävää, että lastuamiskokeita tekevät yritykset eivät halua julkaista hyväksi havaitsemaansa koetta kilpaileville yrityksille.

19.2 M_q -kokeesta tehdyt havainnot

Diplomityössä tutkittiin tarkasti Ovakon M_q -kokeen ominaisuuksia. Havaittiin, että M_q -koe toimii eri teräslajeilla eri lailla. Koe ei ehkä ole täysin luotettava kaikkien teräslajien testaamisessa. M_q -koe mittaa lastuttavuutta kenties vain tietyissä olosuhteissa, ja toisissa, kokeesta poikkeavissa lastuamisolosuhteissa M-teräksen lastuttavuus voi olla aivan muuta. M_q -kokeessa käytetty pinnoittamaton teräpala on herkkä M-teräksen laatuvaihteluille, eli hyvää M-terästä lastuttaessa, terä kestää pitkään, ja vastaavasti huonolla M-teräksellä terä rikkoutuu nopeasti. M_q -koe antaa näin tiedon Ovakolle M-teräksen M-käsittelyn onnistumisesta, mutta miten hyvä laatu ilmenee normaalissa teollisessa tuotannossa? Kaikki lastuamalla tuotteita valmistavat yritykset käyttävät nykyaikaisia pinnoitettuja teräpaloja, jotka toimivat pienillä lastuamisnopeuksilla M-käsittelyillä ja standardi teräksillä lähes samalla tavoin. Nykyaikaisien teräpalojen käyttö on yksi syy siihen, miksi M_q -koe on vanhanaikainen. Miksi testata vanhanaikaisella teräpalalla, jos se ei enää ole

nykypäivää? Vanha koe ei välttämättä kerro mitään M-teräksen laadusta, koska lastuamisolosuhteet ovat nykyisin erilaiset. Lastuttavuuskokeen pitäisi vastata normaaleja teollisia lastuamisolosuhteita, jolloin voitaisiin asiakkaalle todistaa paremmin M-teräksen tuomat edut ja hyvät puolet. Voidaankin päätellä, että normaali teräs on saattanut hyötyä teräpalojen kehityksestä enemmän kuin M-teräs. Jos terän kestoikä normaalissa ja M-teräksessä on kaventunut, M-teräksen lastuttavuuskokeessa kannattaisi korostaa M-teräksen muita hyviä ominaisuuksia. Esimerkiksi hyvä pinnan laatu, mittatarkkuus sekä lastun murto ja muoto voisivat olla asiakkaan kannalta hyviä markkinointivaltteja. Täytyy kuitenkin miettiä, tarvitaanko M-teräksen laadusta noin tarkkaa tietoa. Riittääkö Ovakolle tieto vain siitä, että teräs täyttää tietyn kriteerin ja tämän mukaan teräs hyväksytään M-teräkseksi? Ongelmalliseksi M-teräksen testaamisen tekee se, että ei vielä välttämättä tiedetä, mistä M-teräksen hyvä lastuttavuus johtuu, vaikka useita teorioita onkin olemassa. Jos tämä M-efekti löydettäisiin, ei lastuamista välttämättä tarvittaisi ja M-käsittelyn onnistuminen pystyttäisiin tutkimaan esimerkiksi mikrorakenteesta tai teräksen analyysistä. Hiukan kummastusta herättää myös se, että johtaako huono M_q -arvosana systemaattisiin toimenpiteisiin vai kuitataanko se olankohautuksella. Onko M_q -kokeesta tullut rutiininomainen toimenpide, jota tehdään, koska aina aikaisemminkin on tehty? Kokeen luotettavuusongelmat ovat voineet aiheuttaa sen, että M_q -koetuloksiin ei suhtauduta enää riittävällä vakavuudella. Mahdollista on myös se, että teräksen laadun tasaisuus on parantunut vuosiansaatossa ja M_q -kokeen merkitys on näin pienentynyt. Jos testaamisen tarve ja M_q -kokeen merkitys on pienentynyt niin merkittävästi, olisiko mahdollista vähentää kokeiden määrää tai jopa luopua kokeen käytöstä kokonaan.

19.3 Soveltavassa osuudessa tehdyt havainnot

Soveltavassa osuudessa käsiteltiin kolmea koevariaatiota: M_q -kokeen kehittäminen ja yhdistäminen muihin kokeisiin, pistosorvauskoe sekä koekappaleen ja teräpalkan väliseen resistanssiin perustuva koe. Näistä kahta ensimmäistä koevariaatiota käsiteltiin tarkasti. M_q -kokeen kehittämisessä havaittiin, että nykyisin koekappaleesta jää lastuttavuuskokeen jälkeen melko suuri hukkamateriaalimäärä. Koekappaleen aihion poimiminen tuotannosta, teelmästä otetun aihion jalostus koekappaleeksi ja muut koetta edeltävät työvaiheet vievät paljon aikaa. Kokeessa kuitenkin hyödynnetään vain varsin vähäinen materiaalmäärä ja

lastuaminen kestää vain noin viisi minuuttia. Miksi koekappaleen materiaalmäärää ei hyödynnetä kokonaan? M_q -kokeen jälkeen pystyisi tekemään esimerkiksi poraus- tai pistosorvauskokeen, jolloin hyödynnettäisiin koko koemateriaalmäärä. Lisäksi M_q -kokeeseen kannattaisi ehdottomasti lisätä kokeita, joiden käyttöön ei tarvita lisää koemateriaalia. Näin saataisiin lisää arvokasta tietoa materiaalin lastuttavuudesta ja laadusta. Tällaisia kokeita ovat esimerkiksi lastuamisvärähtelyiden, -voimien ja -lämpötilan mittaamiseen perustuvat kokeet, pinnankarheuskoe sekä lastun muodon ja murron arvioiminen. Muut kokeet mahdollistaisi M_q -kokeen toimintaperiaatteen (kuoppakulumisen mittaaminen) muuttamisen erilaiseksi, jolloin M-teräksen laatu arvioitaisiin muista lastuttavuuden mittareista. Tällöin muodostuisi Ovakon käyttöön aivan uusi lastuttavuuskoe ja yksi tutkimusongelma saataisiin ratkaistua.

Toisen koevariaation eli pistosorvauskokeen tavoitteena oli lähestyä laboratorio-oloissa tehdyistä kokeista lähemmäs käytännön olosuhteita, koska pistosorvauskokeessa on mahdollista käyttää pienellä materiaalmäärällä normaaleja teollisessa tuotannossa käytettäviä lastuamisparametreja. Kokeellisessa osuudessa tehtiin pistosorvauskokeesta seuraavia johtopäätöksiä:

1. Lastuamisnopeudella on oleellinen merkitys koetuloksiin ja näin kokeen toimivuuteen, koska M-teräs vaatii riittävän lastuamisnopeuden toimiakseen.
2. Koemateriaalia on oltava riittävästi, jotta nykyaikaisiin pinnoitettuihin teriin saadaan kulumista. 1500 cm^3 materiaalitylisyys varmasti riittää kokeissa lastutun 960 cm^3 sijaan.
3. Teräpalan suurin leveys oltava 3 mm tai mielellään alle, jotta saadaan tehtyä pienellä materiaalmäärällä paljon pistoja ja näin teräpalaa saadaan kulutettua enemmän.
4. Lastuamisparametrit, lastuttava materiaalmäärä ja terän leveys on optimoitava siten, että päästään terän valmistajan noin 15 minuutin lastuamisaikoihin ja saadaan kulumista aikaiseksi.
5. Myös lastun muotoa ja murtoa voi arvioida pistosorvauskokeessa.
6. Jos M_q -koe ja pistosorvauskoe halutaan yhdistää, on koekappaleen koko valittava luvussa 15.2 esitetyn kuvan 39 mukaan.

Pistosorvauskokeen kehittäminen M-teräksen laadun testauskokeeksi vaatii vielä paljon selvitystä ja lisäkokeita.

Kolmannen ja aivan uuden koevariaation eli koekappaleen ja lastuavan terän väliseen resistanssiin perustuvan kokeen suunnittelu osoitti, että uusi tekniikka ja kehittyneet teräpalat antavat uusia mahdollisuuksia lastuttavuuskokeisiin, ja mahdollisesti myös työstönvalvontaan. M-teräksen testaamisen kannalta havaittiin teoriasta mielenkiintoinen seikka. M-teräkset toimivat eri lailla erilaisilla epämetallisilla pinnoitteilla. Jotkut pinnoitemateriaalit toimivat M-teräksillä erityisen hyvin. Jos M-teräksen laatu olisi heikkoa, kuluisi pinnoite nopeasti, jolloin huono ja hyvä M-teräs pystyttäisiin erottelemaan helposti. Edellytyksenä kuitenkin on, että pitäisi löytää sellainen kovametalliterän pinnoitemateriaali, joka on sähköinen eriste, ja samalla sen pitäisi toimia erityisen hyvin M-teräksillä. Lisäksi resistanssiin perustuvaan kokeeseen liittyy paljon epävarmuutta, joten sen kehittäminen lastuttavuuskokeeksi vaatii paljon työtä.

20 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli kartoittaa olemassa olevat lastuttavuuskokeet ja laatia suunnitelma M-teräksen laadun testaamiseen soveltuvan lastuttavuuspikakokeen toteuttamisesta. Selvitys oli tarpeen, koska Ovakon vanhassa sorvauslastuttavuuskokeessa (M_q -koe) käytettävien teräpalojen valmistus on lopetettu eikä ominaisuuksiltaan täysin vastaavia teräpaloja ole saatavilla. Vanhan M_q -kokeen toimivuus ja luotettavuus M-teräksen testaamisessa on erittäin riippuvainen käytettävästä teräpalasta. Lisäksi M_q -kokeen luotettavuutta ovat ravistelleet virheelliset tulokset.

Työn kirjallisuusosuuden alussa esitellään M_q -kokeen periaate ja kokeessa jo aikaisemmin havaitut ongelmat ja virhetekijät. Lastuttavuuskokeiden kartoitus käsittelee kirjallisuudesta poimittuja poraamalla, sorvaamalla ja jyrsimällä tehtäviä lastuttavuuskokeita. Lisäksi perehdytään aiemmin tehtyyn diplomityöhön, jossa on pyritty selvittämään laadullisesti onnistuneen ja epäonnistuneen M-teräksen eroja lastuamisvärähtelyissä, -voimissa ja -lämpötiloissa.

Soveltavan osuuden alkuun on kerätty näkemyksiä M-teräksen testaamisesta alan asiantuntijoilta. Selkeää näkemystä uudesta lastuttavuuskokeesta ei haastattelujen pohjalta saatu. Soveltavassa osuudessa uutta lastuttavuuskoea pyritään kartoittamaan kolmen koevariaation pohjalta. Ensimmäisenä koevariaationa käsiteltiin M_q -kokeen kehittämistä ja pohdittiin mahdollisten muiden lastuttavuuskokeiden yhdistämistä M_q -kokeeseen. Lisäksi syvennyttiin tutkimaan M_q -kokeen luotettavuutta, tuloksiin aiheuttavia virheitä ja myös kokeen muita ominaisuuksia hiukan tarkemmin. Toinen koevariaatio valittiin kirjallisuusosuudessa esitettyjen sorvauskokeiden joukosta arvoanalyysin avulla. Kehitettäväksi kokeeksi valittiin pistosorvauskoe. Kolmantena koevariaationa oli koekappaleen ja teräpalan resistanssiin perustuva lastuttavuuskoe, jonka idea syntyi diplomityön pohjalta. Kirjallisuuden perusteella ei pystytty päättämään, mikä koe soveltuu juuri M-teräksen laadun testaamiseen. Siitä syystä laadittiin uusien kokeiden testaussuunnitelma, jonka avulla Ovako pystyy tulevaisuudessa kartoittamaan M-teräksen laadun testaamiseen soveltuvat kokeet. Testaussuunnitelmassa olivat mukana kahdessa ensimmäisessä koevariaatiossa esitetyt lastuttavuuskokeet. Kolmatta koevariaatiota ei

otettu mukaan testaussuunnitelmaan siihen liittyvien lukuisten epävarmuustekijöiden vuoksi. Diplomityön alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen tehtiin myös pienimuotoinen kokeellinen osuus, jossa testattiin pistosorvauskokeen toimivuutta M-teräksen testaamisessa. Kokeen toimivuudesta saatiin myönteisiä tuloksia, mutta pienen otoksen vuoksi ei pystytä tekemään täysin varmoja johtopäätöksiä.

Nykyinen M_q -koe on vanhanaikainen, ja ei mittaa asiakkaiden kokemaa laatua. Sen sijaan M_q -koe voi antaa Ovakolle riittävän tiedon M-teräksen laadusta, mutta teräpalojen loppuminen aiheuttaa tarpeen etsiä muita testausmenetelmiä. Työn keskeisenä johtopäätöksenä voidaan todeta, että lastuamisprosessin kehitys ja etenkin uudenaikaiset materiaalille robustit teräpalat ovat kaventaneet terän kestoikää normaalin ja M-käsitellyn teräksen välillä. M-teräksestä olisikin tuotava esille myös sen muita hyviä lastuttavuusominaisuuksia. Uusia vanhan kokeen korvaavia lastuttavuuskokeita ei suoraan löytynyt, koska kirjallisuuden perusteella ei pystytä päättelemään kokeen toimivuutta M-teräksen laadun testaamisessa. Kirjallisuusosuudesta tai soveltavasta osuudesta voidaan kuitenkin poimia lastuttavuuskokeita, joita pystytään kehittämään M_q -kokeen korvaavaksi kokeeksi. Soveltavassa osuudessa esitetyt koevariaatiot antavat hyvän suunnitelman laatia uusi M-terästen laatua mittaava lastuttavuuskoe. Pelkkä suunnitelma ei vielä riitä vaan kokeiden toimivuus on testattava diplomityössä esitetyllä koejärjestelyllä.

Työn tavoitteeseen päästiin, koska tehty diplomityö tarjoaa uuden kokeen kehittämiseen varsin paljon erilaisia ideoita. Myös vanhan kokeen uudistamiseen ja kehittämiseen on työssä esitetty erilaisia näkökulmia. M_q -kokeessa käytettävät teräpalat loppuvat kolmen vuoden kuluttua, joten Ovakolla on nyt kolme vuotta aikaa kehittää uusi lastuttavuuskoe. Työn pohjalta onkin helppo lähteä uutta koetta kehittämään nyt tai tulevaisuudessa.

LÄHTEET

Abukhshim, N. A., Mativenga, P. T. & Sheikh, M. A. 2005. Heat Generation and Temperature Prediction in Metal Cutting: A Review and Implications for High Speed Machining. Great-Britain. Julkaisussa: International Journal of Machine Tools & Manufacture 46. Viitattu 25.7.2008. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/> , kaupallinen tietopankki, vaatii salasanan.

Accuratus 2008. [Accuratus Corporation kotisivut] Viitattu: 25.8.2008. Saatavissa: <http://accuratus.com/alumox.html>

Ahokas, T. 2008. [Tero Ahokkaan kanssa käyty keskustelu 1.7.2008]

Akasawa, T., Kitagawa, R. & Okusa, K. 1978. Method of Testing Steel Machinability by Face-Milling End of Cylindrical Workpiece. Teoksessa: Machinability Testing and Utilization of Machining Data. American Society for Metals. 460 s. ISBN 0-87170-085-9

Alauddin, M., El Baradie, M. A. & Hashmi, M. S. J. 2004. Tool-life Testing in the End Milling of Inconel 718. Ireland. Julkaisussa: Journal of Materials Processing Technology 55. 1995. Viitattu 4.7.2008. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/> , kaupallinen tietopankki, vaatii salasanan.

Andersson, P. 1997a. Johdanto. Teoksessa: K. Aaltonen, P. Andersson, & V. Kauppinen, Koneistustekniikat. Porvoo. WSOY. 322 s. ISBN 951-0-21437-x

Andersson, P. 1997b. Lastuamisarvojen valinta. Teoksessa: K. Aaltonen, P. Andersson, & V. Kauppinen, Koneistustekniikat. Porvoo. WSOY. 322 s. ISBN 951-0-21437-x

Andersson, P. 1997c. Lastuttavuus. Teoksessa: K. Aaltonen, P. Andersson, & V. Kauppinen, Koneistustekniikat. Porvoo. WSOY. 322 s. ISBN 951-0-21437-x

Andersson, P. 1997d. Terien kuluminen. Teoksessa: K. Aaltonen, P. Andersson, & V. Kauppinen, Koneistustekniikat. Porvoo. WSOY. 322 s. ISBN 951-0-21437-x.

Anonen, A. 2002. Lajin 4548, SAE 8620 Koneistuskokeen kuvaus. Ovakon arkisto. Spesifikaatio. 4.9.2002. KE 137/2002. 8 s.

Anonen, A. 2008. [Ari Anosen kanssa käyty keskustelu 27.6.2008]

Auvinen, M. 1994. Työstönvalvontajärjestelmän testaus ja integrointi FM-järjestelmässä. [Lisensiaatintyö LTK]

Bandorf, R., Biehl, S., Lüthje, H. & Stint, B. 2004. Thin Film Sensor for Wear Detection of Cutting Tools. Germany. Julkaisussa: Sensors and Actuators A 116. Viitattu 12.8.2008. Saatavissa: www.sciencedirect.com, kaupallinen tietopankki, vaatii salasanan.

Baker, K. J., Reuben, R. L., Silva, R. G. & Wilcow, S. J. 2000. The Adaptability of a Tool Wear Monitoring System under Changing Cutting Conditions. Great-Britain. Julkaisussa: Mechanical Systems and Signal Processing. Viitattu 11.7.2008. Saatavissa: www.idealibrary.com, kaupallinen tietopankki, vaatii salasanan.

Bakerjian, R., Drozda, T., Petro, L. W., Veilleux, R. F. & Wick, C. 1998. Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Volume 1 Machining. SME. ISBN 0872630854

Bonney, J., Ezugwu, E. O., Machado, Á. R., Richetti, A. & Da Silva, M. B. 2004. Influence of the Number of Inserts for Tool Life Evaluation in Face Milling of Steels. Great-Britain. Julkaisussa: International Journal of Machine Tools & Manufacture 44. Viitattu 30.6.2008. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/>, kaupallinen tietopankki, vaatii salasanan.

Bäcker, L., Haik, R. EL. & Luciani, M. 1978. An Accelerated Machinability Test and its Application in Mechanical Engineering. Teoksessa: Machinability Testing and Utilization of Machining Data. American Society for Metals. 460 s. ISBN 0-87170-085-9

Dinc, C., Lazoglu, I. & Serpenguzel, A. 2008. Análisis of Termal Fields in Orthogonal Machining with Infrared Imaging. Turkey. Julkaisussa: Journal of Materials Processing Technology 198. Viitattu 25.7.2008. Saatavissa: www.elsevier.com/locate/jmatprotec, kaupallinen tietopankki, vaatii salasanan.

Flinkkilä, T. 1987. Työstönvalvonnan ja mittasäädön nykytilanne. Tekninen tiedotus. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 33 s. ISBN 951-817-360-5

Hamahata, H., Ohno, T., Sakai, T. & Takahashi, M., 1978. Simplified Measurement of Tool Life by Continuous Acceleration of Cutting Speed. Teoksessa: Machinability Testing and Utilization of Machining Data. American Society for Metals. 460 s. ISBN 0-87170-085-9

Heino, M. 2000. Karkaistujen P/M-työkaluterästen lastuttavuus. Teknillisen korkeakoulun julkaisu. Espoo. TKK-KPT-1/2000. 78 s. Saatavissa: <http://www.tkk.fi/Units/Production/Publications/tkk-kpt-1-00.PDF>

Heiskala, E. 1995a. Hyvin lastuttavan teräksen käytön vaikutukset RMT-tuotantoon. [Lisensiaatintyö LTK] 88 s.

Heiskala, E. 1995b. KO-koe, laadunvalvonnan lastuttavuuskoe. Ovakon arkisto. Kuvaus 30.3.1995. Päivittänyt Tarja Hohti 18.5.2005. KE 41/95. 3 s.

Helistö, P. & Helle, A. & Pietikäinen, J. 1990. Epämetallisten sulkeumien vaikutus teräksen lastuttavuuteen: Loppuraportti. Espoo. 78 s.

Huhtiranta, M. 1994. Lastuttavuuden laadunvalvontakoe. Ovakon arkisto. Kuvaus 30.5.1994. 2 s.

Huhtiranta, M. 2008. [Markku Huhtirannan kanssa käyty keskustelu 21.7.2008]

Hydro Carbide 2008. [Hydro Carbide Inc. kotisivut] Viitattu 25.8.2008. Saatavissa: <http://www.hydrocarbide.com/pg6.htm>

ISO 3685:1993. Tool-life testing with single-point turning tools. International Standard. 48 s.

Juvonen, P. 2008. M_q -koetulokset lastuamismisnopeuden funktiona. Ovakon arkisto.

Keane, D. M. & Wannell, P. H. 1984. Quality Control and Development at Quanex-Lasalle. Teoksessa: Mechanical Working & Steel Processing. Iron and Steel Society/AIME. Warrendale. USA

Lachouk, P. 2008. Kuoppakulumisen mittaaminen. [Kandidaatintyö LTY] 44 s.

Lim, G. H. 1993. Tool Wear Monitoring in Machine Turning. Julkaisussa: Journal of Materials Processing Technology 1995. Viitattu 17.7.2008. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/>, kaupallinen tietopankki, vaatii salasanan.

LUT 2008. Konetekniikan osasto [Lappeenrannan teknillisen yliopiston verkkosivut] Viitattu 18.9.2008. Saatavissa: http://www.lut.fi/fi/technology/mechanical_engineering/research/machinery/research/Machining/devices/Sivut/Default.aspx

Mäenpää, M. 2000. Koesuunnittelu lastuamistesteissä. [Diplomityö TTEK] 86 s.

Nummi, T. 2001. Suojaavan kalvon muodostuminen teräksiä lastuttaessa. Teknillinen Korkeakoulu Konepajatekniikan laboratorio. Espoo. Otamedia Oy. 37 s. ISBN 951-22-5504-9

Nykänen, J. 2003. M_q -kokeen vaihtoehtoisten teräpalojen vertailu, Toshiba Tungaloy laadut TH10, UX 30 ja NS540. Imatra Steel. Selvitys KE 139/03. 2 s.

Ovako 2008. Esittelymateriaali. [Ovakon sähköinen arkisto]

Ovakon tietokanta 2008. [Ovakon sähköinen arkisto]

Peltola, T. 2006. M_q -kokeen päivittämistä/Uuden M_q -kokeen kehittämistä koskeva esiselvitys. 26.6.2006. Ovakon arkisto. KE 44/06. 4 s.

Pietikko. 2008. Termopari lämpötila-anturina. [Pietikko Oy:n verkkosivuilla] Viitattu 25.8.2008. Saatavissa: <http://208.56.121.241/pietiko/sovellus/Termopari.pdf>

Ripatti, P. 1982. Pikakoemenetelmien vertailua terästen lastuttavuuden selvittämiseksi. [Diplomityö LTKK] 109 s.

Ripatti, P. 2008. [Paavo Ripatin kanssa käyty puhelinkeskustelu 23.7.2008]

Ruppi, S. 2008. [Sakari Rupin kanssa käyty puhelinkeskustelu 23.7.2008]

Šalák, M., Selecká, H. & Danninger. 2005. Machinability of powder metallurgy steels. Cambridge Int Science Publishing. 300 s. ISBN 1898326827

Sandvik Coromat 2002. Sorvaustyökalut. [Ab Sandvik Coromat]

Sick 2008. [Sick Oy:n verkkosivuilla] Viitattu 22.7.2008. Saatavissa: www.mysick.com/saqqara/get.aspx?id=IM0016818

Stephenson, D. & Agapiou, S. 2005. Metal Cutting Theory and Practise 2nd edition. CRC Press. 846 s. ISBN 0824758889

Sukkela, A. 2000. Lastuttavuuden pikatestimenetelmien vertailututkimus. [Diplomityö TTEK] 130 s.

Trent, E. M. 1984. Metal Cutting 2nd edition. Butterworths. 245 s. ISBN 0-408-10856-8

Valmistusohjelma. 2000. Imatra Steel. [Esitemateriaali]

Vihinen, J. 1993. Lastuamisvoimat. [Lisensiaatinseminaari, TTK] Viitattu 11.7.2008. Saatavissa: [http://pe.tut.fi/tvinst/tvinst_dokumentit.nsf/c317180a11767f0785256499006b15a3/4d5df429de424da8c2256808003ac0d6/\\$FILE/Lastuamisvoimat.pdf](http://pe.tut.fi/tvinst/tvinst_dokumentit.nsf/c317180a11767f0785256499006b15a3/4d5df429de424da8c2256808003ac0d6/$FILE/Lastuamisvoimat.pdf)

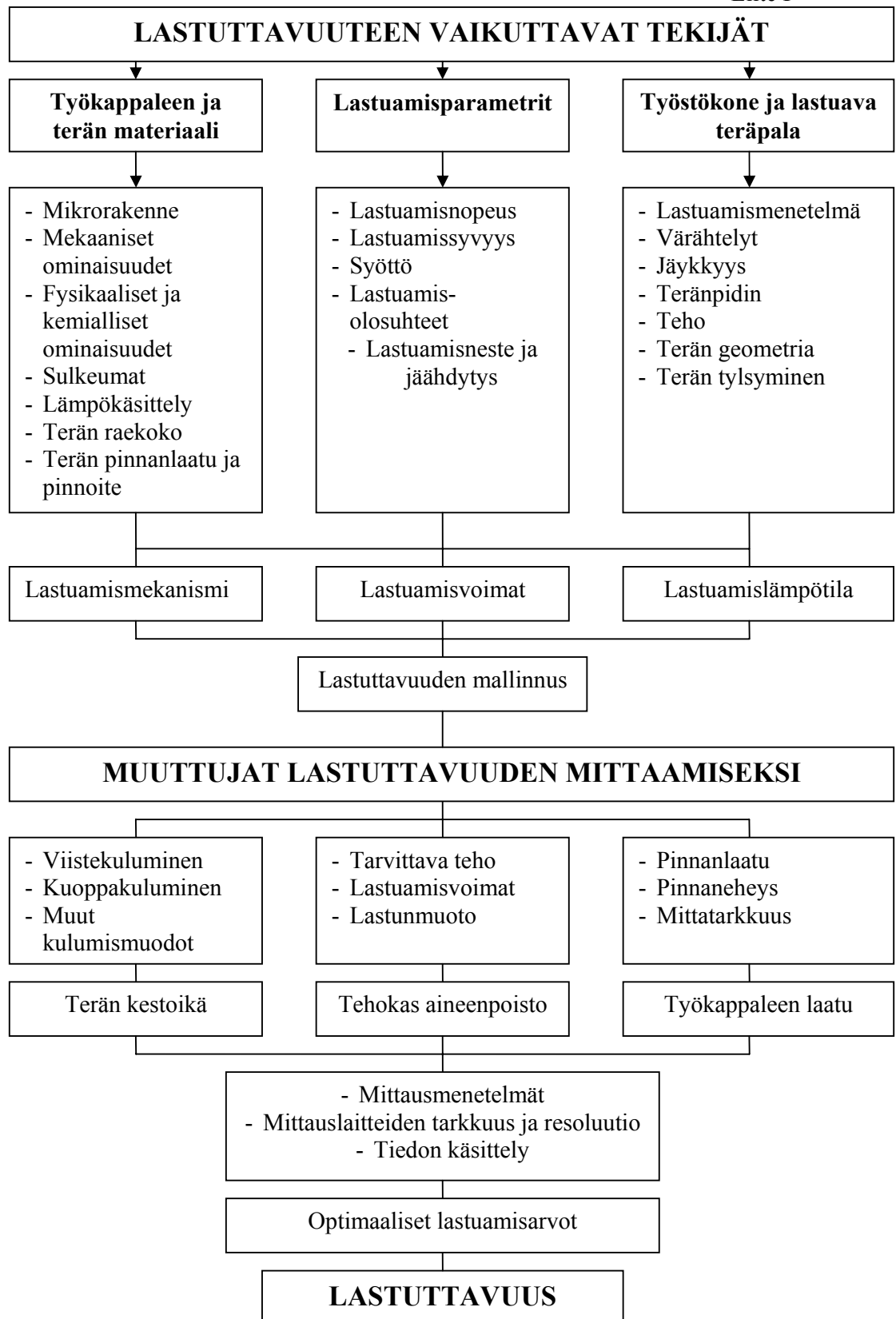
Volvo. 1978. Volvo standard machinability test. Ovakon arkisto. Raportti. 11 s.

Väisänen, T. 2001. Lastun muodostus, lastuamisen mallintaminen ja kalvonmuodostus teräksiä lastuttaessa. Espoo. Otamedia Oy. 46 s. ISBN 951-22-5506-5

Wang, W. H., Wong, Y. S. & Hong, G. S. 2005. 3D Measurement of Crater Wear by Phase Shifting Method. Julkaisussa: Wear 261, 2006. Viitattu 18.7.2008. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/> , kaupallinen tietopankki, vaatii salasanan.

Xiaoli, L. 2001. A Brief review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring during Turning. Julkaisussa: International Journal of Machine Tools & Manufacture 2002. Viitattu 17.7.2008. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/> , kaupallinen tietopankki, vaatii salasanan.

Yahya, I. 2007. Investigating the machinability of tool steels in turning operations. Turkey. Teoksessa: Materials and Design. Viitattu: 30.6.2008. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/> , kaupallinen tietopankki, vaatii salasanan.



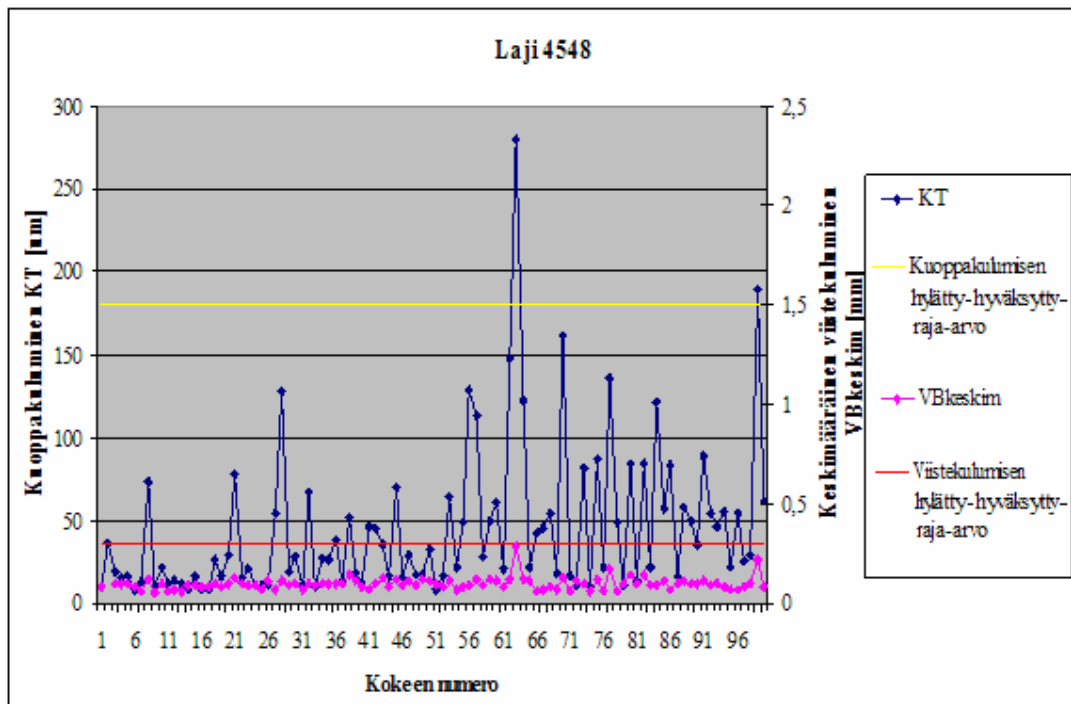
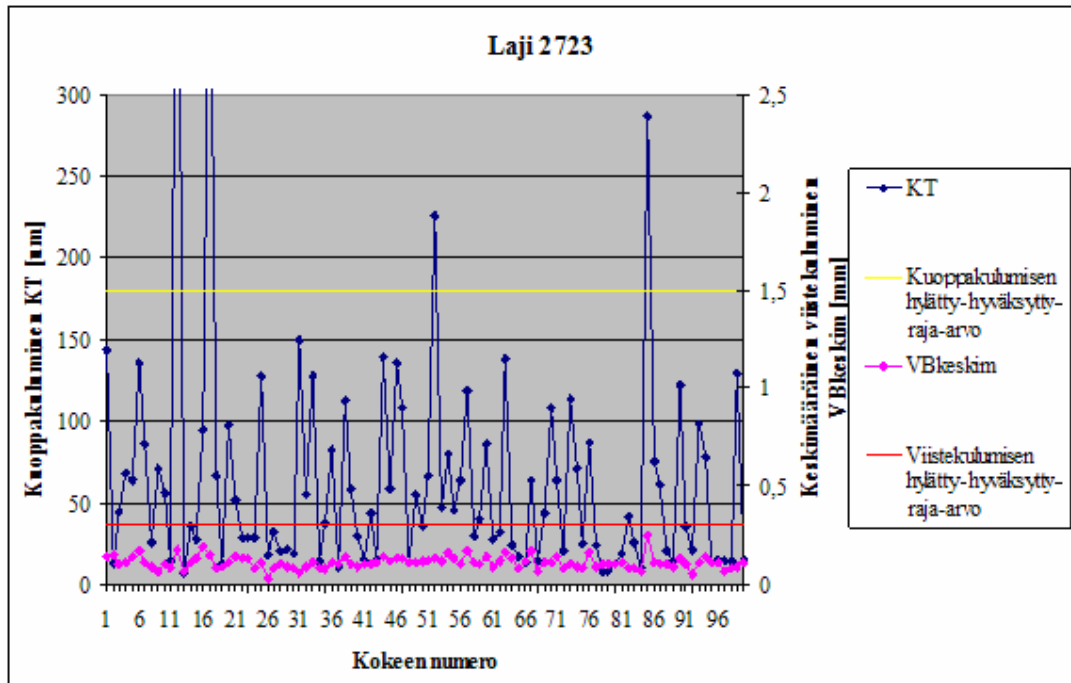
Liite II

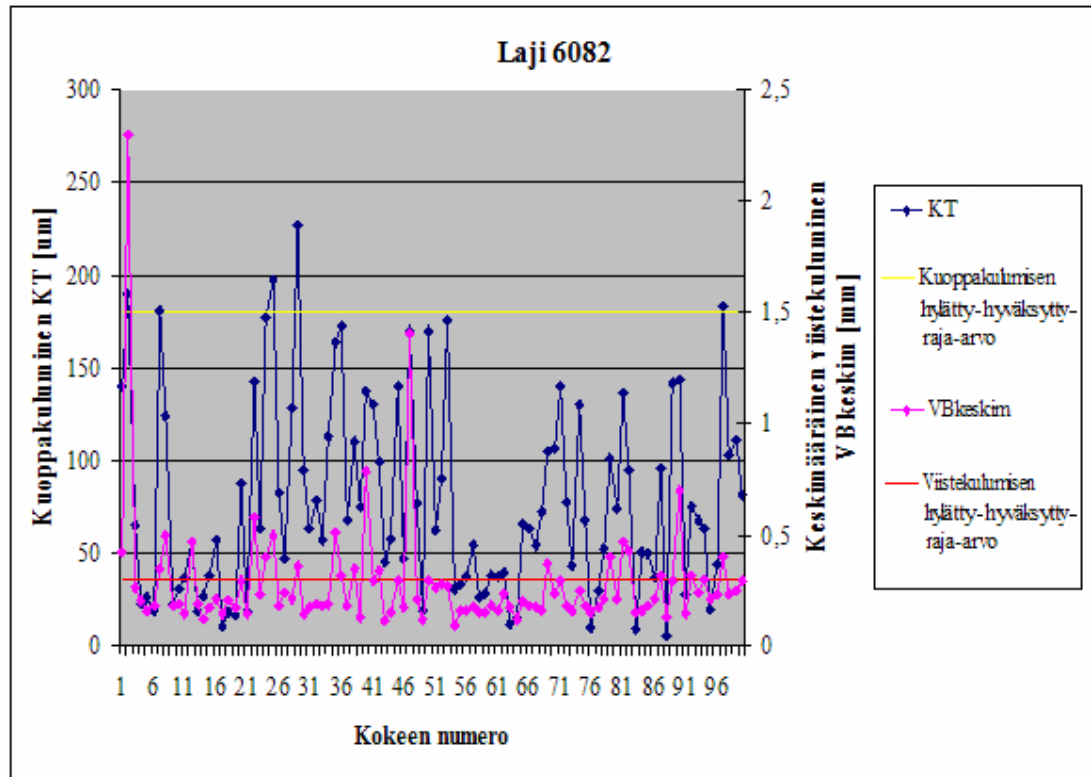
Nro	Ovakon lajikoodi	Tyyppi	Tehtyjen M_q-kokeiden määrä 1.1.2000–28.10.2008	Sulatukset yhteensä 1.1.2000–28.10.2008
1	1246	Koneteräs	136	184
2	2715	Koneteräs	1	15
3	2720	Koneteräs	208	604
4	2722	Koneteräs	1	579
5	2723	Koneteräs	994	2035
6	2727	Koneteräs	3	222
7	2728	Koneteräs	1	99
8	4548	Hiiletysteräs	518	610
9	4715	Hiiletysteräs	52	61
10	5081	Nuorrutusteräs	2	195
11	5241	Nuorrutusteräs	1	65
12	5249	Nuorrutusteräs	56	83
13	5547	Hiiletysteräs	24	1172
14	6006	Nuorrutusteräs	7	76
15	6080	Nuorrutusteräs	2	127
16	6082	Nuorrutusteräs	707	1129
17	6105	Nuorrutusteräs	134	179
18	6107	Nuorrutusteräs	54	134
19	6498	Nuorrutusteräs	27	477
20	7252	Mikroseostettu luja rakenneteräs	96	220
21	7266	Mikroseostettu luja rakenneteräs	32	192
22	8302	Nuorrutusteräs	71	132

Liite III

KOKEEN TARKOITUS	<ol style="list-style-type: none">1. Eri materiaalien lastuttavuuden arviointi2. Muiden parametrien arviointi (leikkuuneste, terämateriaalit, taloudelliset lastuamisarvot)
TYÖSTÖKONEET	<ol style="list-style-type: none">1. Kyettävä säilyttämään vakiolastuamisnopeus koekappaleen halkaisijan muuttuessa2. Oltava riittävän tehokas ja tukeva
KOEMATERIAALI	Kaikilla koekappaleilla oltava sama halkaisija ja pituus
TERÄNPIDIN	Käytettävä aina samantyyppistä ja samalta valmistajalta
TERÄMATERIAALI	Käytettävä aina samaa valmistajaa, materiaalia ja valmistuserää.
LASTUAMISNESTE	<ol style="list-style-type: none">1. Pyrittävä lastuamaan ilman leikkuunestettä2. Jos kuitenkin leikkuunestettä on käytettävä, on vakioitava sekoitussuhde, virtausnopeus ja -paine, lämpötila sekä tapa, jolla leikkuuneste tuodaan lastuamiskohteeseen.
MENETTELYTAVAT	<ol style="list-style-type: none">1. Lastuamistapahtuman määrittäminen.2. Tiedon keruun ja taltioinnin määrittäminen.
MITTAUSLAITTEISTO	<ol style="list-style-type: none">1. Mittauslaitteiden määrittäminen.2. Mittaustapojen määrittäminen.
LASTUAMISOLOSUHTEET	Lastuamisparametrien valitseminen.
MITTAUSPARAMETRIT	Terän kuluminen, terän kestoikä, lastuamisvoimat, lastuamiseen tarvittava teho, lastuamislämpötila, pinnan laatu, lastun muoto ja mittatarkkuus.

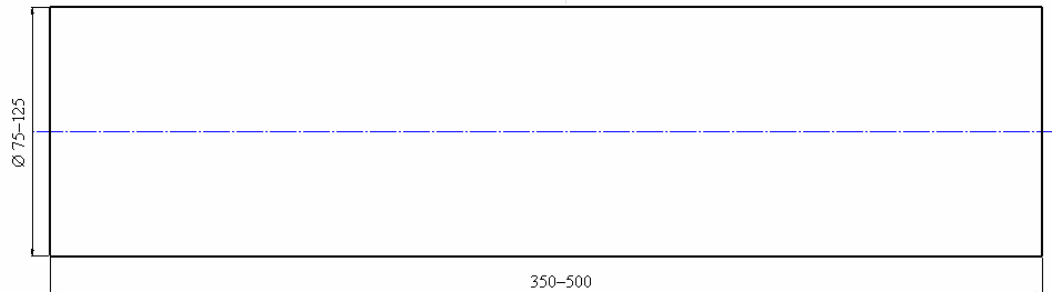
(Stephenson & Agapiou 2005, 578)





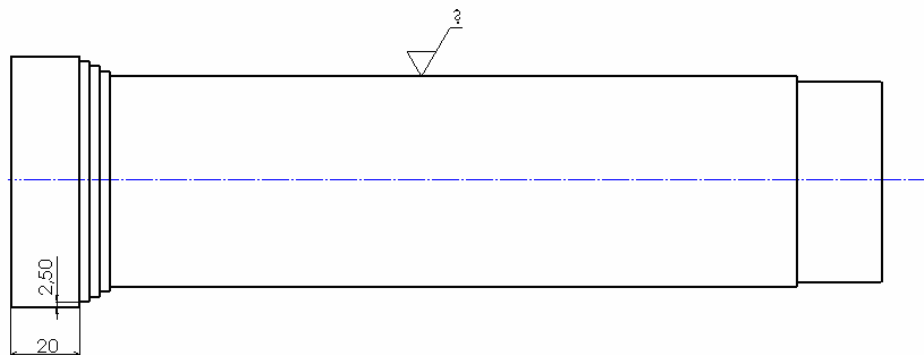
1. KOEVAIHE: M_q -koe yhdistettynä lastuamisvärähtelyjen ja -voimien mittaukseen sekä pinnankarheuden mittaukseen

Koekappaleen aihion mitat:



- 1.1. Normaalit työvaiheet ennen M_q -koetta (esimerkiksi kovuudenmittaus)
- 1.2. M_q -koe yhdistettynä lastuamisvärähtelyjen (kiihtyvyyssanturi) ja syöttövoiman suuntaisen lastuamisvoiman mittaukseen
- 1.3. Pinnankarheuden mittaus kolmesta eri kohdasta ja keskiarvon kirjaaminen koepöytäkirjaan

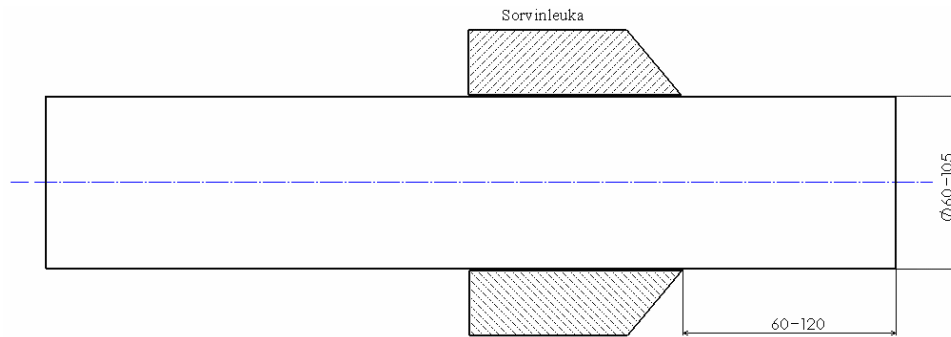
Koekappale M_q -kokeen jälkeen:



2. KOEVAIHE: Pistosorvauskoe

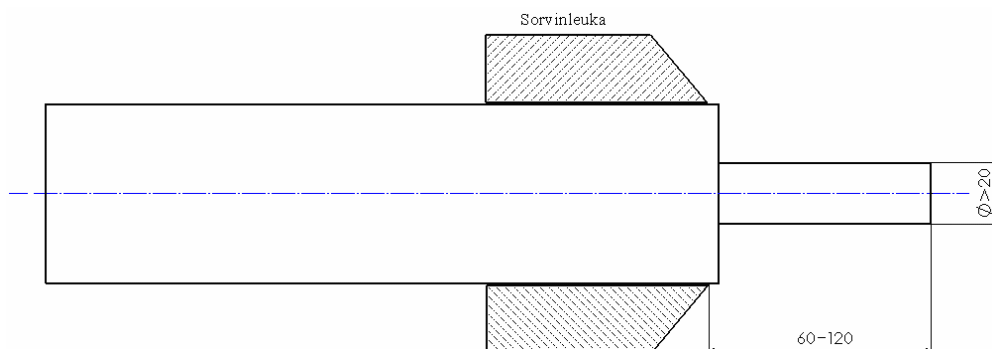
2.1. Koekappaleen sorvaus tasapaksuiseksi.

2.2. Kiinnitys kolmileukaistukkaan ja karapatken sisään niin, että koekappaleeseen pystytään pistosorvaamaan 20–40 pistoa (60–120 mm). Pistettävien pistojen määrä on riippuvainen piston leveydestä.

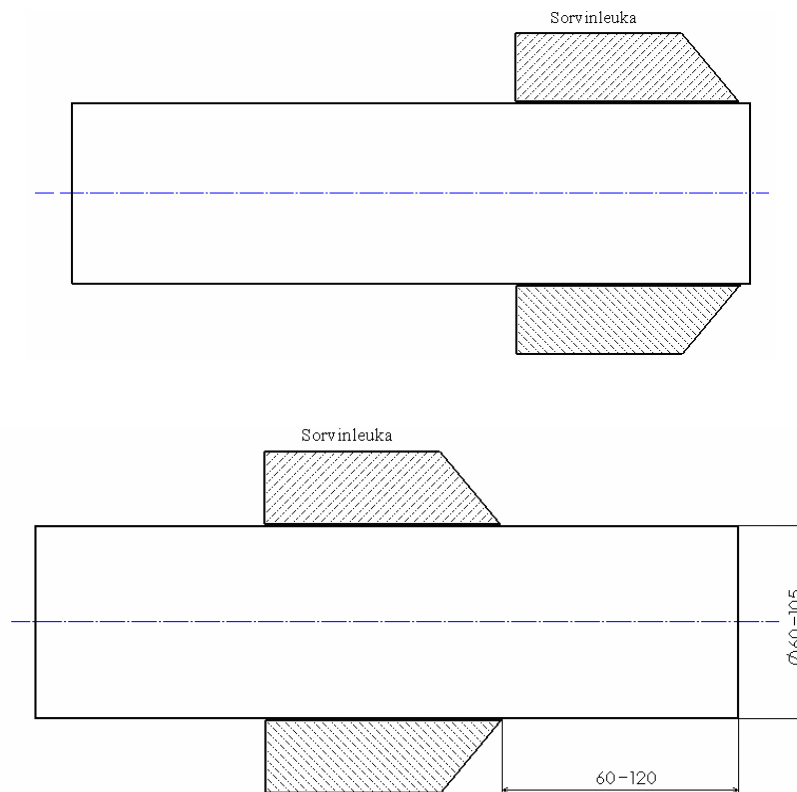


2.3. Pistosorvataan vieri viereen 20 mm syviä pistoja taulukossa olevien parametrien mukaan. Jos koekappaleen mitat sallivat, voi piston syvyys olla suurempi.

Lastuamisnopeus v [m/min]	Syöttö f [mm/r]	Piston syvyys [mm]	Terän leveys [mm]	Lastuttava tilavuus
125 – 250	0,1 – 0,2	20	4	Mitattava suure tai vakio



- 2.4. Jos terä ei kulu loppuun 20–40 piston aikana, katkaistaan pistojen jälkeen jäljelle jäävä hukkaosuus erillisellä katkaisuterällä ja siirretään koekappaletta kolmivaiheisen sisästä ulospäin siten, että pystytään sorvaamaan taas 20–40 pistoa.
- 2.5. Jos lastutaan vakiomateriaalitulavuus, irrotetaan teräpala tietyin väliajoin viistekulumisen mittaamista varten. Viistekulumisen mittaus tehdään 3–5 kertaa.



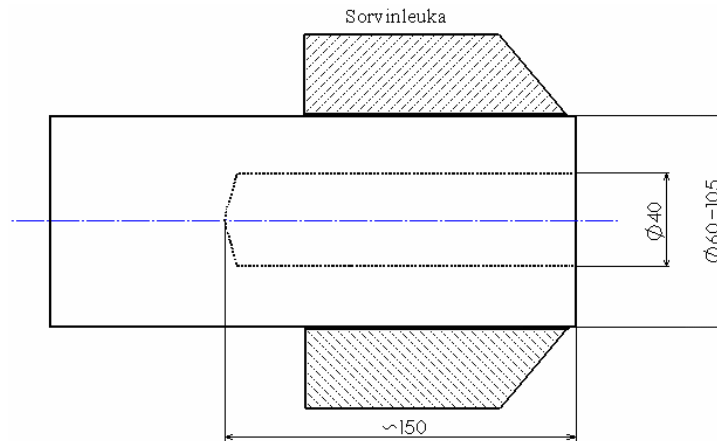
- 2.6. Koetta jatketaan, kunnes terä kuluu loppuun tai ennalta määritettyyn viistekulumisen arvoon.
- 2.7. Terän kuluttua loppuun tai määritettyyn viistekulumisen arvoon mitataan lastuttu tilavuus (jos lastuttua tilavuutta käytetään mittarina) ja tulos kirjataan koepöytäkirjaan.

3. KOEVAIHE: Porauskoee (optio)

3.1. Pään oikaisu

3.2. Porauskoee koekappaleen keskiöön taulukossa olevien lastuamisparametrien mukaan

3.2.1. Arvioidaan työstössä syntyvää ääntä, lastun murtoa ja muotoa



3.3. Havaintojen kirjaaminen koepöytäkirjaan

Porauskoeken poran tyyppi ja lastuamisparametrit (Sandvik Coromat 2002, 190):

Poran tyyppi ja halkaisija	Lastuamisnopeus [m/min]	Syöttö f [mm/r]	Porattavan reiän syvyys [mm]
U-pora $\varnothing 40$ mm	115–180	0,08–0,34	~ 150

4. KOKEIDEN LOPUKSI

4.1. Irrotetaan M_q -kokeessa käytetty teräpala ja mitataan kuoppa- ja viistekuluminen.

4.2. Määritetään M_q -arvosana.

4.3. Kun koetuloksia on saatu riittävästi, voidaan tutkia M_q -arvosanan ja muiden kokeiden välistä korrelaatiota ja valita kokeet, jotka soveltuvat M-teräksen testaamiseen.

M_q-KOKEEN JA PISTOSORVAUSKOKEEN KOEKAPPALEEN MITTOJEN MÄÄRITYS

1. Pistojen lukumäärä

- Jos pistosorvauskokeessa lastutaan aina vakiotilavuus, pistojen lukumäärä on riippuvainen koekappaleen halkaisijasta, piston syvyydestä ja teränleveydestä. Koekappaleen pituus on rajallinen, mikä rajoittaa myös pistojen määrää. Tämä tekeekin koekappaleen halkaisijan ja pituuden suhteen määrittämisestä varsin monimutkaisen.

2. Kiinnitys- ja työvara

- M_q-koetta ei törmäysvaaran vuoksi voida sorvata koekappaleen koko matkalta, joten koekappaletta ei voida hyödyntää kokonaan. Vähennetään koekappaleen hyödynnettävästä pituudesta 20 mm.
- Pistosorvauskokeessa yleisin kiinnitystapa on, että koekappaleen toinen pää on karaputken sisässä kiinnitettynä kolmileukaistukkaan, joten on jätettävä 50 mm:n kiinnitysvara.

3. Pistosorvauskokeessa piston syvyys

- Piston syvyys on asetettu vakioksi 20 mm:iin eli koekappaleen halkaisija pienenee yhdellä pistolla 40 mm.

4. Sorvinkaran maksimipyörimisnopeus pistosorvauskokeessa

- Kokeessa pyrittävä pitämään vakiolastuamisnopeus.
- Koekappaleen halkaisijan pienentyessä kierrosnopeus kasvaa.
- Oletetaan, että pistosorvauskokeessa suurin lastuamisnopeus v_c olisi 220 m/min, Ovakon laatuosaston sorvinkaran maksimipyörimisnopeus n on 3600 rpm, lasketaan minimihalkaisija

$$n = \frac{v \times 1000}{\pi \times D}$$

$$D_{\min} = \frac{v \times 1000}{\pi \times n}$$

$$D_{\min} = \frac{220 \text{ m/min} \times 1000}{\pi \times 3600 \text{ rpm}} \approx 19,5 \text{ mm}$$

- Pistosorvauskokeen jälkeen jääväksi minimi halkaisijaksi valitaan 20 mm.
 - Pistosorvauskokeen toimintaperiaatteesta riippuen kaikilla teräslajeilla ja kovuuksilla lastuamisnopeus ei välttämättä ole noin suuri, mutta 20 mm:n työvara on jätettävä myös siksi, että teräspalan kuluminen pysyisi tasaisena (kappaleen halkaisijan pienentyessä kuluminen kiihtyy).
 - Jos minimihalkaisija pistosorvauskokeen jälkeen on 20 mm, niin minimihalkaisija ennen pistosorvauskoetta on $20 \text{ mm} + 40 \text{ mm} = 60 \text{ mm}$
5. M_q -kokeessa lastuttava ainemäärä on 1600 cm^3
6. Pistosorvauskokeessa lastuttava ainemäärä on noin $800 - 1600 \text{ cm}^3$
- Jos pistojen määrä pysyy vakiona ja kappaleen halkaisija muuttuu, muuttuu myös lastuttu tilavuus.

Taulukossa on esitetty koekappaleen mitat, kun molemmat kokeet tehdään samalla kiinnityksellä. Tällöin halkaisija-pituus-suhteen on oltava koko ajan vähintään 1:7 värähtelyiden estämiseksi.

Koekappaleen pituus L_0 [mm]	Minimihalkaisija kokeiden jälkeen [mm] $d_{final} = \frac{L_0}{7}$	Minimihalkaisija ennen pistosorvauskoetta [mm] $d_{min} = d_{final} + (2 \times pistonsyvyys)$	Koekappaleen minimihalkaisija ennen kokeita [mm] $D_{min} = \sqrt{d_{min}^2 + \frac{6400000mm^3}{L_0\pi}}$
350	50	90	118,0
360	51,4	91,4	118,4
370	52,9	92,9	118,9
380	54,3	94,3	119,4
390	55,7	95,7	119,9
400	57,1	97,1	120,5
410	58,6	98,6	121,2
420	60	100	121,9
430	61,4	101,4	122,6
440	62,9	102,9	123,3
450	64,3	104,3	124,1
460	65,7	105,7	124,9
470	67,1	107,1	125,8
480	68,6	108,6	126,6
490	70	110	127,5
500	71,4	111,4	128,4

Koekappaleen pituus ja minimihalkaisija, kun pistosorvauskokeessa lastutaan 1000/1500 cm³. Mittojen määrittämisessä on huomioitu edellä esitetyt raja-arvot.

Koekappaleen pituus L ₀ [mm]	M _q -kokeessa hyödynnettävä pituus L _{Mq} [mm] $L_{Mq} = L_0 - 20$	Pistosorvauskokeessa hyödynnettävä pituus L _p [mm] $L_p = L_0 - 50$	Maksimi pistojen lukumäärä [kpl] = $\frac{L_p}{4}$	Minimihalkaisija d _{min} ennen pistosorvauskoetta kun pistosorvataan 1000/1500 cm ³ [mm] $d_{min} = \frac{100 \times V_{lastuttu}}{2 \times l_{lastuttu} \times \pi} + 20$		Koekappaleen minimihalkaisija D _{min} ennen kokeita, kun pistosorvataan 1000/1500 cm ³ [mm] $D_{min} = \sqrt{d_{min}^2 + \frac{6400000 \text{ mm}^3}{L_0 \pi}}$	
350	330	300	75	73,1	99,6	107,3	126,8
360	340	310	78	71,3	97,0	105,3	124,1
370	350	320	80	69,7	94,6	103,4	121,5
380	360	330	83	68,2	92,3	101,6	119,1
390	370	340	85	66,8	90,2	99,8	116,8
400	380	350	88	65,5	88,2	98,2	114,6
410	390	360	90	64,2	86,3	96,7	112,6
420	400	370	93	63,0	84,5	95,2	110,6
430	410	380	95	61,9	82,8	93,8	108,8
440	420	390	98	60,8	81,2	92,5	107,0
450	430	400	100	59,8	79,7	91,2	105,3
460	440	410	103	58,8	78,2	89,9	103,7
470	450	420	105	57,9	76,8	88,8	102,1
480	460	430	108	57,0	75,5	87,6	100,7
490	470	440	110	56,2	74,3	86,5	99,2
500	480	450	113	55,4	73,1	85,5	97,9

7. Koekappaleen halkaisija-pituus-suhteen on oltava vähintään 1:7 värähtelyiden estämiseksi. Suhdetta 1:7 käytetään nykyisessä M_q -kokeessa ja se on havaittu toimivaksi.

Alla olevassa taulukossa on laskettu koekappaleen minimihalkaisijat, kun tarkastellaan ainoastaan halkaisija-pituus-suhdetta (1:7). Taulukossa esitettyjen mittojen arvoilla on koekappale kiinnitettävä värähtelyiden välttämiseksi pistosorvauskokeessa kolmileukaistukkaan siten, että osa koekappaleesta on karaputken sisässä.

Koekappaleen pituus L_0 [mm]	Minimihalkaisija ennen pistosorvauskoetta [mm] $d_{\min} = \frac{L_0}{7}$	Koekappaleen minimihalkaisija ennen kokeita [mm] $D_{\min} = \sqrt{d_{\min}^2 + \frac{6400000\text{mm}^3}{L_0\pi}}$
350	60	97,06
360	60	96,22
370	60	95,43
380	60	94,66
390	60	93,93
400	60	93,24
410	60	92,57
420	60	91,93
430	61,4	92,26
440	62,9	92,63
450	64,3	93,06
460	65,7	93,53
470	67,1	94,04
480	68,6	94,58
490	70,0	95,17
500	71,4	95,79

Koekappaleen minimi halkaisija ennen pistosorvauskoetta kaavan johtaminen:

Lieriön tilavuus:

$$V_{\text{lieriö}} = \frac{l_{\text{lieriö}} \times \pi \times d^2}{4}$$

 $l_{\text{lieriö}}$ = lieriön pituus [mm] d = lieriön halkaisija [mm]

Lastuttu tilavuus saadaan, kun lasketaan tilavuus ennen lastuamista ja lastuamisen jälkeen ja vähennetään ne toisistaan:

$$V_{\text{lastuttu}} = \frac{l_{\text{lastuttu}} \times \pi \times d_1^2}{4} - \frac{l_{\text{lastuttu}} \times \pi \times d_2^2}{4}$$

$$d_2 = d_1 - (2 \times \text{piston syvyys})$$

Piston syvyys = 20 mm

$$d_2 = d_1 - 40$$

$$V_{\text{lastuttu}} = \frac{l_{\text{lastuttu}} \times \pi \times d_1^2}{4} - \frac{l_{\text{lastuttu}} \times \pi \times (d_1 - 40)^2}{4}$$

$$\frac{4V_{\text{lastuttu}}}{l_{\text{lastuttu}} \times \pi} = 80d_1 - 160$$

$$d_1 = d$$

$$\frac{4V_{\text{lastuttu}}}{l_{\text{lastuttu}} \times \pi \times 80} + 20 = d$$

Muutetaan [mm³] → [cm³], joten kerrotaan 1000:lla

$$d = \frac{4000 \times V_{\text{lastuttu}}}{80 \times l_{\text{lastuttu}} \times \pi} + 20$$

$$d_{\text{min}} = \frac{100 \times V_{\text{lastuttu}}}{2 \times l_{\text{lastuttu}} \times \pi} + 20$$

Koekappaleen minimihalkaisijan laskemiseen käytetyn kaavan johtaminen:

Lieriön tilavuus:

$$V_{\text{lieriö}} = \frac{l_{\text{lieriö}} \times \pi \times d^2}{4}$$

 $l_{\text{lieriö}}$ = lieriön pituus [mm] d = lieriön halkaisija [mm]

Lastuttu tilavuus saadaan, kun lasketaan tilavuus ennen lastuamista ja lastuamisen jälkeen ja vähennetään ne toisistaan:

$$V_{\text{lastuttu}} = \frac{L_0 \times \pi \times D_{\text{min}}^2}{4} - \frac{L_0 \times \pi \times d_{\text{min}}^2}{4}$$

 L_0 = Koekappaleen pituus D_{min} = Koekappaleen minimihalkaisija ennen kokeita d_{min} = Koekappaleen minimihalkaisija ennen pistosorvauskoetta $V_{\text{lastuttu}} = 1600 \text{ cm}^3$ (M_q -kokeessa lastuttava materiaalitilavuus)

$$1600 \text{ cm}^3 = \frac{L_0 \times \pi \times D_{\text{min}}^2}{4} - \frac{L_0 \times \pi \times d_{\text{min}}^2}{4}$$

$$6400 \text{ cm}^3 = L_0 \times \pi \times D_{\text{min}}^2 - L_0 \times \pi \times d_{\text{min}}^2$$

Muutetaan [cm^3] \rightarrow [mm^3], joten kerrotaan 1000:lla

$$6400000 \text{ mm}^3 = L_0 \times \pi \times D_{\text{min}}^2 - L_0 \times \pi \times d_{\text{min}}^2$$

$$D_{\text{min}} = \sqrt{d_{\text{min}}^2 + \frac{6400000 \text{ mm}^3}{L_0 \pi}}$$

KOEKAPPALEEN PITUUS, KUN YHDEN LASTUN SORVAAMISEEN ON KULUTTAVA VÄHINTÄÄN 30 SEKUNTIA

Yleisin Ovakon laji, jolle kokeita tehdään on 2723. Lajin kovuudesta riippuva lastuamisnopeus vaihtelee 500 m/min molemmin puolin. Valitaan lastuamisnopeudeksi 500 m/min (kovuus 176 HB). Lastuamisnopeus 500 m/min on M_q-kokeissa käytettävien lastuamisnopeuksien suurimmasta päästä, joten voidaan olla varmoja, että lasketut pituuden arvot ovat riittävät.

Alkuarvot:

Syöttö $f = 0,4$ mm/r

Lastuamisnopeus $v = 500$ m/min

Yhden lastun lastuamiseen kuluva aika vähintään $t = 30$ s

Koekappaleen pituus $l = ?$ mm

Koekappaleen halkaisija = 90–125 mm

M_q-kokeen kiinnitys- ja työvara = 20 mm

Alkuarvojen mukaan lasketut pituuden arvot:

Koekappaleen halkaisija D [mm]	Pyörimisnopeus n [r/min] $n = \frac{v \times 1000}{\pi \times D}$	Koekappaleen pituus, kun lastuaminen kestää vähintään 30 s [mm] $l = \frac{n \times f \times t}{60}$	Koekappaleen pituus ennen M _q -koetta [mm] = $l + 20$ mm
90	1768,4	353,7	373,7
95	1675,4	335,1	355,1
100	1591,6	318,3	338,3
105	1515,8	303,2	323,2
110	1446,9	289,4	309,4
115	1384,0	276,8	296,8
120	1326,3	265,3	285,3
125	1273,3	254,7	274,7

Pistosorvauskokeen maksimimateriaalilavuuden laskeminen, kun koekappale on mitoiltaan 300 X Ø74 mm:ä:

Lieriön tilavuus:

$$V_{\text{lieriö}} = \frac{l_{\text{lieriö}} \times \pi \times d^2}{4}$$

$l_{\text{lieriö}}$ = lieriön pituus [mm]

d = lieriön halkaisija [mm]

Lastuttu tilavuus saadaan, kun lasketaan tilavuus ennen lastuamista ja lastuamisen jälkeen ja vähennetään ne toisistaan:

$$V_{\text{max pisto}} = \frac{L_0 \times \pi \times D_{\text{min}}^2}{4} - \frac{L_0 \times \pi \times d_{\text{min}}^2}{4}$$

L_0 = Koekappaleen pistosorvauskokeessa hyödynnettävä pituus

$$L_0 = 300 \text{ mm} - \text{kiinnitysvara}$$

Kiinnitysvara on 50 mm, jotta koekappale saadaan kiinnitettyä kolmieleukaistukkaan.

$$L_0 = 300 \text{ mm} - 50 \text{ mm} = 250 \text{ mm}$$

D_{min} = Koekappaleen halkaisija ennen kokeita = 74 mm

d_{min} = Koekappaleen halkaisija pistosorvauskokeen jälkeen = $D_{\text{min}} - (2 \times \text{piston syvyys})$

Piston syvyys on 25 mm.

$$d_{\text{min}} = 74 \text{ mm} - (2 \times 25 \text{ mm}) = 24 \text{ mm}$$

V_{maxpisto} = Pistosorvauskokeessa lastuttava maksimimateriaalilavuus = ? [cm³]

$$V_{\text{max pisto}} = \frac{250 \text{ mm} \times \pi \times (74 \text{ mm})^2}{4} - \frac{250 \text{ mm} \times \pi \times (24 \text{ mm})^2}{4} = 962112,750 \text{ mm}^3$$

Jaetaan 1000:lla, niin saadaan muutettua mm³ → cm³

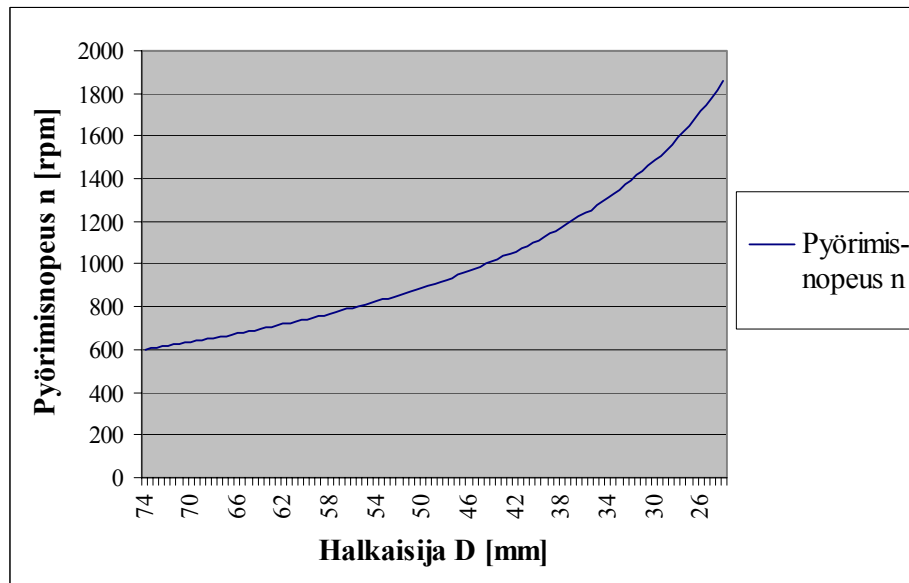
$$\approx 960 \text{ cm}^3$$

Pyöristys on tehty alaspäin, koska halutaan olla varmoja, että kyseinen tilavuus pystytään lastuamaan.

Sorvin karan keskimääräinen pyörimisnopeus n:

Kuvassa on esitetty pyörimisnopeuden kuvaaja $n = \frac{1000v}{\pi D}$ halkaisijan funktiona.

Lastuamisnopeuden arvona on käytetty 140 m/min.



Koska sorvinkaran pyörimisnopeus muuttuu epälineaarisesti halkaisijan muuttuessa, joudutaan keskimääräinen pyörimisnopeus laskemaan integraalin avulla.

Funktion keskiarvo määritellään integraalin avulla seuraavasti:

$$\frac{1}{a-b} \int_b^a f(D) dD$$

, missä $f(D)$ on pyörimisnopeuden yhtälö $n = \frac{1000v}{\pi D}$, $a = D$ ja $b = D - (2 \times \text{piston syvyys})$

Alkuarvot:

Koekappaleen halkaisija alussa $D = 74$ mm

Piston syvyys = 25 mm

$$n_{keskim} = \frac{1}{74-24} \int_{24}^{74} \frac{1000v}{\pi D} dD$$

Koska $\frac{1000v}{\pi}$ on vakio, voidaan se siirtää integraalin ulkopuolelle.

$$n_{keskim} = \frac{1000v}{50\pi} \int_{24}^{74} \frac{1}{D} dD$$

Integroimissääntöjen mukaan

$$n_{keskim} = \frac{20v}{\pi} \int_{24}^{74} \ln |D|$$

Koska D on koko ajan positiivinen, voidaan itseisarvo purkaa.

$$n_{keskim} = \frac{20v}{\pi} [(\ln 74) - (\ln 24)]$$

Alkuarvot:Koekappaleen pituus $L = 300$ mm

Kiinnitysvara = 50 mm

Teräpalan leveys [mm]	Pistosorvauskokeessa hyödynnettävä pituus [mm] $l_{pisto} = L - kiinnitysvara$	Pistojen lukumäärä, kun koekappaleen pituus on 300 mm [kpl] $= \frac{l_{pisto}}{l_{terä}}$
1	250	250
2	250	125
2,5	250	100
3	250	82
4	250	62
5	250	50
6	250	41

Alkuarvot:Syöttö $f = 0,12$ mm/rLastuamisnopeus $v = 140$ m/min

Teräpalan leveys [mm]	Keskimääräinen sorvin karan pyörimisnopeus yhden piston aikana [rpm] $n_{keskim} = \frac{20v}{\pi}[(\ln 74) - (\ln 24)]$	Yhteen pistoon käytetty aika t [min] $t_{pisto} = \frac{pistonsyv.}{n_{keskim} \times f}$	Pistosorvauskokeeseen kuluva lastuamisaika t [min] $t_{koe} = t_{pisto} \times pistojenlkm$
1	1003,61	0,21	51,90
2	1003,61	0,21	25,95
3	1003,61	0,21	20,76
4	1003,61	0,21	17,02
5	1003,61	0,21	12,87
6	1003,61	0,21	10,38

Alkuarvot:Syöttö $f = 0,15$ mm/rLastuamisnopeus $v = 140$ m/min

Teräpalan leveys [mm]	Keskimääräinen sorvin karan pyörimisnopeus yhden piston aikana [rpm] $n_{keskim} = \frac{20v}{\pi}[(\ln 74) - (\ln 24)]$	Yhteen pistoon käytetty aika t [min] $t_{pisto} = \frac{pistonsyv.}{n_{keskim} \times f}$	Pistosorvauskokeeseen kuluva lastuamisaika t [min] $t_{koe} = t_{pisto} \times pistojenlkm$
1	1003,61	0,17	41,52
2	1003,61	0,17	20,76
3	1003,61	0,17	16,61
4	1003,61	0,17	13,62
5	1003,61	0,17	10,30
6	1003,61	0,17	8,30

Alkuarvot:Syöttö $f = 0,18$ mm/rLastuamisnopeus $v = 140$ m/min

Teräpalan leveys [mm]	Keskimääräinen sorvin karan pyörimisnopeus yhden piston aikana [rpm] $n_{keskim} = \frac{20v}{\pi}[(\ln 74) - (\ln 24)]$	Yhteen pistoon käytetty aika t [min] $t_{pisto} = \frac{pistonsyv.}{n_{keskim} \times f}$	Pistosorvauskokeeseen kuluva lastuamisaika t [min] $t_{koe} = t_{pisto} \times pistojenlkm$
1	1003,61	0,14	34,60
2	1003,61	0,14	17,30
3	1003,61	0,14	13,84
4	1003,61	0,14	11,35
5	1003,61	0,14	8,58
6	1003,61	0,14	6,92

Alkuarvot:Syöttö $f = 0,18$ mm/rLastuamisnopeus $v = 160$ m/min

Teräpalan leveys [mm]	Keskimääräinen sorvin karan pyörimisnopeus yhden piston aikana [rpm] $n_{keskim} = \frac{20v}{\pi}[(\ln 74) - (\ln 24)]$	Yhteen pistoon käytetty aika t [min] $t_{pisto} = \frac{pistonsyv.}{n_{keskim} \times f}$	Pistosorvauskokeeseen kuluva lastuamisaika t [min] $t_{koe} = t_{pisto} \times pistojenlkm$
1	1146,98	0,12	30,27
2	1146,98	0,12	15,14
3	1146,98	0,12	12,11
4	1146,98	0,12	9,93
5	1146,98	0,12	7,51
6	1146,98	0,12	6,05

Alkuarvot:Syöttö $f = 0,18$ mm/rLastuamisnopeus $v = 200$ m/min

Teräpalan leveys [mm]	Keskimääräinen sorvin karan pyörimisnopeus yhden piston aikana [rpm] $n_{keskim} = \frac{20v}{\pi}[(\ln 74) - (\ln 24)]$	Yhteen pistoon käytetty aika t [min] $t_{pisto} = \frac{pistonsyv.}{n_{keskim} \times f}$	Pistosorvauskokeeseen kuluva lastuamisaika t [min] $t_{koe} = t_{pisto} \times pistojenlkm$
1	1433,72	0,10	24,22
2	1433,72	0,10	12,11
3	1433,72	0,10	9,69
4	1433,72	0,10	7,94
5	1433,72	0,10	6,01
6	1433,72	0,10	4,84

Alkuarvot:Syöttö $f = 0,18$ mm/r

Piston syvyys = 25 mm

Pistojen lukumäärä = 25/100 kpl

Lastuamis- nopeus v [m/min]	Keskimääräinen sorvin karan pyörimisnopeus yhden piston aikana [rpm] $n_{keskim} = \frac{20v}{\pi}[(\ln 74) - (\ln 24)]$	Yhteen pistoon käytetty aika t [min] $t_{pisto} = \frac{pistonsyv.}{n_{keskim} \times f}$	25:teen pistoon kuluva lastuamis- aika [min]	Pistosorvauskokeeseen kuluva lastuamisaika t [min] $t_{koe} = t_{pisto} \times pistojenlkm$
140	1003,61	0,14	3,46	13,84
160	1003,61	0,14	3,03	12,11
200	1003,61	0,14	2,42	9,69
250	1003,61	0,14	1,94	7,75

Koe	M _q - arvo- sana	Syöttö f [mm/r]	Lastuamis- nopeus v [m/min]	Mittaus											
				1			2			3			4		
				VB _B [mm]		Aika t [min]	VB _B [mm]		Aika t [s]	VB _B [mm]		Aika t [s]	VB _B [mm]		Aika t [s]
				max	keskim		max	keskim		max	keskim		max	keskim	
1	9,4	0,18	140	0,08	0,06	3,46	0,09	0,07	6,92	0,95	0,08	10,38	0,1	0,09	13,84
2	9,5	0,18	160	0,10	0,09	3,03	0,13	0,12	6,05	0,13	0,12	9,08	0,13	0,12	12,11
3	9,5	0,18	200	0,06	0,05	2,42	0,09	0,08	4,84	0,10	0,09	7,27	0,12	0,10	9,69
4	5,7	0,18	200	0,10	0,09	2,42	0,10	0,09	4,84	0,10	0,09	7,27	0,11	0,10	9,69
5	0	0,18	200	0,09	0,06	2,42	0,10	0,09	4,84	0,11	0,10	7,27	0,14	0,13	9,69
6	7,8	0,18	250	0,07	0,07	1,94	0,08	0,08	3,88	0,09	0,09	5,81	0,09	0,09	7,75