

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

PINNANLAADUN MÄÄRITYSTEKNIIKAT JA MITTAUSLAITTEET
VIIMEISTELYSORVAUKSEN YHTEYDESSÄ

SURFACE QUALITY MEASUREMENT TECHNIQUES AND MEASURING
DEVICES FOR FINISHING TURNING APPLICATIONS

Susanna Tähtinen 13.03.2009

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENTEET JA MERKINNÄT

1	JOHDANTO.....	1
2	VIIMEISTELYSORVAUS JA ERI PROSESSIMUUTTUJIEN VAIKUTUS PINNANLAATUUN	1
2.1	Lastuamisparametrit	2
2.2	Teräpalan geometria.....	3
2.3	Teräpalamateriaalit	5
2.4	Case kovasorvaus: Kovien osien viimeistelysorvaus.....	6
	2.4.1 Teräpalamateriaalit.....	6
	2.4.2 Valkoinen kerros.....	7
	2.4.3 Prosessin eri muuttujien vaikutus valkoiseen kerrokseen	7
	2.4.4 Prosessin eri muuttujien vaikutus pinnankarheuteen	10
2.5	Lastuamisvoimat ja värähtelyt.....	12
3	PINNANLAADUN YLEISIMMÄT MITTARIT	14
3.1	Pinnankarheus.....	15
4	PINNANKARHEUDEN MITTAAMISMENETELMÄT	19
4.1	Mittauskärkilaite	20
4.2	Akustinen emissio.....	22
4.3	Konenäkö.....	23
4.4	Laser ja valkoinen valo	24
5	MARKKINOILLA OLEVAT MITTAUSKÄRKILAITTEET	24
5.1	Taylor Hobson	25
5.2	Qualitest.....	26
5.3	Mitutoyo	26
5.4	Tesa.....	27
6	MITTAUSKÄRKILAITTEIDEN VERTAILU.....	28
6.1	Mittauksen monipuolisuus.....	28
6.2	Laitteen monikäyttöisyys.....	29
6.3	Muita huomioita	29
7	YHTEENVETO	30

LÄHTEET

LIITTEET

LYHENTEET JA MERKINNÄT

a_p	lastuamissyvyys [mm]
b	lastun leveys [mm]
B	teräpalan sivusärmä
CBN	cubic boron nitride, kuutiohilainen boorinitridi
f	syöttö [mm/r]
H	teräpalan pääsärmä
HRC	Rockwell-C kovuus
i	mittausjaksonpituus mittauskärkikojeella mitattaessa [mm]
l_n	mittauspituus mittauskärkikojeella mitattaessa [mm]
r	timanttineulan kärjen ryöristyssäde [μm]
VB_c	teräpalan viistekuluminen [mm]
v	värähtelyistä aiheutuva laaksokohdan ero teoreettisesta laakson kohdasta [mm]
v_c	lastuamisnopeus [m/s]
v_f	syöttönopeus [mm/s]
z	pinnankarheuden R_a -arvon funktio
R_a	pinnankarheuden aritmeettinen keskiarvo [μm]
R_t	pinnankarheuden arvo, perustuu mittausalueella olevien huippujen ja laaksojen maksimietäisyyksiin [μm]
R_p	pinnankarheuden arvo, korkeimman huipun etäisyys keskilinjasta [μm]
R_q	R_a -arvoa vastaava RMS-arvo, funktion z neliön juuri [μm]
R_v	pinnankarheuden arvo, matalimman laakson etäisyys keskilinjasta [μm]
R_y	pinnankarheuden arvo, maksimiprofiilinsyvyys [μm]
R_z	pinnankarheuden arvo, matalimman laakson etäisyys korkeimmasta huipusta [μm]
S_m	profiilin keskijako, huippujen keskimääräinen etäisyys [mm]
α	Päästökulma [$^\circ$]
β	Teroituskulma [$^\circ$]
γ	Rintakulma [$^\circ$]
ε	Kärkikulma [$^\circ$]

κ	Asetuskulma [°]
λ	Viettökulma [°]
φ	Jättökulma [°]

1 JOHDANTO

Tämä kandidaatintutkielma on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston konetekniikan koulutusohjelmaan. Työssä käsitellään viimeistelysorvauksessa saavutettavaa pinnanlaatua, sekä pinnan muodostumiseen vaikuttavia muuttujia. Lisäksi työssä käsitellään pinnanlaadun yleisimpiä määritelmiä ja pinnankarheuden mittaustapoja, sekä lopuksi esitellään markkinoilla olevia pinnankarheuden mittalaitteita. Case esimerkkinä teoriaosuudessa on esitelty kovasorvaus.

Koneenosat ovat yhteydessä muihin koneenosiin pintansa välityksellä. On tärkeää tietää millainen pinta kohteessa tarvitaan ja millainen pinta valmistusmenetelmäksi valitulla viimeistelymenetelmällä on mahdollista saavuttaa. Ennalta määritetty pinnankarheuden vaatimus asettaa rajoitteet käytettäville työstötekniikoille ja pinnankarheuden mittaamiselle. Nykyaikaiset materiaalit, työkalut, teräpalat ja työstökoneet mahdollistavat joissakin tapauksissa kappaleiden viimeistelyn sorvaamalla hionnan sijasta. Mittalaitteiden pieni koko ja helppokäyttöisyys helpottavat laadun valvontaa.

2 VIIMEISTELYSORVAUS JA ERI PROSESSIMUUTTUJIEN VAIKUTUS PINNANLAATUUN

Sorvaus on lastuavan työstön menetelmä, jossa esimerkiksi istukkaan tai tasolaikkaan kiinnitettyä työkappaletta työstetään teräkelkkaan kiinnitetyllä työkalulla. Syöttö ja asetusliikkeet tehdään teräkelkan avulla työkappaleen suhteen. Sorvaamalla voidaan valmistaa mm. lieriömäisiä ja kartiomaisia pintoja, sorvata tasoa tai muotoja, porata reikiä pyörintäakselille tai kierteyttää. Työstettäviä kappaleita ovat esimerkiksi voimansiirtoakselit, sähkömoottoreiden ja vaihteistojen akselit, ruuvit, tiivisteholkit ja laakerikannet. (Ansaharju & Maaranen 1997, 161; Aaltonen 1997, 176-177.)

Sorvaus voidaan jakaa rouhinta- ja viimeistelysorvaukseen. Rouhintasorvauksen tavoitteena on tehokas aineenirrotus. Rouhinnassa käytettävät työkalut ovat mahdollisimman tukevia. Viimeistelysorvauksen tavoitteena on valmistaa kappale,

jolla on kappaleelta vaadittu pinnankarheus ja mitta- ja muototoleranssit. Sorvattaessa syntyvän pinnan profiili riippuu terägeometriasta, syötöstä, lastuamisnopeudesta, sekä työkalun ja työkappaleen värähtelyistä. Viimeistelysorvauksessa käytetään pientä lastuamissyvyyttä ja syöttöä, sekä suurta lastuamisnopeutta, jolloin muodostuu kevyttä lastua. Käytettäessä suurta nirkonsädettä saavutetaan lisäksi tasaisempi aaltoprofiili ja pienempi pinnankarheuden arvo. Työstössä esiintyvät värähtelyt aiheuttavat muutoksia syntyvän pinnan profiiliin. (Aaltonen 1997, 177; Jang 1995, 462.)

Viimeistelysorvausta voidaan käyttää viimeistelevänä työvaiheena hionnan sijasta pyörähdyssymmetrisille kappaleille silloin, kun sillä voidaan saavuttaa kappaleelta vaadittava pinnankarheus. (Sandvik 2008a, A15.) Työstettävän kappaleen pinnankarheuden vaatimus on määritelty teknisissä asiakirjoissa tai piirustuksissa. Vaatimus voi olla pinnankarheuden yläraja, alaraja tai enimmäisarvo. Ala- tai ylärajaa käytettäessä pintaa pidetään hyväksyttävänä, kun vaaditusta pinnankarheudesta ei-haluttuun suuntaan poikkeavia mittaustuloksia on korkeintaan 16 %. Enimmäisarvoa käytettäessä yksikään mittaustulos ei saa ylittää vaadittua pinnankarheusarvoa. Mikäli vaatimusta ei ole, ei pintaa tarvitse mitata. (SFS-ISO 4288, 2-3.)

Pinnankarheus vaikuttaa usealla tavalla kappaleen kestoikään. Hyvä pinnankarheus pidentää kappaleen kestoikää väsyttävässä kuormituksessa, pienentää kitkakerrointa ja kulumisnopeutta, sekä parantaa pinnan korroosionkestoa ja ulkonäköä. (Gillibrand et al. 1996, 809)

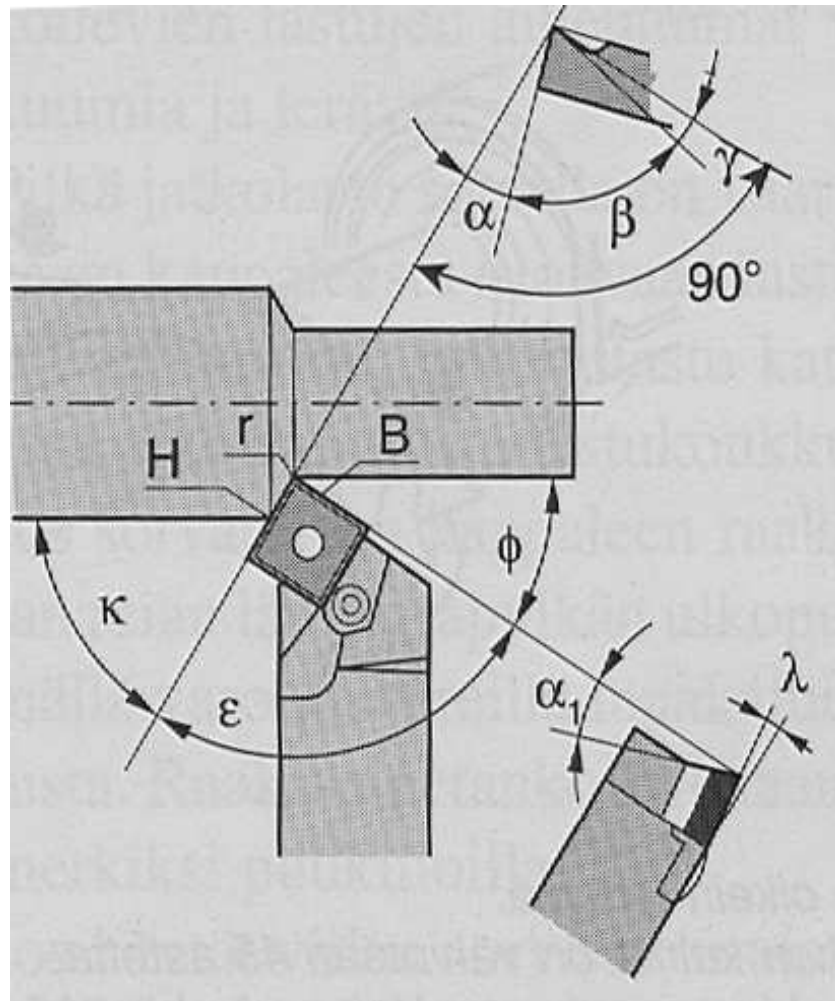
2.1 Lastuamisparametrit

Lastuamisessa syntyvä pinnanlaatu ja terän kestoikä määräytyvät valittujen lastuamisparametrien perusteella. Lastuamisparametrit ja terän geometria pyritään valitsemaan siten, että irtoava lastu murtuu. (Kauppinen 1989, 42) Keskeisimpiä lastuamisparametreja viimeistelysorvauksen kannalta ovat lastuamissyvyys a_p [mm], syöttö f [mm/r] ja lastuamisnopeus v_c [m/s] (Andersson, 1997, 6).

Lastuttavan materiaalin ja tavoiteltavan pinnankarheuden perusteella valitaan teräpalamateriaali, teräpalan muoto, lastuamissyvyys, -syvyys ja syöttö. Liitteessä 1 on esitetty ohjearvoja lastuamissyvyydelle ja syötölle erilaisia materiaaleja viimeistelysorvattaessa. (Sandvik Coromant 2008b, 26, 27, 53, 59, 73, 95, 97.)

2.2 Teräpalan geometria

Terän pinnoilla ja särmillä on omat tehtävänsä sorvauksessa. Kuvassa 1 on esitetty sorvauksen teräkulmat.



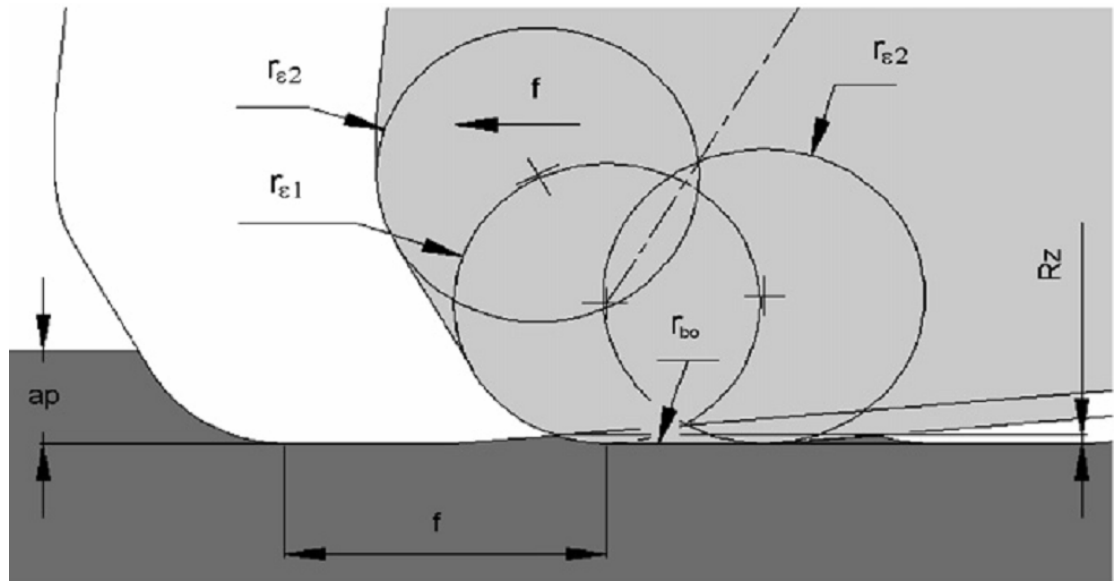
Kuva 1. Teräkulmat oikeakätisessä sorvauksessa. (Ansaharju & Maaranen 1997, 176)

Pääsärmä H leikkaa lastun irti työkappaleesta. Se on syöttösuunnan puoleinen särmä. Terän nirkko (kuvassa r) on kohta, jossa pääsärmä, sivusärmä B ja niitä vastaavat päästöpinna yhdistyvät. Asetuskulma κ on perustasossa mitattuna pääsärmen H ja sorvattavan pinnan välinen kulma. Asetuskulmaa muuttamalla saadaan aikaan erityyppistä lastua, jos syöttö ja lastuamissyvyys pysyvät vakiona. Rintakulma γ on perustason ja rintapinnan välinen kulma kohtisuorasti pääsärmää vasten mitattuna. Rintakulma on yleensä positiivinen, kun kyseessä on viimeistelysorvaus. Suuri positiivinen rintakulma vaikuttaa heikentävästi terän mekaaniseen kestävyYTEEN, mutta parantaa lastunmuodostusta. Päästökulma α on päästöpinna ja perustasoa vastaan olevan kohtisuoran tason välinen kulma. Päästökulma on aina positiivinen, sillä jos kulma olisi negatiivinen, hankaisi päästöpinna työstettävää kappaletta. Viimeistelysorvauksessa käytetään yleensä suurta päästökulmaa. Teroituskulma β on päästökulman ja rintakulman välinen kulma kohtisuoraan lastuavaa pääsärmää vasten mitattuna. Rintakulman, päästökulman ja teräkulman summa on 90° . Koska viimeistelysorvauksessa päästö- ja rintakulma ovat tyypillisesti suuret, on teroituskulma pieni. Jättökulma φ on sorvatun pinnan ja sivusärmen välinen kulma perustasossa mitattuna. Liian pienen jättökulman käyttö aiheuttaa kitkaa ja tärinää. (Ansaharju & Maaranen 1997, 35-38, 178-180.)

Työkalun ulottuvuus, monipuolisuusvaatimukset ja asetuskulma määräävät millainen terä tulee valita. Viimeistelysorvauksessa tulee usein ulottuvuuden johdosta käyttää kapeita, kärkikulmaltaan 35° rombisia teriä. Nirkon sädetä valittaessa tärkeimpänä kriteerinä on syntyvä pinnanlaatu. Nirkon säde ja syöttö on suhteutettava toisiinsa. Yleensä viimeistelysorvauksessa syöttö saisi olla korkeintaan kolmasosan nirkon säteestä. (Aaltonen 1997, 180-181; Sandvik 2008, A5.)

Wiper-terät ovat nirkon muotoilultaan perinteisistä teristä eroavia teräpaloja, joilla voidaan saavuttaa perinteisiä teriä suurempi tuottavuus ja parempi pinnanlaatu syöttöä muuttamalla. Kuvassa 2 on esitetty wiper-terän geometriaa. Terässä on perinteisten teräpalojen yhden nirkon säteen sijaan erikoisesti muotoiltu nirkko, jossa on useampi kuin yksi nirkon säde. Sorvatussa samalla syötöllä kuin

perinteisellä terällä, saadaan wiper-terällä aikaan keskimäärin kaksi kertaa parempi pinnanlaatu. Vastaavasti, jos pinnanlaadun halutaan pysyvän entisellään, voidaan syöttö kaksinkertaistaa, ja siten lyhentää koneistusaika puoleen entisestä. (Sandvik 2008a, A15.)



Kuva 2. Wiper-terän terägeometria. r_{e1} ja r_{e2} ovat wiper-terän nirkon säteiden kaaret, r_{bo} on siloittavan osan säde nirkon kaarien välissä. (Grzesik&Wanat 2006, 1989)

2.3 Teräpalamateriaalit

Lastuavissa menetelmissä käytettäviä teräaineita ovat pikateräkset, pinnoitetut kovametallit, keraamiset aineet, timantit, cermetit ja boorinitridit. Kovia materiaaleja, kuten kuumalujia superseoksia tai karkaistuja materiaaleja sorvattaessa terämateriaalina tulisi käyttää keraameja tai kuutioboorinitridejä. Keraamista valmistettujen teräpalojen terägeometria on aina negatiivinen, boorinitridiset terät voivat olla terägeometrialtaan joko negatiivisia tai positiivisia. (Aaltonen et al. 1997, 183; Sandvik 2008a, A62.)

Superkovia teräaineita ovat (keino)timantit ja boorinitridit. Pääsääntöisesti boorinitrideillä lastutaan kovia yli 45...50 HRC:tä olevia metallisia aineita, ja

timanteilla kovia ei-metallisia aineita. Boorinitriditerillä teräpala kuluu sitä vähemmän, mitä kovempaa työstettävä aine on. Boorinitridien teräpalamateriaaliksi soveltuvat kidemuodot ovat kuutiohilainen CBN ja würzitrakenteinen WBN. (Kauppinen 1997, 55-56) Tamizharasan et al. mukaan (2004, 671) CBN-terät ovat 3-4 kertaa kalliimpia kuin keraamiset terät, mutta niiden kestoikä on 4-20 -kertainen.

2.4 Case kovasorvaus: Kovien osien viimeistelysorvaus

Kovasorvaus on karkaistujen tai luonnostaan kovasta materiaalista olevien osien viimeistelysorvausta. Tällöin kappaleen kovuus on tyypillisesti 45–70 HRC (Thiele&Melkote 1999, 216). Karkaistujen osien viimeistely tapahtuu perinteisesti hiomalla, mutta korvaamalla hionta kovasorvauksella, voidaan alentaa tuotantokustannuksia, lyhentää läpimenoaikaa, sekä parantaa tuotteen laatua. Kovasorvauksen etuja hiontaan verrattuna ovat sen suurempi lastuvirta, pienempi energiankulutus ja lastuamismesteen tarpeettomuus. Sorvaamalla pystytään valmistamaan erilaisia profiileja samalla työkalulla ja koneistamaan useita työvaiheita yhdellä kiinnityksellä. Hiomakoneiden kuormitusta voidaan myös jakaa sorveille, ja siten lisätä tuottavuutta. Kovasorvauksella voidaan päästä tarkkuusluokkaan IT5 ja pinnanlaatuun $R_a=0,1\mu\text{m}$, kun koneistusolosuhteet ovat erittäin hyvät. (Tamizharasan et al. 2004, 671; Grzesik&Wanat,2006, 1988; Pasel et al. 2005, 341; Scheffer et al. 2003, 973.)

2.4.1 Teräpalamateriaalit

Kovasorvauksessa terämateriaalina käytetään keraameja tai matala- tai runsasseosteisia kuutiohilaisia boorinitridejä (CBN). Runssaseosteiset, seostus yli 70%, C-luokan CBN-terät ovat lujempia kuin matalaseosteiset, seostus alle 50%, A-luokan terät. A-luokan terillä on vastaavasti pidempi kestoikä. (Tamizharan et al. 2004, 671.)

CBN-terät ovat muihin terämateriaaleihin verrattuna hauraampia, minkä johdosta terägeometriaan tulee kiinnittää erityistä huomiota terän murtumisen välttämiseksi. Kovasorvauksessa työkaluun kohdistuu suuria voimia, joiden johdosta

terägeometriaan tulee kiinnittää huomiota. Kovasorvaukseen tarkoitetuissa terissä on negatiivinen leikkuugeometria. Työkalun kulumisen vaikuttaa heikentävästi pinnanlaadun tasalaatuisuuteen. Kovasorvaus voidaan tehdä ilman lastuamisnestettä, kun terämateriaalina käytetään CBN:ää. (Özel et al. 2005, 262; Grzesik&Wanat 2006, 1988; Thiele&Melkote 1999, 216.)

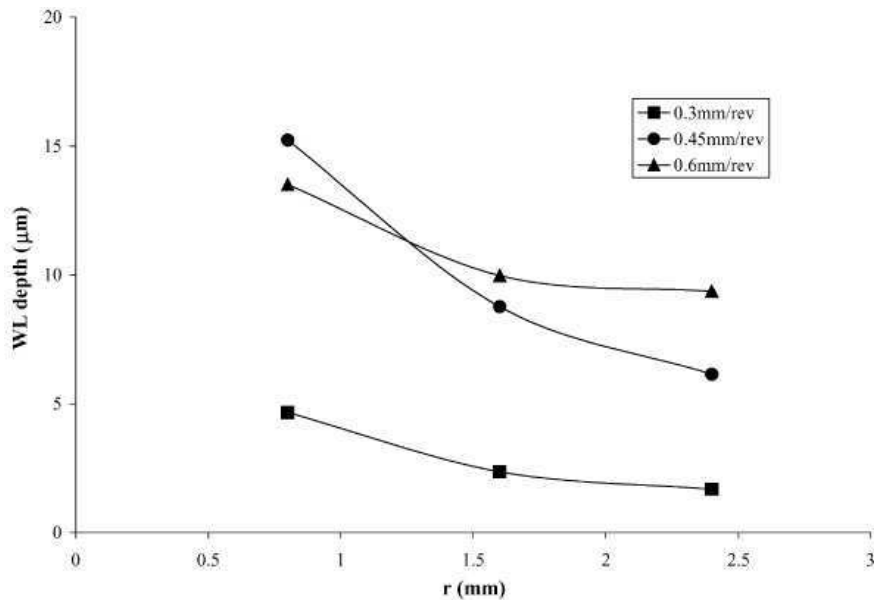
2.4.2 Valkoinen kerros

Kovasorvaus voi aiheuttaa huomattavasti paljon enemmän ei-toivottuja muutoksia kappaleen mikrorakenteeseen, kuten jäännösjännityksiä ja jäännösausteniittiä, kuin mitä hionnassa syntyisi (Grzesik&Wanat 2006, 1988). Karkaistua kappaletta sorvattaessa työkappaleen pintakerrokseen voi muodostua ns. valkoinen kerros. Valkoinen kerros –nimitys johtuu kerroksen ominaisuudesta näkyä valkoisena optisessa mikroskoopissa. Korkean lämpötilan johdosta työkappaleen pintakerros karkenee. Karkennut kerros on tyypillisesti perusainetta kovempaa suuremman austeniittipitoisuuden johdosta. Lämpövaikutus ylettää noin lastuamissyvyyden kymmenesosan syvyydelle pinnan alapuolelle. Valkoisen kerroksen alapuolella on pehmennyt, ylikarkennut, martensiittinen tumma kerros. Valkoisen kerroksen muodostuminen johtuu työkappaleen pintakerroksissa olevista veto- ja puristusjännityksistä, sekä teräpalan viistekulumisesta. Jäännösjännitykset vaikuttavat työkalun kulumiseen ja siten saavutettavaan pinnanlaatuun. (Tamizharasan et al. 2004, 677; Scheffer et al. 2003, 974; Chou& Evans 1999, 1864-1867.)

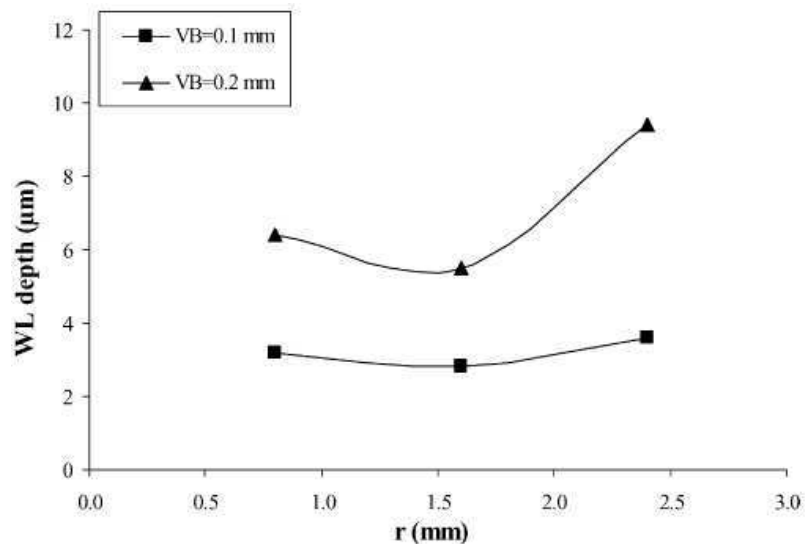
2.4.3 Prosessin eri muuttujien vaikutus valkoiseen kerrokseen

Terän kulumisen, syöttö ja nirkon säde vaikuttavat valkoisen kerroksen muodostumiseen. Kuvassa 3 on esitetty eräässä tapauksessa eri syötöillä ja nirkonsäteillä syntyneet valkoisen kerroksen paksuudet karkaistua terästä sorvatessa. Kulumattomalla terällä lastuttaessa valkoista kerrosta muodostuu enemmän pienillä nirkonsäteillä ja suurin valkoista kerrosta aiheuttava tekijä on suuri syöttö. Kuvassa 4 on esitetty kuluneella terällä sorvattaessa syntyvä valkoisen kerroksen paksuus eräässä tapauksessa. Kuluneella terällä sorvatessa

valkoista kerrosta muodostuu enemmän suurilla nirkonsäteillä. (Chou&Song 2004, 262-263.)



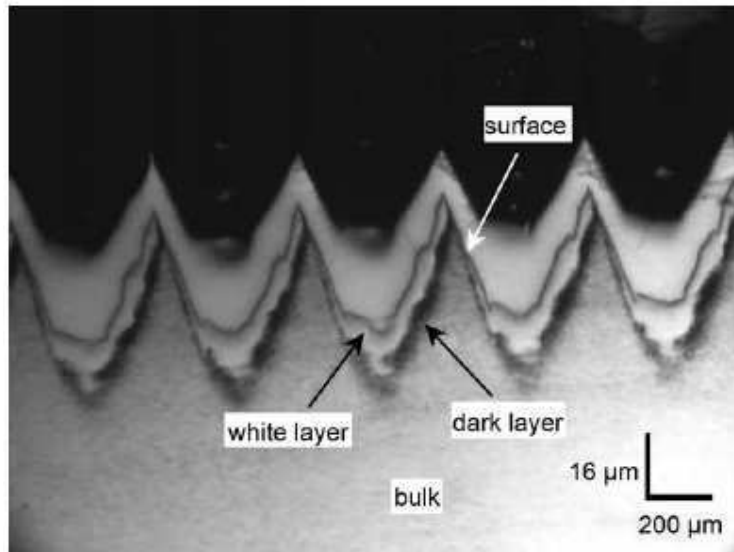
Kuva 3. Valkoisen kerroksen syntyminen uudella terällä sorvattaessa. (Chou&Song 2004, 263) (Suom. WL depth= valkoisen kerroksen syvyys)



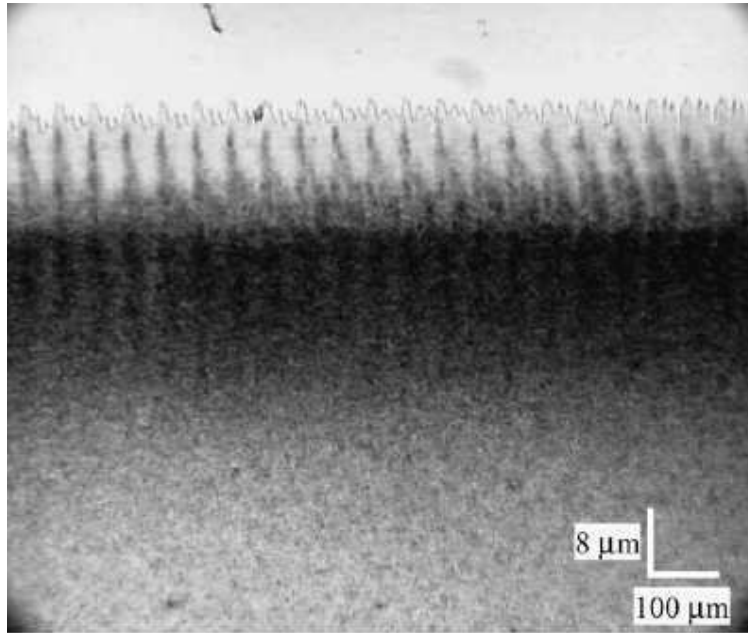
Kuva 4. Valkoisen kerroksen syntyminen kuluneella terällä sorvattaessa. $f=0,05\text{mm}/r$ (Chou&Song 2004, 264) (Suom. WL depth= valkoisen kerroksen syvyys)

Valkoista kerrosta syntyy vähemmän kulumattomalla työkalulla ja pienellä syötöllä sorvattaessa. Kuvassa 5 on esitetty suurennos tyypillisestä valkoisesta kerroksesta, joka on syntynyt kulumattomalla terällä suurella syötöllä sorvattaessa. Valkoista

kerrosta muodostuu vähemmän pääsärmän leikkaamalle alueelle. Todennäköinen syy tälle on muilla kohdilla esiintyvät huomattavan suuret hiertymät. Kuvassa 6 on suurennos kuluneella terällä pienellä syötöllä sorvatessa syntyneestä valkoisesta kerroksesta. Valkoisen ja tumman kerroksen muutosalue ei ole enää yhtä selkeästi havaittavissa kuin kulumattomalla terällä sorvattaessa. Tämä on seurausta terän kulumisesta ja pienemmästä syötöstä, jolloin uudesta leikkuusta aiheutunut lämpö muokkaa jo syntynyttä pintaa. (Chou&Song 2004, 262-263.)



Kuva 5. Tyypillinen valkoinen kerros suurella syötöllä kulumattomalla työkalulla sorvattaessa. $V_c=2\text{m/s}$, $f=0,45\text{ mm/r}$, $r=0,8\text{ mm}$, $VB=0$. (Chou&Song 2004, 262) (suom. white layer= valkoinen kerros, dark layer=tumma kerros, bulk=perusaine, surface=pinta)



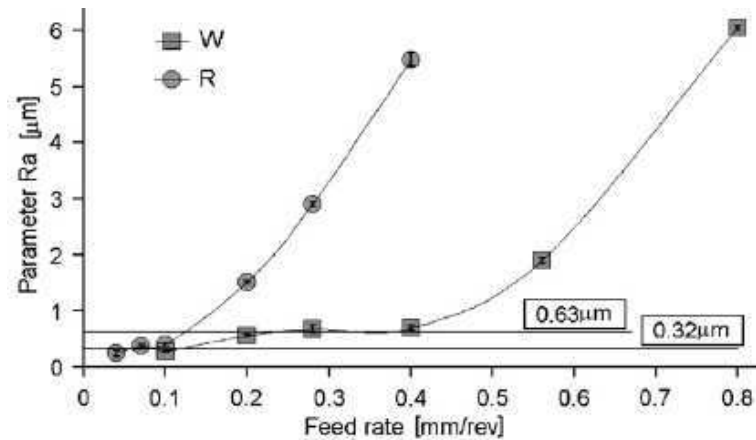
Kuva 6. Tyypillinen valkoinen kerros pienellä syötöllä ja kuluneella työkalulla sorvattaessa. $V_c=3$ m/s, $f=0,05$ mm/r, $r=2,4$ mm, $VB=0,2$ mm (Chou&Song 2004, 264)

2.4.4 Prosessin eri muuttujien vaikutus pinnankarheuteen

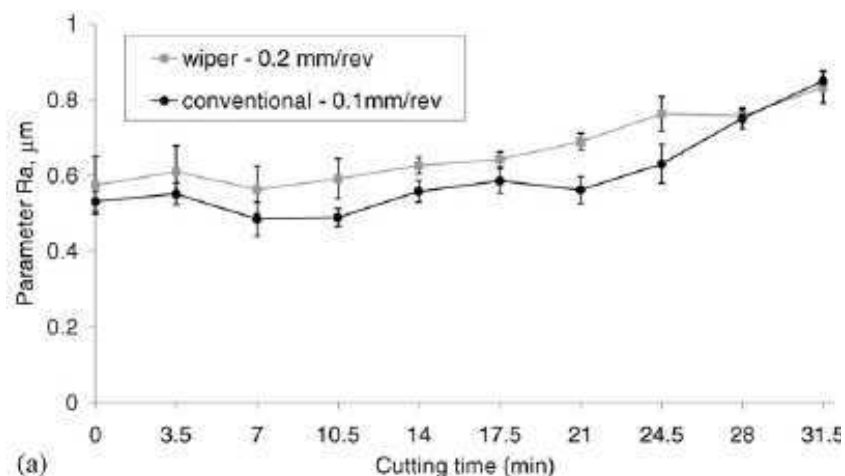
Kovasorvauksessa on huomattu wiper-terien mahdollistavan paremman pinnanlaadun ja kestäväen pidempään kuin perinteisen malliset terät. Chou ja Song (2004, 260) sekä Grzesik ja Wanat (2006, 1989-1990) ovat tutkineet karkaistun 41Cr4-tangon sorvausta titaanikarbidiseostetuilla keraamisilla terillä, kovuudet 60...62 sekä 60 ± 1 HRC vastaavassa järjestyksessä. Chou ja Song tutkivat nirkonsäteen merkitystä pinnanlaatuun ja terän kulumiseen perinteisillä terillä sorvattaessa nirkonsäteiden ollessa 0,8; 1,6 ja 2,4 mm (seostus 70% Al_2O_3 , 30% TiC). Grzesik ja Wanat tutkivat sekä perinteisillä, että wiper-terillä (seostus 71% Al_2O_3 , 28% TiC ja 1% muuta) aikaansaataavaa pinnanlaatua. Tällöin perinteisessä terässä nirkonsäde oli 0,8mm. Wiper-terällä sorvattiin tällöin yli kaksinkertaisilla syötöillä verrattuna perinteisiin teriin.

Grzesikin ja Wanatin (2006, 1989-1990) kokeissa wiper-terän havaittiin mahdollistavan kaksi kertaa paremman pinnanlaadun tai kaksinkertaisen syötön pinnanlaadun pysyessä lähes samana perinteiseen terägeometriaan verrattuna.

Kuvissa 7 ja 8 on esitetty syötön ja lastuamisen keston aiheuttaman työkalun kulumisen aiheuttamat muutokset pinnanlaatuun. Choun ja Songin (2004, 260) kokeissa havaittiin pinnanlaadun R_a - arvon poikkeavan teoreettisesta arvosta (kts. kaava 2, s. 16) lähinnä pienellä syötöllä. Pinnanlaatuun vaikuttaa työkalun viistekuluminen. Nirkon säteellä ei ollut vaikutusta terän kulumiseen tai kestoikään.

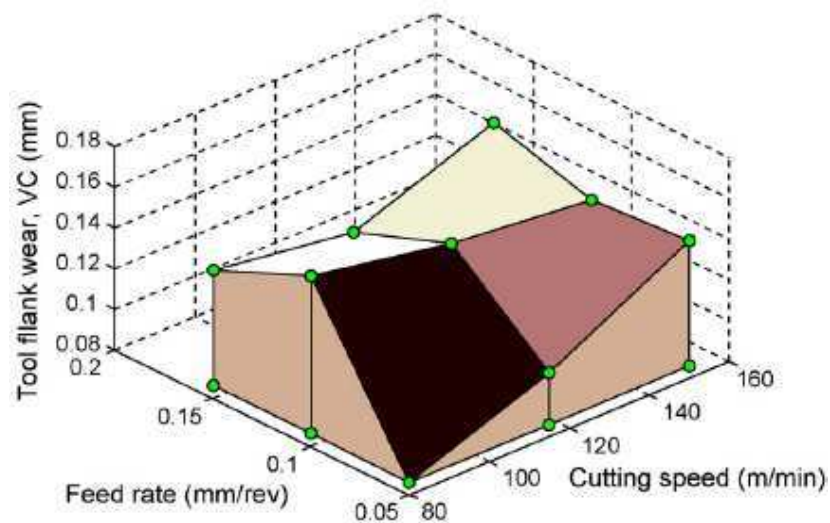


Kuva 7. Syötön vaikutus pinnanlaatuun. W=wiper-terä, R=perinteinen terä. (Grzesik&Wanat 2006, 1991) (Suom. feed rate=syöttö, parameter=parametri)



Kuva 8. Lastuamisajan aiheuttaman työkalun kulumisen vaikutus pinnanlaatuun syötön pysyessä vakiona. (Grzesik&Wanat 2006, 1991) (Suom. cutting time=lastuamisaika, conventional=perinteinen)

Grzesikin ja Wanatin 41Cr4-tangon wiper-terillä tehdyissä sorvauskokeissa tutkittiin lastuamisnopeuden vaikutusta viistekulumiseen. Kokeissa lastuttiin, kunnes terän viistekuluminen oli saavuttanut kulumisrajan $VB_c=0,15$ mm. Aikaa tähän meni n. 15 minuuttia. Kuvassa 9 on kuvattu terän viistekuluminen syötön ja lastuamisnopeuden suhteen 15 minuutin lastuamisen jälkeen. Vähäisintä kuluminen on pienellä syötöllä ja pienellä lastuamisnopeudella. Lastuamisnopeuden tai syötön kasvaessa lisääntyy kuluminen, mutta toisaalta tällöin paranee syntävä pinnanlaatu lastuamisajan ollessa alle 15 minuuttia. (Özel et al. 2007, 196-197.)

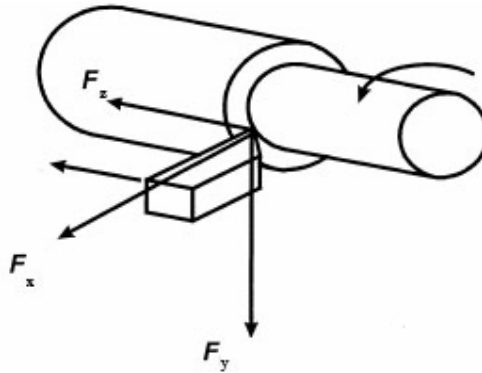


Kuva 9. Syötön ja lastuamisnopeuden vaikutus terän viistekulumiseen. (Özel et al. 2007, 196) (suom. Tool flank wear= työkalun viistekuluminen, Feed rate= syöttö, Cutting speed=lastuamisnopeus)

2.5 Lastuamisvoimat ja värähtelyt

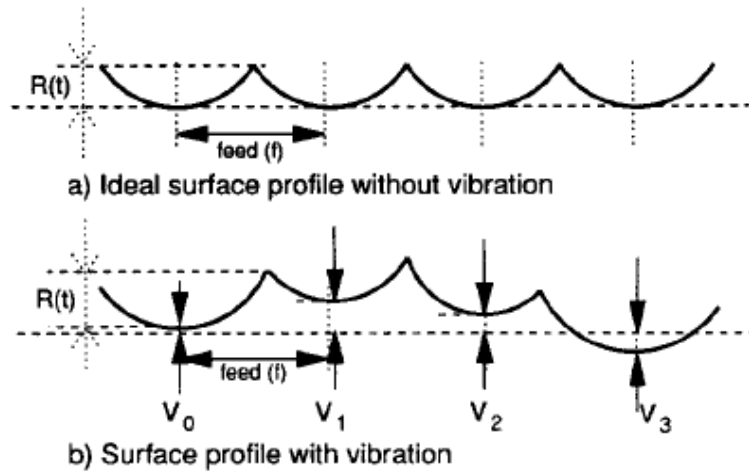
Päälastuamisvoima F_y on aina suurin sorvauksessa vaikuttava voimakomponentti. Se vaikuttaa y-akselin suunnassa, eli työkappaleen pinnan tangentin suuntaan. Päälastuamisvoimaa pienempi syöttö- tai aksiaalivoimaksi kutsuttava, z-akselin suuntainen voima vaikuttaa syöttöliikkeen suuntaisesti. Pienin vaikuttava voima on x-akselin, eli työkappaleen normaalin suuntainen passiivivoima. (Andersson 1997, 14.)

Tavallisesti lastuamisvoimat esitetään suorakulmaisessa koordinaatistossa, jossa origo sijaitsee teräpalan kärjessä (Andersson 1997, 14). Kuvassa 10 on esitetty tällaisessa koordinaatistossa vaikuttavat voimat.



Kuva 10. Lastuamisvoimat suorakulmaisessa koordinaatistossa. F_x on passiivivoima, F_y on päälastuamisvoima ja F_z on syöttövoima. (mukaillen Thiele&Melkote 1999, 218).

Värähtelyt ovat sorvauksessa esiintyviä dynaamisia lastuamisvoimia, jotka vaikuttavat työkalun käyttäytymiseen ja työstössä aikaansaattavaan pinnanlaatuun. Työkappaleen ja työkalujen tukeva kiinnitys vähentää työstössä esiintyviä värähtelyjä ja mahdollistaa paremman pinnanlaadun saavuttamisen. Työstössä esiintyvät värähtelyt aiheutuvat muun muassa lastuamisvoimista, työkalupitimen dynaamisista ominaisuuksista ja työkappaleen pinnan kovuuden heterogeenisuudesta. Etenkin kovasorvauksessa työkalun, työkappaleen ja sorvin tukevuus on tärkeää hyvän pinnanlaadun aikaan saamiseksi ja hauraiden CBN-terien murtumisen estämiseksi. Värähtelyjen amplitudia voidaan tarkastella mittaamalla siirtymää työkappaleen ja terän välillä. Kuvassa 11 on esitetty sorvauksessa syntyvän pinnan muodostuminen teoreettisesti ja värähtelyt huomioon ottaen. (Özel et al. 2005, 264; Jang et al. 1995, 454-455.)

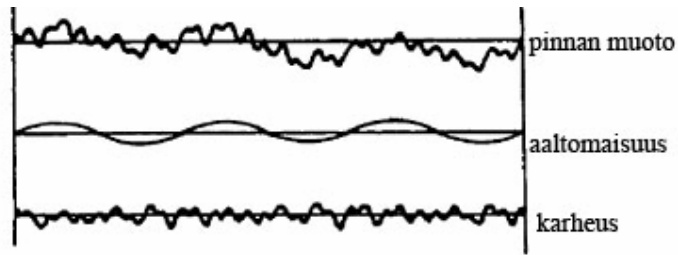


Kuva 11. Pinnan profiilin muodostuminen teoreettisesti (a), ja värähtelyt huomioon ottaen (b). (Jang et al. 1995, 455) Suom. feed=syöttö

3 PINNANLAADUN YLEISIMMÄT MITTARIT

Pinnanlaatua voidaan mitata pinnankarheuden, aaltomaisuuden, muodon ja kappaleen pinnan mittatarkkuuden suhteen. Pinnankarheuden mitat perustuvat pinnan huippujen ja laaksojen välisiin korkeuksiin, etäisyyksiin, tai niiden muotoon. (Grzesik&Wanat 2006, 1990-1991.)

Pinta muodostuu pienen, keskisuuren ja suuren taajuuden omaavista muodoista. Suuritaajuiset muodot muodostavat pinnankarheuden ja keskisuuren taajuuden muutokset muodostavat aaltomaisuuden. Kappaleen muodot, kuten sylinterimäisyys, aiheuttavat pienet taajuudet. Kuvassa 12 on esitetty suuren ja keskisuuren taajuuden sekä pinnan yleisen muodon yhteys. Nykyaikaisilla mittalaitteilla voidaan mitata useita eri pinnanlaadun mittareita. On kuitenkin tärkeää erotella eri taajuudet toisistaan ennen tiedon prosessointia. Erottelulla voidaan jäljittää työstömenetelmien aiheuttamat pinnanmuodot ja siten kehittää ja valvoa työstöprosessia. Lisäksi esimerkiksi laakereissa ja kampiakseleissa pinnanmuodoilla on myös toiminnallinen tehtävä. Aaltomaisuuden taajuudet voidaan suodattaa pois, jotta voidaan tutkia pinnankarheutta. (Raja et al. 2002, 222; SFS-ISO 4287/2, 2.)



Kuva 12. Pinnanmuodon ja lyhyen sekä keskipitkän aallonpituuden yhteys. (mukaillen Raja et al. 2002, 223)

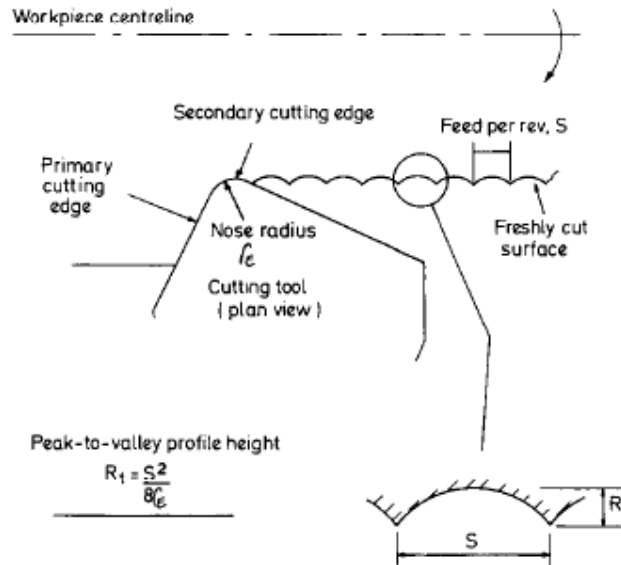
Aaltomaisuus on sorvatussa kappaleessa yleisesti esiintyvä, haitallinen pinnan aaltomainen muoto. Aaltomaisuus esiintyy usein jaksottaisesti, ja se on seurausta koneistuksessa esiintyneistä värähtelyistä tai epäsymmetrisistä voimista. Aaltomaisuus on erityisen haitallista pinnoilla, jotka ovat kontaktissa muiden pintojen kanssa. (Form Talysurf 2008, 4)

3.1 Pinnankarheus

Sorvauksessa terän pääsärmä ja syöttöliike saavat aikaan pinnan, jonka sivuprofiili muistuttaa huippuja ja laaksoja. Huipun ja laakson välistä korkeutta merkitään tunnuksella R_t , jonka teoreettinen arvo voidaan laskea kaavalla

$$R_t = \frac{s^2}{8r_e} , \quad (1)$$

jossa s on syöttö [mm] ja r_e on nirkon säde [mm]. Kuvassa 13 on esitetty pinnan profiilin muodostuminen sorvauksessa. (Gillibrand et al. 1996, 809-810.)



Kuva 13. Profiilin muodostuminen. (Gillibrand et al. 1996, 810) (Suomenn. workpiece centerline=työkappaleen keskilinja, primary cutting edge=pää särmä, secondary cutting edge=toisisijainen särmä, Feed per rev=syöttö per kierros, nose radius=nirkon säde, cutting tool=lastuava työkalu, freshly cut surface=vasta lastettu pinta, peak-to-valley height=huipun ja laakson välinen mitta)

Yleisin käytetty pinnankarheuden mitta on epätasaisuuden aritmeettinen keskiarvo R_a , jonka teoreettinen arvo voidaan laskea kaavalla

$$R_a = \frac{s^2}{32 \cdot r_e}, \quad (2)$$

jossa s on syöttö [mm] ja r_e nirkon säde [mm] (Tamizharasan et al. 2004, 677). Pinnankarheuden R_a -arvo on siis suoraan verrannollinen syötön neliöön ja kääntäen verrannollinen nirkon säteen kertalukuun. Syötön kasvaessa tulee nirkonsäteen pienentyä, jotta pinnankarheus ei heikkenisi. Pinta on sitä sileämpi, mitä pienempi R_a -arvo on. Kappaleiden pinnankarheuden vaatimuksia suunniteltaessa tulisi suosia standardien mukaisia pinnankarheuden arvoja. Taulukossa 1 on esitetty standardin SFS-ISO 468 suosittelemat pinnankarheuden arvot R_a , R_z , R_y ja S_m .

Taulukko 1. Pinnankarheuden suositellut arvot SFS-ISO 468 mukaisesti. (1986, 2-4)

R_a	R_z ja R_v	S_m
[μm]	[μm]	[mm]
		0,006
0,012		0,012
0,025	0,025	0,025
0,050	0,050	0,050
0,100	0,100	0,100
0,20	0,20	0,20
0,40	0,40	0,40
0,80	0,80	0,80
1,60	1,60	1,60
3,2	3,2	3,2
6,3	6,3	6,3
12,5	12,5	12,5
25	25	
50	50	
100	100	
200	200	
400	400	
	800	
	1600	

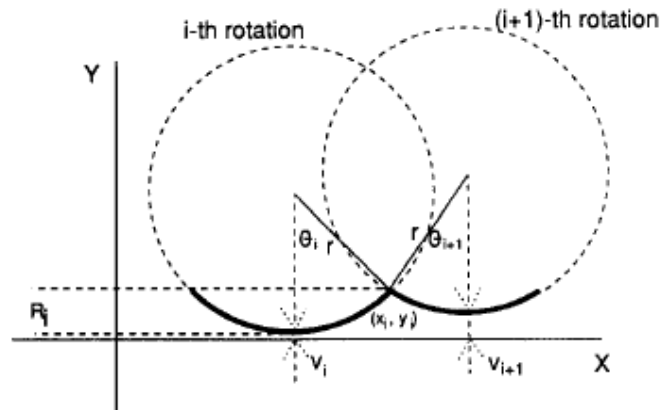
Käytännössä teoreettinen pinnankarheuden arvo ja saavutettu pinnankarheus ovat eri asiat. Teräpalkan nirkonsäde ja terän kuluneisuus vaikuttavat pinnankarheuteen. Lastuamisnopeus vaikuttaa terän irtosärmän syntyyn. Suuremmilla nopeuksilla särmää ei synny, mutta pinnankarheuden kaavat eivät ota tätä huomioon. Toisaalta syöttö pitää myös valita tapauskohtaisesti parhaan laadun saavuttamiseksi. Työstössä esiintyvät värähtelyt vaikuttavat myös pinnankarheuteen terän ja työkappaleen radiaalisen etäisyyden muutoksista johtuen. (Gillibrand et al. 1996, 810, Tamizharasan et al., 2004, 677; Jang et al. 1995, 454.)

Todellinen pinnankarheuden R_t -arvo muodostuu toteutuneiden huippujen ja laaksojen asemien perusteella. Kuvassa 14 on kuvattu pinnankarheuden R_t -arvon laskemiseksi tarvittavat muuttujat. Huippujen paikat (x_i, y_i) määräytyvät seuraavasti:

$$x_{i+1} = r \cos \theta_{i+1} - f \cdot (i+1) \text{ ja} \quad (3)$$

$$y_{i+1} = r \sin \theta_{i+1} + v_{i+1}(t), \text{ jossa} \quad (4)$$

r on nirkon säde [mm], θ on kulma, joka saa arvoja $\pi < \theta_{i+1} < 1,5 \pi$, f on syöttö [mm/r] ja v on värähtelyistä aiheutuva laaksokohdan etäisyys vertailutasosta [mm]. Koordinaattien (x,y) ja laaksokohtien sijainnin perusteella voidaan ratkaista R_t -arvo. (Jang et al 1995, 455-456.)

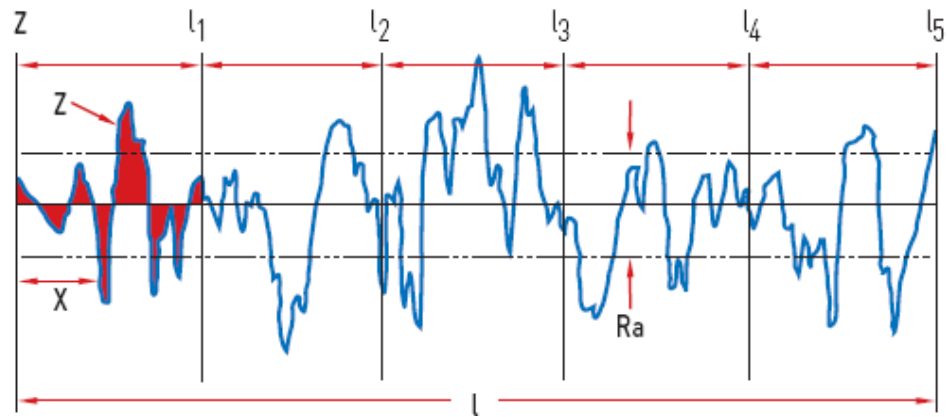


Kuva 14. Värähtelyt huomioon ottavan pinnankarheuden R_t -arvon huomioitavat muuttujat. (Jang et al. 1995, 455) Suom. i-th rotation = i:s kierros, (i+1)-th rotation= (i +1):nen kierros

R_a -arvo voidaan laskea matemaattisesti kaavalla 5,

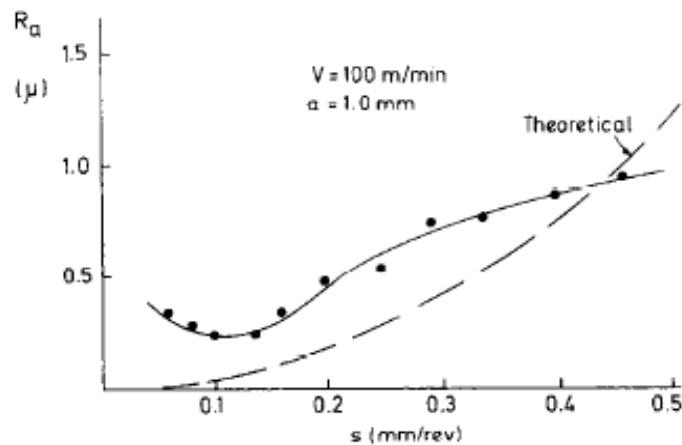
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx, \quad (5)$$

jossa l_{1-5} ovat mittausjaksojen pituudet [mm] ja $z(x)$ on pinnan muodon funktio z x :n suhteen (eli profiilin ja keskiviivan välinen pinta-ala). Kuvassa 15 funktio z on kuvattu viiden mittausjakson alueella, joka on tyypillinen mittauspituus. Kuvassa 15 on esitetty pistekatkoviivalla R_a -arvon ylä- ja alaraja sekä punaisella yhden mittausalueen osalta funktio z . (Surtronic Duo 2008, 7)



Kuva 15. Pinnanlaadun R_a -arvon muodostuminen. (Surtronic Duo 2008, 7)

Kuvassa 16 on esitetty teoreettisen ja todellisen pinnankarheuden eroavaisuudet korkeahiilistä materiaalia sorvattaessa tyypillisessä tapauksessa. Todellinen R_a -arvo on teoreettista arvoa huonompi, sillä se ei ota huomioon työstössä tapahtuvia haitallisia muutoksia.



Kuva 16. Syötön ja pinnankarheuden tyypillinen yhteys teoreettisesti ja käytännössä. (Gillibrand et al. 1996, 810)

4 PINNANKARHEUDEN MITTAAMISMENETELMÄT

Käytännön mittauksessa saatu pinnankarheuden arvo muodostuu laitteen todellisten toimintojen mittaustuloksista. Saadun mittaustuloksen ja todellisen pinnan erot johtuvat ideaalisen ja optimaalisen mittaustavan menetelmävirheestä,

mittauksessa tapahtuvasta laitevirheestä, sekä valitusta mittaustavasta riippuvasta menetelmän poikkeamasta. (SFS-ISO 4287, 5.)

Pinnankarheutta mitattaessa pinnan profiilia voidaan muuntaa tahallisesti tai tahattomasti. Tahallista muuntamista on esimerkiksi pinnan muodon muuntaminen sähköiseksi signaaliksi elektronisten mittalaitteiden käytön mahdollistamiseksi tai aaltomaisuuden suodattaminen karheuden mittaamiseksi. Tahatonta muuntamista on puolestaan esimerkiksi mittalaitteesta johtuvat mittaamisen virheet. (SFS-ISO 4287, 2.)

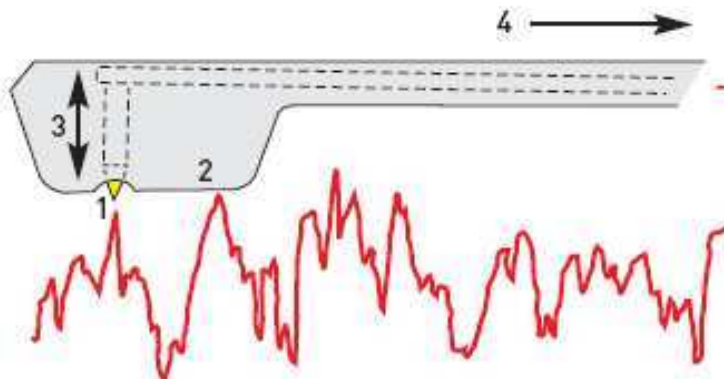
Seuraavissa kappaleissa on esitelty pinnankarheuden mittaamisen tapoja. Mittaus voi perustua mittauskärkilaitteiden signaalin sähköiseen suurennukseen, akustisen emission työstössä esiintyvien värähtelyjen havainnointiin tai optisten menetelmien kappaleen valon heijastuskyvyn mittaukseen. Pinnankarheutta voidaan arvioida myös mittapalojen avulla ihmisen aisteja hyödyntäen mittapalaa ja työkappaletta verraten. Vertailumenetelmää ei kuitenkaan ole tässä työssä esitelty, sillä vertailumenetelmällä saadut tulokset riippuvat voimakkaasti mittauksen suorittavan henkilön kokemuksesta ja ammattitaidosta.

4.1 Mittauskärkilaite

Perinteinen tapa mitata pinnankarheutta on käyttää tarkkuusneulaan perustuvaa pinnankarheuden mittalaitetta. Timanttista tarkkuusneulaa laahataan mitattavaa pintaa pitkin ja elektronisesti vahvistettu kohtisuora signaali tulkitaan laitteistossa pinnanlaadun arvon määrittämiseksi. Neulamenetelmän tarkkuus riippuu käytettävän tarkkuusneulan kärjen pyörityssäteestä, kuormasta, iskunpituudesta ja liukumisesta aiheutuvasta suodattumisesta. Alle 2,5 µm pinnankarheudella ovat neulaan vaikuttavat häiriöt jo hyvin suuria. Kappaleen muoto rajoittaa mittaamista joissain tapauksissa, sillä kosketukseen perustuva mittaustapa vaatii kappaleelta luoksepäästävyyttä. Lisäksi menetelmä on aina off-line-mittausta, joten sitä ei voida hyödyntää adaptiivisessa työstössä tai reaaliaikaiseen mittaamiseen. (Lee at al. 2002, 295, Persson 1996, 109)

Neulamenetelmässä voidaan käyttää kuvassa 17 esitetyn laitteiston tapaista järjestelmää, jolloin anturiin kuuluu neulan lisäksi liukukenkä, joka toimii

mekaanisena suodattimena mitattavan kappaleen yleiselle kaarevuudelle ja sellaisille huipuille, jotka ovat korkeampia kuin liukukengän säde. Normaalisissa mittauksissa voidaan käyttää sellaista liukukenkää, jonka kaarevuussäde on vähintään 50 kertaa mittausjakson pituus. Mitattavan työkappaleen muotojen ollessa monimutkaiset, tarkkuusvaatimusten ollessa tiukat tai mittausjakson pituuden ollessa yli 2,5 mm suositellaan mittauksessa käytettäväksi riippumatonta peruspintaa. (Surtronic Duo 2008, 4; SFS-ISO 4288 1988, 5.)



Kuva 17. Neulamenetelmän mittauslaitteisto. 1= neula, 2=liukukenkä, 3=neulan liikkuma matka (z), 4= mittauksen suunta (x). (Surtronic Duo 2008, 4)

Mittauskärkilaitteen mitaaman mittausjakson pituus l määräytyy mitattavan kappaleen pinnankarheuden vaatimuksen perusteella. Standardin SFS-ISO 4288 (1988, s. 4-5) mukaisesti mittauskärkilaitteen mittausjakson (cut-off) tulee olla yhtä pitkä kuin työstömenetelmästä ja pinnankarheudesta riippuva mittausjakson pituus l (sampling length), ellei muita vaatimuksia ole esitetty. Taulukossa 2 on esitetty mittausjakson pituudet (sampling length) ja mittauspituudet (käytännössä yleensä $5 \cdot$ mittausjakson pituus) jaksollisen profiilin aiheuttamalla työstötavalla valmistetuille kappaleille. Profiilin keskijako S_m tulee määrittää mitattavasta pinnasta tai profiilikäyrästä.

Taulukko 2. Mittausjakson pituus suureita R_a , R_z ja R_y mitatessa. (SFS-ISO 4288, 1988, 5)

Profiilin keskijako S_m [mm]		Mittausjakson pituus l [mm]	Mittauspituus l_n [mm]
yli	asti		
0,01	0,032	0,08	0,4
0,032	0,1	0,25	1,25
0,1	0,32	0,8	4,0
0,32	1	2,5	12,5
1	3,2	8,0	40,0

Mittauskärkilaitteella tapahtuva mittaus tulee suorittaa siten, että profiilin korkeuseroihin perustuvat pinnankarheuden suureet, kuten R_a , saavat suurimmat mahdolliset arvot. Täten sorvattuja kappaleita tulee tyypillisesti mitata syötön suunnassa. Mittaus tulee suorittaa sellaisella alueella, jolla kriittisten arvojen oletetaan silmämääräisen arvion perusteella olevan. (SFS-ISO 4288, 1988, 5.)

4.2 Akustinen emissio

Akustisen emission, AE, signaalit ovat työstökoneen erittäin korkeataajuisia värähtelyitä. Akustinen emissio on muodonmuutosten ja mikrorakenteen murtumien vapauttaman energian muodostamaa aaltoliikettä, jota voidaan hyödyntää lastuavassa työstössä työkalun kunnan työstönaikaisessa valvonnassa. Työstettäessä syntyy jatkuvia ja epäjatkuvia signaaleja. Jatkuvat signaalit aiheutuvat esimerkiksi terän ja työkappaleen välisestä kitkasta, mikrorakenteen muutoksista, sekä lastun irtoamisesta. Epäjatkuvat, äkilliset signaalit ovat seurausta lastun ja terän törmäyksistä tai terän murtumisesta. Värähtelyjen amplitudi riippuu terän kunnosta ja työstöparametreista. Dynaaminen lastuamisvoima ja ääni voidaan suodattaa pois, jolloin terän murtuminen on helpompi havaita. (Lee 2002, 157-158; Vihinen et al. 1997, 68-69.)

Monitorointijärjestelmät mittaavat koneen tai työstötapahtuman tilaa. Järjestelmien havaitsemat poikkeamat prosessoidaan, ja niiden syyt ja paikat selvitetään. Akustisessa emissiossa ongelmana on sellaisten signaalien havaitseminen, jotka riippuvat sekä ajasta, että taajuudesta. Tällaista signaalia synnyttää mm. teräpalan kulumisen. Signaalin havaitsemiseen on kehitelty monia menetelmiä,

kuten parametrianalyysi, aikasarja-analyysi, Fourier-muunnos ja aallonpituusmuunnos. (Tönshoff et al. 2000, 681-682; Chen&Li 2007, 970.)

Akustisen emission havaitsemat muutokset työstössä perustuvat työkalun viistekulumiseen. Tönshoffin et al. (2000, 683) tutkimuksissa havaittiin kulumattomalla, $VB_c=0$ μm , ja viistekuluneella, $VB_c=150$ μm , terällä kovasorvatussa taajuusvasteen maksimi amplitudin kasvavan kuluneella terällä kasvaneen kosketuspinta-alan johdosta. Valkoisen kerroksen syntyminen ja lisääntyneet lämpö- ja voimakuormat aiheuttavat suuremman amplitudin myös alhaisemmilla taajuuksilla. Viistekuluminen aiheuttaa akustisen emission signaalien vaimenemista, joiden johdosta havaitut taajuudet ovat matalampia, kuin kulumattomalla terällä sorvattaessa.

4.3 Konenäkö

Konenäköjärjestelmää hyödyntäen voidaan mitata pinnankarheutta. Pinnasta otettavan kuvan ja työstöarvojen perusteella voidaan luoda matemaattinen malli, jonka tuloksena saadaan syntyneen pinnan pinnankarheus. Konenäköjärjestelmässä ”kuva” on kaksiulotteinen valointensiteettijakaumafunktio. Funktio kertoo tietyssä pisteessä olevan valon intensiteetin, kirkkauden. Kuvan kirkkaus määräytyy heijastuneen ja absorboituneen valon summana, mitkä johtuvat käytettävästä valosta ja työkappaleen materiaalista. Funktion ääriarvoiksi yleensä asetetaan musta ja valkoinen. Jotta kuvaa voitaisiin tulkita tietokoneella, tulee se muuttua digitaaliseen muotoon. Paikkakoordinaateista ja paikan värisävystä muodostetaan halutun tarkkuuden perusteella määräytyvän kokoinen $N \times M$ –matriisi, jonka tietokone tulkitsee digitaalisena kuvana. Lee et al. ovat tutkineet sorvatun hiiliteräksen pinnanlaatua konenäön avulla. Tutkimuksissa havaittiin neulamenetelmällä ja konenäön avulla mitattujen pinnanlaadun R_a –arvojen olevan hyvin vertailukelpoisia. Suurin ero mitatuissa pinnanlaadun arvoissa oli 11,3 %, mikä sorvauksen tuottaman pinnanlaadun luontaisen heiton johdosta on hyväksyttävien rajojen sisällä. (Lee et al. 2002, 295-297,300.)

4.4 Laser ja valkoinen valo

Laservalon polarisaation avulla voidaan mitata pinnanlaatua reaaliaikaisesti tai jälkikäteen. Pinta heijastaa sille osoitettua laservaloa ja valon heijastuman muodon perusteella voidaan määrittää pinnankarheus. Koneistuksen suunta määrää valon pääsääntöisen heijastussuunnan. Sileä pinta heijastaa valoa peilimäisesti - pinnankarheuden lisääntyessä alkaa heijastunut valo hajaantua. (Tay et al. 2003, 2)

Sorvissa tapahtuvassa laserilla tehtävässä optisessa pinnankarheuden mittauksessa tulee valon säteen ja työkappaleen halkaisijasuhteen olla pieni, jotta valo ei hajaantuisi kappaleen kaarevuuden johdosta. Anturin tulee kyetä keräämään heijastuneita säteitä laajalta alueelta ja syötön suuntaisen kuvaustaajuuden tulee olla riittävän suuri, ettei työkappaleen pyörimisestä johtuva valon sivusuuntainen hajaantuminen aiheuta virheitä tuloksiin. Lisäksi anturin tulee olla tukevasti kiinnitetty ja riittävästi suojattu, mutta se ei kuitenkaan missään vaiheessa saa vaikuttaa itse koneistukseen. (Tay et al. 2003, 3)

Mitatun valojakauman ja kaavojen avulla voidaan laskea pinnankarheus. Eri työstötavoille on erilaisia kaavoja, joissa kertoimet riippuvat käytetystä työstömenetelmästä. Esimerkiksi timantilla sorvatulle pinnalle voidaan ratkaista pinnankarheus R_a kaavasta

$$S_d = 648 \cdot R_a + 1,63, \quad (6)$$

jossa S_d on valon (3 mW diodilaser) intensiteettijakauma. Timantilla sorvatessa on pinnanlaadun ja valon intensiteettijakauman yhteys 99,8 % lineaarinen, kun pinnanlaatu R_a on 0,005...0,1 μm . Ero perinteisellä neulamenetelmällä mitattuihin tuloksiin on alle 10 %. (Tay et al., 2003, 6, 10)

5 MARKKINOILLA OLEVAT MITTAUSKÄRKILAITTEET

Pinnankarheuden mittaamiseen on olemassa useita erityyppisiä laitteita. Tässä työssä käsitellään neljän eri valmistajan pinnankarheuden mittaamiseen tarkoitettuja mittauskärkilaitteita. Laitteita vertailuun on valittu jokaiselta

valmistajalta kaksi. Kaikki laitteet ovat yksinkertaisia, kädessä kannettavia malleja, jotka soveltuvat esimerkiksi konepajassa tapahtuvaan laaduntarkkailuun. Laitteiden yksityiskohtaiset tiedot on esitetty liitteessä 2. Laitteiden mittaamista arvoista on mainittu yleisimmin käytössä olevat pinnankarheuden arvot: R_a , R_t , R_p , R_q , R_v , R_y ja R_z .

5.1 Taylor Hobson

Surtronic Duo

Surtronic Duo on pieni pinnanlaadun mittaamiseen tarkoitettu laite. Laite voidaan jakaa korkeussuunnassa kahteen erilliseen osaan, joista toinen suorittaa mittauksen ja toisessa on näyttö. Laite mittaa pinnankarheutta timanttineulan avulla, jonka kärjen pyöristyssäde on $r=5 \mu\text{m}$. Mitattavia muuttujia ovat R_a ja R_z sekä laitteen kehittyneemmässä versiossa myös R_t , R_v ja R_p . Laite käyttää ainoastaan 0,8 mm mittausjakson pituutta. R_a – arvon mittaus onnistuu 40 μm :iin asti resoluution ollessa 0,01 μm . Muiden arvojen mittaus onnistuu 199 μm :iin asti resoluutin ollessa 0,1 μm . Mittarin yleinen tarkkuus on 95 % + 0,1 μm . (Surtronic Duo 2008, 2-3.)

Surtronic 25

Surtronic 25 on pinnankarheuden mittalaite, jota voidaan käyttää joko paikalleen telineeseen kiinnitettynä tai se voidaan siirtää käsin haluttuun paikkaan. Laite mittaa pinnanlaatua timanttineulan avulla. Laitteen mittauskärjen anturi on vaihdettava, joten timanttineulan kärjen säde ja laitteen ulottuvuus riippuvat käytettävästä mittauspäästä. Laite mittaa mm. pinnankarheuden arvoja R_a , R_z , R_t ja R_p . (Surtronic 25 2007, 2.)

Surtronic 25 –laitteessa mittausanturi on laitteen ulkopuolella erillisen varren päässä. Tämä mahdollistaa kappaleiden sisäisten ja alapuolisten pintojen mittauksen ilman vaikeita kiinnityksiä. Laitteen vakiovarren pituus on 60,8 mm ja halkaisija 6 mm sekä neulan kärjen pyöristyssäde 5 μm (saatavilla myös 10 μm versio). Pieniä reikiä voidaan mitata mittakärjellä, jonka anturin varsi on 14,5 mm:n matkalta halkaisijaltaan 1,8 mm ja neulan pyöristyksen säde on 2 tai 5 μm .

Kaaarevia pintoja voidaan mitata käyttäen mittakärkeä, jossa luisti on sivulla. Lisäksi on saatavilla mittakärkeä O-rengasuria, teräviä reunoja tai karheampia pintoja varten. Laitteessa on sisäinen 100 mittaus tuloksen muisti ja lisäksi RS232-portti, johon voidaan liittää PC tai tulostin tulosten tarkastelua tai tallentamista varten. Tietokoneella voidaan erillistä ohjelmistoa apuna käyttäen tarkastella mitattua profiilia. Laitteessa on muunneltava mittausjakson pituus. Mittauspituus voi olla 0,25; 0,8; 2,5 tai 8 mm. Laitteen yleinen tarkkuus on 98 % ja mittausalue 0 – 300 μm resoluution ollessa 0,01 μm . (Surtronic 25 2007, 3,4,6.)

5.2 Qualitest

TR110

TR110 on pinnankarheuden mittalaite, joka mittaa pinnankarheuden arvoja R_a ja R_z . Laitteen mittauspäänä on timanttineula, jonka pyöristyssäde $r=5$ mm \pm 1 μm . Mittausalue R_a -arvolla on 0,05 - 10 μm . Mittauspituus on valittavissa pituuksista 0,25; 0,8 ja 2,5 mm. Laitteen tarkkuus on \pm 15 %. (TR110 2008.)

TR200

Pinnankarheuden mittalaite TR200 tukee arvojen R_a , R_z , R_y , R_q , R_t , ja R_p mittausta. Laitteessa on vaihdettava mittakärki. Mittauskärjen pyöristyssäde on aina $r=5$ μm , mutta mittakärjen ulottuvuus ja koko vaihtelevat valitun anturin mukaan. Mittauskärjen antureita on saatavilla reikien, alkaen $D > 2$ mm, mittaamiseen, kaarevien pintojen mittaamiseen sekä antureihin on saatavilla jatkovarsia, joilla voidaan mitata esimerkiksi 90 ° kulmassa. Mittauspituus on valittavissa pituuksista 0,25; 0,8 ja 2,5 mm. Laitteessa on RS232-portti PC:hen tai lisävarusteena myytävään tulostimeen liittämistä varten. PC:llä voidaan tarkastella mitattua profiilia. Mittausalue R_a :lla on 0,01 – 40 μm ja muilla 0,02 – 160 μm . (TR200 2008.)

5.3 Mitutoyo

SJ-201P

Pinnankarheuden mittalaite SJ-201P mittaa pinnankarheuden arvoja R_a , R_y , R_t , R_z , R_q ja R_p . Laitteen mittauspituus voidaan valita pituuksista 0,25; 0,8; 2,5 ja 8 mm. SJ-201P-mittalaitteessa on RS-232C-portti tiedonsiirtoa varten, sekä mahdollisuus saada lisävarusteena tulostin. Mitattua profiilia voidaan tarkastella laitteen näytöllä. (SJ-201P 2009.)

SJ-301

SJ-301 on pinnankarheudenmittalaite mittaa samoja yleisimpiä pinnanlaadun mittareita kuin SJ-201P. Mittauspituus on valittavissa pituuksista 0,25; 0,8; 2,5 ja 8 mm. Mittalaitteessa on kiinteästi asennettuna tulostin ja mitattua profiilia voidaan tarkastella laitteen näytöltä. (SJ-301 2009.)

5.4 Tesa

Rugosurf 10

Pinnankarheudenmittalaite Rugosurf 10 tukee R_a , R_t , R_q ja R_z arvojen mittaamista. R_a -arvon mittausalue on 0 – 40 μm ja R_t :n mittausalue on 0,05 – 160 μm . Mittauspituus voidaan valita pituuksista 0,25; 0,8 ja 2,5 mm. Laitteen timanttisen mittauskärjen pyöristyssäde on 5 μm . Mittauskärjen varsi on valittavissa erikseen. Kärkiä on saatavilla reikiä (alkaen $D > 4$ mm), uria, teräviä reunoja ja kaarevia pintoja varten. Laitteessa on 30 mittauksen sisäinen muisti, sekä RS-232 – portti tiedonsiirtoa varten. Tietokoneella voidaan tarkastella mitatun pinnan profiilikäyrää. (Rugosurf, 1-3.)

Rugosurf 10G

Rugosurf 10G mittaa R_a , R_t , R_q , R_z , R_p ja R_v -arvot. R_a :n mittausalue on 0 – 75 μm ja R_t :n 0,05 – 300 μm . Mittauspituuksia ovat 0,25; 0,8 ja 2,5 mm. Mittakärjen timanttisen kärjen pyöristyssäde on 5 μm . Laitteessa on 1000 mittauksen muisti ja RS-232 –portti tiedonsiirtoa varten. Rugosurf 10G:ssä on samat tiedonsiirto-ominaisuudet ja sama valikoima mittauskärkiä kuin Rugosurf 10:ssä. (Rugosurf, 2-3.)

6 MITTAUSKÄRKILAITTEIDEN VERTAILU

Edellisessä luvussa esiteltyjä mittalaitteita on vertailtu lähinnä niiden käytettävyyden kannalta. Laitteiden teknisiin eroavaisuuksiin ei oteta kantaa niiltä osin, joilta erot eivät vaikuta itse mittaustapahtumaan.

6.1 Mittauksen monipuolisuus

Kaikki esitellyt laitteet soveltuvat jokapäiväiseen mittaamiseen. Pienikokoisina laitteita on helppo siirtää, ja mitata siten esimerkiksi suurikokoisia ja raskaita kappaleita ilman tarvetta siirtää mitattavaa kappaletta. Kummassakin Mitutoyon ja Tesan sekä Taylor-Hobsonin Surtronic 25:ssä ja Qualitestin TR200:ssa on laitteen mittauskärki mittauslaitteen ulkopuolella erillisen varren päässä. Näillä laitteilla pystytään mittaamaan kappaleiden sisäpuolisia pintoja, uria ja koloja varren geometriasta riippuen. Surtronic 25, TR200, Rugosurf 10 ja 10G soveltuvat monipuolisemmin erityyppisten kappaleiden mittaamiseen erilaisiin kohteisiin suunniteltujen mittauskärkiensä ansiosta. Laitteilla onnistuu niin kaarevien tai terävien pintojen kuin urien tai reikien mittaaminen.

Kaikki esitellyt laitteet mittaavat useimpia, yleisimpiä teollisuudessa käytössä olevia pinnankarheuden arvoja. Metalliteollisuudessa selvästi yleisin R_a -arvo voidaan mitata kaikilla laitteilla. Kaikissa laitteissa, Surtronic Duo pois lukien, on myös mahdollista valita mittausjakson pituus. Esitellyistä mittauskärkikojeista kaikki, paitsi Surtronic Duo soveltuvat viimeistelysorvattujen metallikappaleiden mittaamiseen mittausjakojen pituuksiensa puolesta erinomaisesti. Surtronic Duon 0,8 mm mittausjakson pituus ei ole riittävän lyhyt viimeistelysorvauksella saavutetun pinnankarheuden mittaamiseksi luotettavasti, jos viimeistelysorvauksessa syntyneen pinnan pinnankarheuden arvo on todella hyvä, tai pintaa halutaan vertailla esimerkiksi hiotun tai silotetun pinnan kanssa.

Laitteista Surtronic Duo ja TR110 ovat ainoat, joihin ei ole mahdollista liittää ulkoista tulostinta. Ulkoisten tulostimien tulosteet eivät kuitenkaan yleensä ole pitkäaikaiseen säilytykseen soveltuvia, joten mikäli tuloksia halutaan arkistoida, tulee mittaustulokset tallentaa jossain muussa muodossa kuin mittauslaitteen lämpötulostimen tulosteella. Surtronic 25, TR200 sekä Rugosurf 10 ja 10G

voidaan liittää PC:hen (tai tulostimeen) RS232-portin avulla. Tiedon siirto PC:lle on erittäin hyvä ominaisuus, sillä tällöin tulokset ovat helposti tallennettavissa. Lisäksi monella valmistajalla on olemassa analysointiohjelmia mittaustuloksille, joilla voidaan tarkastella mitattua profiilia lähemmin.

6.2 Laitteen monikäyttöisyys

Surtronic 25, SJ-201P ja SJ-301 ovat laitteita, joita voidaan käyttää myös verkkovirtaan kytkettynä. Verkkovirtaan kytkeminen soveltuu käytettäväksi, kun mittaustoimintaa suoritetaan säännöllisesti tietyssä paikassa, kuten tarkastuspisteessä. Tällöin laite on aina käyttövalmis. Muiden laitteiden akku ja paristokäyttöisyys edellyttää käyttäjiä huolehtimaan akkujen lataamisesta tai paristojen saatavuudesta. Tämä saattaa aiheuttaa ongelmia, mikäli laitetta käyttävät useammat henkilöt, eikä tieto laitteen jäljellä olevasta toiminta-ajasta välity käyttäjien kesken. Vaihdeettava mittakärki ja valittava neulan pyörityssäde ovat hyviä ominaisuuksia, mikäli halutaan mitata montaa erilaista kohdetta.

6.3 Muita huomioita

Kaikki laitteet soveltuvat konepajassa tapahtuvaan laaduntarkkailuun ominaisuuksiensa puolesta. Kuitenkin, mikäli halutaan mitata viimeistelyjen kappaleiden pinnankarheutta, tulisi valita sellainen laite, jonka mittauskärjen säde on vaihdettavissa. Lisäksi mittausten tallennusmahdollisuus on hyvä ominaisuus, sillä tällöin tiedot voidaan siirtää talteen jälkikäteen, eikä mittaajan tarvitse kirjata tuloksia välittömästi ylös mittauksen tehtyään. Tämä helpottaa mm. mittaustulosten keskiarvon laskemista ja madaltaa kynnystä tallentaa tuloksia myöhempää analysointia varten. Tietokoneeseen liitettävissä olevista laitteista voidaan tuoda mittaustiedot tietokoneelle tarkempaa analysointia varten. Sellaiset laitteet soveltuvatkin parhaiten viimeistelysorvattujen kappaleiden pinnankarheuden mittaamiseen, sillä näistä laitteista saadaan mittaustulokset ja pinnan profiili siirrettyä tietokoneelle tarkempaa tarkastelua varten

7 YHTEENVETO

Viimeistelysorvaus on lastuavan työstön menetelmä, jota voidaan käyttää viimeistelevänä menetelmänä silloin, kun sillä voidaan saavuttaa kappaleelle asetettu pinnankarheuden vaatimus. Kappaleen pinnanlaatu muodostuu osan yleisestä muodosta, aaltomaisuudesta ja karheudesta. Syöttö ja teräpalan nirkon säde vaikuttavat voimakkaimmin työstössä aikaansaatavaan profiiliin, jonka huippujen ja laaksojen välisiä eroja kuvataan pinnankarheuden arvoilla. Syntyneeseen pintaan vaikuttavat lisäksi työstössä esiintyvät värähtelyt, lastuamisparametrit, työstettävä materiaali sekä teräpalan kuluminen.

Pinnankarheuden aritmeettinen keskiarvo, R_a , on pinnankarheuden arvoista yleisimmin käytetty. Pinnankarheutta voidaan mitata tarkkuusneulaan perustuvilla pinnankarheuden mittareilla, akustisen emission avulla tai konenäköä tai valkoista valoa apuna käyttäen. Tässä työssä tarkastelluista tarkkuusneulaan perustuvista mittalaitteista kaikki pystyvät mittaamaan R_a -arvon, sekä useimmat laitteet lisäksi huomattavan määrän muita arvoja. Osassa laitteista on sekä vaihdettava mittakärki, että valittavissa oleva tarkkuusneulan pyörityssäde. Ne vaikuttavat kappaleella mitattavissa olevien pintojen määrään. Mittalaite tulee valita siltä vaadittavien ominaisuuksien perusteella, joita voivat olla esimerkiksi mittaustulosten tallennuksen helppous, mahdollisuus mitata pinnankarheus esimerkiksi O-rengasurista tai koloista, mitattavien kappaleiden pinnankarheus tai mitattavien pinnankarheussuureiden kirjo. Kaikki esiteltyt laitteet soveltuvat viimeistelysorvattujen pintojen pinnankarheuden mittaamiseen. Kuitenkin olisi hyvä valita monipuolisempi laite viimeistelysorvattujen kappaleiden mittaamiseen, sillä tällöin tuloksia on helpompi vertailla eri työstömenetelmien välillä.

LÄHTEET

Aaltonen, K. 1997. Sorvaus. Teoksessa: Aaltonen, K. & Andersson, P. & Kauppinen, V. Koneistustekniikat. Porvoo, WSOY. s. 174-197.

Andersson, P. H. 1997. Lastuaminen. Teoksessa: Aaltonen, K. & Andersson, P. & Kauppinen, V. Koneistustekniikat. Porvoo, WSOY. s. 5-32

Ansaharju, Maaranen. 1997. Koneistus. Porvoo, WSOY. 586 s.

Chen, Xiaozhi & Li, Beizhi. 2007. Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. vol.33. s. 968–976.

Chou Y.K.& Evans C.J. 1999. White layers and thermal modeling of hard turned surfaces. International Journal of Machine Tools & Manufacture. vol. 39. s.1863–1881. Saatavissa: Compendex.

Chou, Y. Kevin & Song, Hui. 2004. Tool nose radius effects on finish hard turning. Journal of Materials Processing Technology. vol 148. s. 259–268. Saatavissa: Elsevier.

Form Talysurf. 2008. [tuote-esite]. 24 s. [julkaisupaikka tuntematon]. Saatavissa: <http://www.taylor-hobson.com/pdf/uk/FTSS2.PDF>

Gillibrand D.& Sarwar M.& Pierce C.T. 1996. The economic benefit of finish turning with coated carbide. Surface&coatings technology 86-87. s. 809-813. Saatavissa: Elsevier.

Grzesik W.& Wanat T. 2006. Surface finish generated in hard turning of quenches alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts. International journal of machine tools & manufacture 46. s. 1988-1995. Saatavissa: Elsevier.

Jang, Dong Young & Choi, Young-Gu & Kim, Hong-Gil, Hsiao, Alex. 1995. Study of the correlation between surface roughness and cutting vibration to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning. *International journal of machine tools and manufacture*. vol. 36. s. 453-464. Saatavissa: Elsevier.

Kauppinen, Veijo. 1986. *Teräaineet metallien lastuavassa työstössä*. Hämeenlinna. Karisto. oy. 77s.

Kauppinen, Veijo. 1989. *Konepajojen nykyaikaiset koneet ja konejärjestelmät*. Helsinki. Kyriiri oy. 133s.

Kauppinen, Veijo. 1997. *Teräaineet*. Teoksessa: Aaltonen, K. & Andersson, P. & Kauppinen, V. *Koneistustekniikat*. Porvoo, WSOY. s. 33-71.

Lee, B.Y. & Juan, H. & Yu, S.F. 2002. A Study of Computer Vision for Measuring Surface Roughness in the Turning Process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. vol 19. s.295–301. Saatavissa: Compendex.

Lee, Xiaoli. 2002. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. vol 42. s. 157–165. Saatavissa: Compendex.

Pavel, Radu & Marinescu, Ioan & Deis, Mick & Pillar, Jim. 2005. Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning. *Journal of Materials Processing Technology*. vol 170. s.341–349. Saatavissa: Elsevier

Persson, U. 1996. Measurement of surface roughness using infrared scattering. *Measurement*. vol 18. s.109-116. Saatavissa: Elsevier.

Raja, J. & Muralikrishnan, B. & Fu, Shengyu. 2002. Recent advances in separation of roughness, waviness and form. *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*. vol. 26. s. 222–235. Saatavissa: Elsevier.

SFS-ISO 468. 1986. Pinnankarheus. Suureet, niiden arvot ja yleisohjeet vaatimusten ilmoittamiseksi. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 4 s.

SFS-ISO 4287/2. 1988. Pinnankarheus. Sanasto. Osa 2: Pinnankarheussuureiden mittaaminen. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 5 s.

SFS-ISO 4288. 1988. Pinnankarheus. Säännöt ja menetelmät pinnankarheuden mittaamiseksi mittauskärkikojeilla. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 10 s.

Sandvik Coromant. 2008a. Tilausluettelo. [tuote-esite]. (Julkaisupaikka tuntematon). 1147 s. Saatavissa:

http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/FIN/MainCatalogue_2008.zip

Sandvik Coromant. 2008b. Corokey. [tuote-esite]. (Julkaisupaikka tuntematon). 208s. Saatavissa:

http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/catalogue/FIN/CoroKey_2008.pdf

Scheffer, C. & Krantz, H. & Heyns, P.S. & Klocke, F. 2003. Development of a tool wear –monitoring system for hard turning. International journal of machine tools & manufacture. vol 43. s. 973-985. Saatavissa: www.sciencedirect.com

SJ-201P –mittalaite. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon).

Mitutoyo. 2006. [viitattu 2.1.2009]. Saatavissa:

<http://www.mitutoyo.com/TerminalMerchandisingGroup.aspx?group=1042>

SJ-301 –mittalaite. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon). Mitutoyo. 2006. [viitattu 2.1.2009]. Saatavissa:

<http://www.mitutoyo.com/TerminalMerchandisingGroup.aspx?group=1041>

Surtronic duo-mittalaite. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon).

Taylor-Hobson. [viitattu 26.11.2008]. 8 s. Saatavissa: <http://www.taylor-hobson.com/pdf/uk/DUO.PDF>

Surtronic 25 –mittalaite. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon).
Taylor-Hobson, 2007. [viitattu 29.12.2008]. 8 s. <http://www.taylor-hobson.com/pdf/uk/surtronic25.pdf>

Tamizharasan, T. & Selvaraj, T. & Noorul Hag, A. 2006. Analysis of tool wear and surface finish in hard turning. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. vol 28. s.671–679. Saatavissa: Compendex.

Tay, C.J.& Wang, S.H. & Quan, C. & Shang, H.M. 2003. In situ surface roughness measurement using a laser scattering method. Optics Communications. vol 218. s. 1–10. Saatavissa: Elsevier.

Rugosurf-mittalaite. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon).Tesa.
[viitattu 5.1.2009]. 5 s. Saatavissa:
http://www.tesabs.ch/multimedia/docs/2008/05/rugosurf_10_and_10g.pdf

Thiele, Jeffrey D.& Melkote, Shreyes N. 1999. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. Journal of Materials Processing Technology. vol 94. s. 216-226. Saatavissa: Elsevier.

TR110 –mittalaite. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon). Qualitest.
[viitattu 22.12.2008]. Saatavissa: <http://www.qualitest-inc.com/pdf/tr110.pdf>

TR200 –mittalaite. [www-tuotedokumentti]. (Julkaisupaikka tuntematon). Qualitest.
[viitattu 22.12.2008]. Saatavissa: <http://www.qualitest-inc.com/pdf/tr200.pdf>

Tönshoff, H.K. & Jung, M. & Männel, S. & Reitz, W. 2000. Using acoustic emission signals for monitoring of production processes. Ultrasonics. Vol 37. s.681-686. Saatavissa: Elsevier

Vihinen, Jorma & Kiviö, Jouko & Ruokola, Teemu & Väänänen, Matti. Automaattisen valmistusjärjestelmän valvontatoiminnot. 1997. Teoksessa: Aaltonen, K. & Torvinen, S. Konepaja-automaatio. Porvoo. WSOY. s. 50-69.

Özel, Tugrul & Hsu, Tsu-Kong & Zeren, Erol. 2005. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. vol 25. s. 262–269. Saatavissa: Compendex.

Özel, Tugrul & Karpas, Yigit & Figueira, Luís & Davim, J. Paulo. 2007. Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. Journal of Materials Processing Technology. vol 189. s. 192–198. Saatavissa: Elsevier.

Materiaali	Terä- materiaali luokka	Kovuus	Terägeometria		Terän tyyppi	Nirkon- säde	Lastuamis- syvyys ap	Syöttö fn	Lastuamis- nopeus vc	Pinnan- karheus R _a
						[mm]	[mm]	[mm/r]	[m/min]	[µm]
niukkaseostainen teräs	P	180HB	perinteinen	negatiivinen	CNMG 12 04 08	0,8	0,4	0,2	475	1,56
niukkaseostainen teräs	P	180HB	perinteinen	positiivinen	CCMT 09 T3 08	0,8	0,35	0,15	515	0,88
niukkaseostainen teräs	P	180HB	wiper	negatiivinen	CNMG 12 04 08	0,8	1	0,3	415	3,52
niukkaseostainen teräs	P	180HB	wiper	positiivinen	CCMT 09 T3 08	0,8	1	0,25	445	2,44
superseokset	S	350HB	perinteinen	negatiivinen	CNMG 12 04 08	0,8	0,4	0,15	85	0,88
superseokset	S	350HB	perinteinen	positiivinen	CCMT 09 T3 08	0,8	0,8	0,14	80	0,77
superseokset	S	350HB	wiper	positiivinen	CCMT 09 T3 08	0,8	1,5	0,21	30	1,72
karkaistu teräs	F	60HRC	perinteinen	negatiivinen	CNGA 12 04 08	0,8	0,2	0,15	190	0,88
karkaistu teräs	F	60HRC	perinteinen	positiivinen	CCGW 09 T3 08	0,8	0,2	0,15	190	0,88
karkaistu teräs	F	60HRC	wiper	negatiivinen	CNGA 12 04 08	0,8	0,1	0,28	155	3,06
karkaistu teräs	F	60HRC	wiper	positiivinen	CCGW 09 T3 08	0,8	0,2	0,28	155	3,06

(Sandvik Coromant, 2008b, 26, 27 ,53, 59, 73, 95, 97)

Laite	Valmistaja	Mittattavat pinnankarheuden suuret	Menetelmä	Anturointi	Mittausjakson pituus	Mittausalueen pituus	Mittausalue	Resoluutio	Mittausvirhe	Visuaalisuus	Virtalähde	Mittattavan kohteen dimensiot		Muisti	Liitännät	Muuta
												min. Ulkomitat [mm]	min. Sisämitat [mm]			

Surtronic Duo	Taylor Hobson	Ra, Rz, Rv, Rp, Rt	Timanttineula, r=5 µm	Pietso-sähköinen	0,8 +- 15 %	5	Ra: 40 Rz: 199	Ra: 0,01 Rz: 0,1	5 % lukemasta + 0,1 um	LCD-näyttö	paristot	D=25	D=65	viimeisin mittaus-tulos	ei	
Surtronic 25	Taylor Hobson	Ra, Rz, Rt, Rp	Timanttineula, r=2 µm, r=5 µm tai r=10 µm	Induktiivinen	0,25; 0,8; 2,5; 8	0,25 - 25	300	0,01	2 % lukemasta	LCD-näyttö	paristot tai verkkovirta	mittauskärjestä riippuvainen		100 mittaus-tulosta	RS232 - portti	
TR110	Qualitest	Ra, Rz	Timanttineula, r=5 µm +- 1µm	Pietso-sähköinen	0,25; 0,8; 2,5	1,25; 4,0; 5,0	Ra: 0,05 - 10,0 Rz: 0,1 - 50,0	-	15 %	LCD-näyttö	paristot	80*30	-	ei	ei	
TR200	Qualitest	Ra, Rz, Rt, Rp, Ry, Rq, Sm	Timanttineula, r=5 µm	Induktiivinen	0,25; 0,8; 2,5; automaattinen	0,75 - 17,5	Ra: 0,01 - 40 Rz: 0,02 - 160	-	-	LCD-näyttö	paristot	D=6		viimeisin mittaus-tulos	RS232 - portti	
SJ-201P	Mitutoyo	Ra, Ry, Rz, Rq, Sm, Rt, Rp		-	0,25; 0,8; 2,5	0,3 - 12,5	-	-	-	LCD-näyttö	akku tai verkkovirta	-	-	kyllä	RS232 - portti	
SJ-301	Mitutoyo	Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Rq, Rv, Sm	Timanttineula, r=5 µm	-	0,25; 0,8; 2,5; 8	0,3 - 12,5	-	-	-	LCD-näyttö	akku tai verkkovirta	-	-	kyllä	ei	kiinteä tulostin
Rugosurf 10	Tesa	Ra, Rq, Rt, Rz	Timanttineula, r=5 µm	Induktiivinen	0,25; 0,8; 2,5	-	Ra: 0-40 Rt: 0,05-160	0,01	-	LCD-näyttö	paristot	mittauskärjestä riippuvainen		200 mittausta	RS232 - portti	
Rugosurf 10G	Tesa	Ra, Rq, Rt, Rz, Rp	Timanttineula, r=5 µm	Induktiivinen	0,25; 0,8; 2,5	-	Ra: 0-75 Rt: 0,05-300	0,001	-	TFT-näyttö	paristot	mittauskärjestä riippuvainen		999 mittausta	RS232 - portti	