



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO



ULTRAÄÄNIMUOKAUSLAITTEEN TESTAUS

Mikko Hokkanen
Tampereen teknillinen yliopisto

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa testattiin nc-ohjatussa sorvissa Elpro Oy:n kehittämää ultraäänimuokkainta erilaisille teräksille ja alumiinille. Tutkimus tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Tuotantotekniikan laitoksella.

Ultraäänimuokkain todettiin soveltuvan hyvin käytettyjen materiaalien silotukseen. Sorvattujen pintojen Ra – arvot olivat välillä 0,5...3,2 μm ja ultraäänimuokattujen pintojen Ra – arvot välillä 0,01...0,022 μm . Tässä tutkimuksessa mikroseos-, nuorutus-, hiiletys- ja ruostumattoman teräksen ultraäänimuokattujen pintojen Ra, Rq ja Rp – arvot olivat 2...3 % sekä Rz, Rt ja Rmax – arvot 4...8 % sorvattujen pintojen vastaavista pintaparametreista. Alumiinilla saavutetaan vastaavat pinnankarheuden arvot kuin teräksillä, mutta joihinkin sorvattuihin pintoihin nähden pintaparametrien väliset erot ovat pienempiä. Käytetyn pinnankarheusmittarin profiiliresoluutio (0,012 μm) ei riittänyt ultraäänimuokattujen pintojen Tp – arvojen mittaamiseksi, mutta muutos sorvattuihin pintoihin nähden voitiin todeta merkittäväksi. Menetelmän vaikutus kappaleen geometriaan todettiin vähäiseksi.

Ultraäänimuokkauksen parhaita ominaisuuksia ovat menetelmäintegraatio ja lyhyt työstöaika saavutettavaan pinnanlaatuun nähden. Uudelleenkiinnityksestä ja varastoinnista aiheutuvat muodonmuutokset eliminoidaan työstettäessä kappale kerralla valmiiksi. Laitteiston kiinnitettävyyttä erilaisiin työstökoneisiin luo monipuolisia mahdollisuuksia sen käytölle. Tasomaisten ja kaksoiskaarevien pintojen käsittely on mahdollista erilaisten kärkipalageometrioiden avulla. Kärkipalageometrioiden kehittymisen myötä ultraäänimuokkausta on mahdollista soveltaa esim. muottien, hammaspyörien ja erilaisten akselien viimeistelyssä ja huollossa. Lisäksi tässä tutkimuksessa käytettyjä työstönopeuksia on mahdollista kasvattaa erilaisten geometrioiden avulla.

Sisällys

Tiivistelmä	2
Sisällys	3
Lyhenteet ja merkinnät	4
1 JOHDANTO	5
2 KOEJÄRJESTELYT	7
3 TULOKSET	10
4 VERTAILU MUIHIN MENETELMIIN	28
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	30

Lyhenteet ja merkinnät

Ø	halkaisija
f	Syöttö mm/r
F	voima
ISO	International Organization for Standardization, kansainvälinen standardisointiorganisaatio
LSD	Least Significant Deviation, pienin merkittävä poikkeama
v_c	Lastuamisnopeus m/min
P	Generaattorin ulostuloteho
Ra	Pinnankarheuden aritmeettinen keskiarvo
Rmax	Pinnankarheusprofiilin paikallinen maksimin ja minimin välimatka.
Rp	Maksimi arvo pinnankarheusprofiilin keskilinjan yläpuolella
Rq	Pinnankarheuden neliöllinen keskiarvo
Rt	Pinnankarheusprofiilin maksimin ja minimin välimatka koko mittauspituudelta
Rz	Pinnankarheusprofiilin keskimääräinen maksimin ja minimin välimatka.
Tp	Pinnankarheusprofiilin kanto-osuus referenssitason nähden.

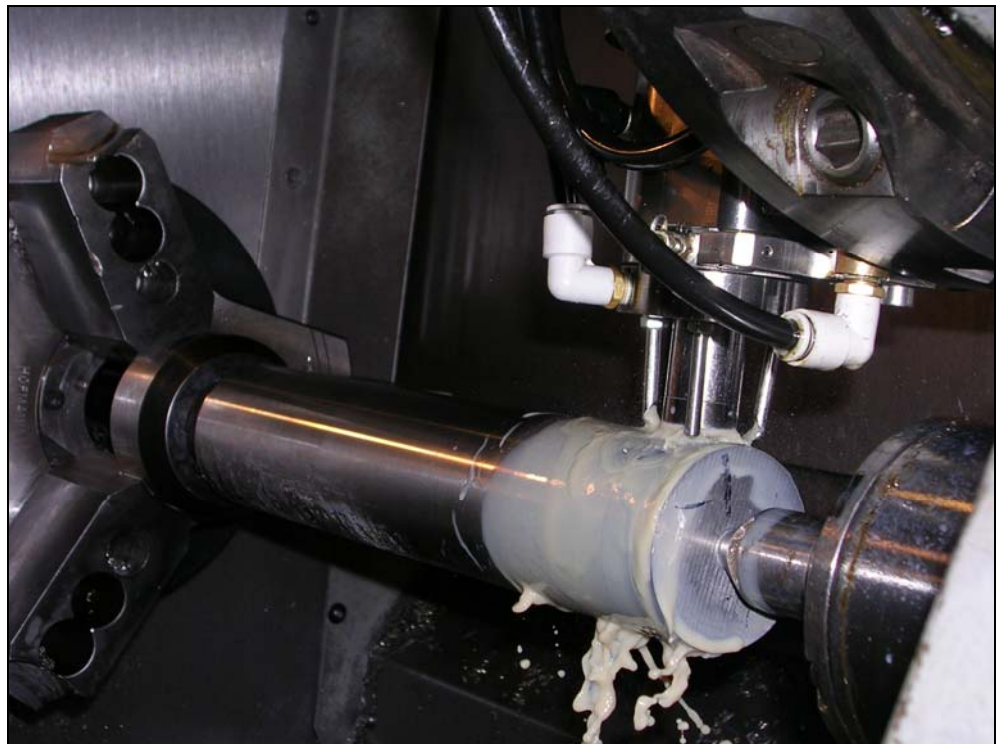
2 KOEJÄRJESTELYT

Ultraäänimuokkaimen toimintaa testattiin Tampereen teknillisen yliopiston Tuotantotekniikan laitoksen raskaassa laboratoriossa Georg Fischer nc-sorvissa. Testeissä käytettiin viittä eri materiaalia: mikroseosterästä, nuorrutusterästä, hiiletysterästä, ruostumatonta terästä ja alumiinia. Materiaalien tarkemmat kuvaukset ja sorvauksessa käytetyt teräpalat ovat oheisessa taulukossa (Taulukko 1).

Taulukko 1. Tutkimuksessa käytetyt materiaalit ja teräpalat.

MATERIAALI	KÄÄNTÖPALA
Mikroseosteräs, IMAMIC (Ovako Steel)	Sandvik DCMT 11T308-UF
Nuorrutusteräs, 42 CrMo 4 (Ovako Steel)	Sandvik DCMT 11T304-UF
Hiiletysteräs, 16 MnCr 5 (Ovako Steel, karkaisu Sisu Diesel Oy, Linnavuori)	Kyocera Ceratip DCMW 11T308S2E
Ruostumaton teräs, 1,4301	Sandvik DCMT 11T304-UF
Alumiini, AV6262 T6	Arno DCGT 11T304 FN-ALU

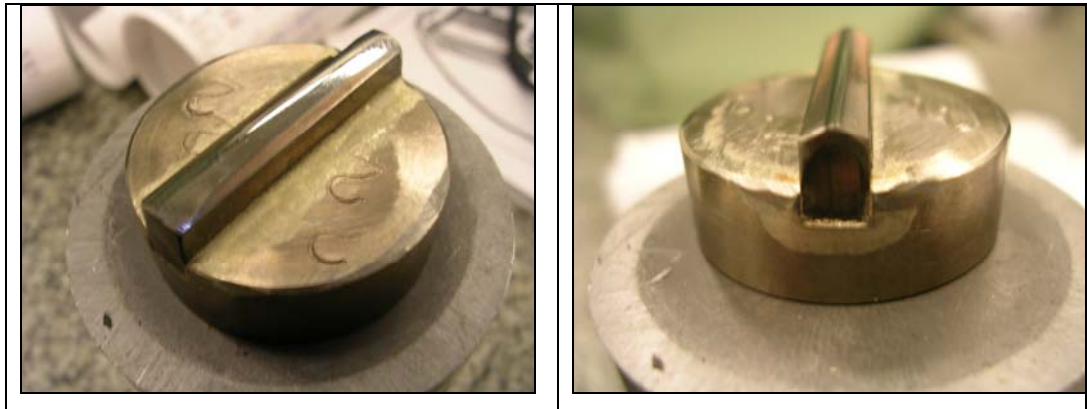
Työstettävien kappaleiden pituudet olivat 300 mm ja ne kiinnitettiin sorvissa kärkien väliin (Kuva 3). Sorvauksessa ja ultraäänimuokkauksessa käytettiin vesisekoitteista Hakuform 70/69 puolisynteettistä lastuamisnestettä 5 % pitoisuudella ja suodatukseen käytettiin Finn Filterin keskipainesuodatinta (elementin tyyppi FC 7005.Q010.BK suodatusaste 10 μm) ja erillistä magneettisuodatinta edellä esitetyn periaatteen mukaisesti (Kuva 1).



Kuva 3. Ultraäänimuokkaus sorvissa.

Sorviin kiinnitetyt kappaleet oikaistiin, jonka jälkeen kappaleeseen sorvattiin kolme erilaista 100 mm mittaista pintaa, joiden nimelliset pinnankarheudet olivat 0,8 / 1,6 / 3,2 μm . Jokaiselle sorvatulle pinnalle ultraäänimuokattiin kolme pintaa eri parametrijohdistelmää käyttäen. Generaattorin taajuus haettiin materiaalikohtaisesti muuntimen lämpötilan perusteella ennen varsinaisia koepintojen työstöä siten, että muuntimen lämpötila pysyi alle 50 °C.

Ultraäänimuokkauksessa käytettiin kahta geometrialtaan erilaista takovaa kärkipalaa (Kuva 4) 45° asetuskulmassa. Kuvassa oikean puoleista kärkipalaa käytettiin hiiletysteräksen muokkauksessa ja muut materiaalit muokattiin vasemman puoleisella kärkipalalla.



Kuva 4. Ultraäänimuokkauksessa käytetyt kärkipalat.

Sorvatut ja ultraäänimuokatut pinnat mitattiin Mahr Perthometer M2 pinnankarheusmittarilla, jonka mittauskärjen säde on 2 μm ja profiiliresoluutio 0,012 μm . Valmistaja ei ole ilmoittanut laitteen mittaasepävarmuutta, mutta vastaavien laitteiden osalta on yleisesti käytetty $\pm 2\%$ lukemasta \pm LSD (Least Significant Deviation). Tasohiottujen vertailumittapalojen (Ra 0,025 μm) mittausten perusteella LSD arvoksi määriteltiin 95 % luotettavuustasolla 0,006 μm keskihajonnan ollessa 0,0022 μm ja keskiarvo 0,024 μm kymmenen toiston sarjassa. Ultraäänimuokattujen pintojen Tp -arvoja (kanto-osuuksia) ei pystytty mittaamaan käytössä olevalla laitteistolla standardin edellyttämällä tavalla ja pintojen Ra -arvojen perusteella arvioitiin pinnankarheusmittarin profiiliresoluutio riittämättömäksi. Tp -arvojen muutos voitiin kuitenkin todeta merkittäväksi sorvattuihin pintoihin nähden. Pinnankarheuden mittaukset ja tulosten laskenta noudattavat ISO 3274 (1996) ja ISO 4288 (1996) standardeja. Mitatut pinnankarheuden suuret kuvauksineen on esitetty taulukossa (Taulukko 2). Kappaleiden lämpötilat olivat tasaantuneet ennen mittauksia 20 ± 2 °C tasolle ja pysyivät vakioina mittausten ajan. Kaikki mittaukset toistettiin kolme kertaa ja keskihajonta oli yleisesti Ra - arvon osalta alle 0,0035 μm .

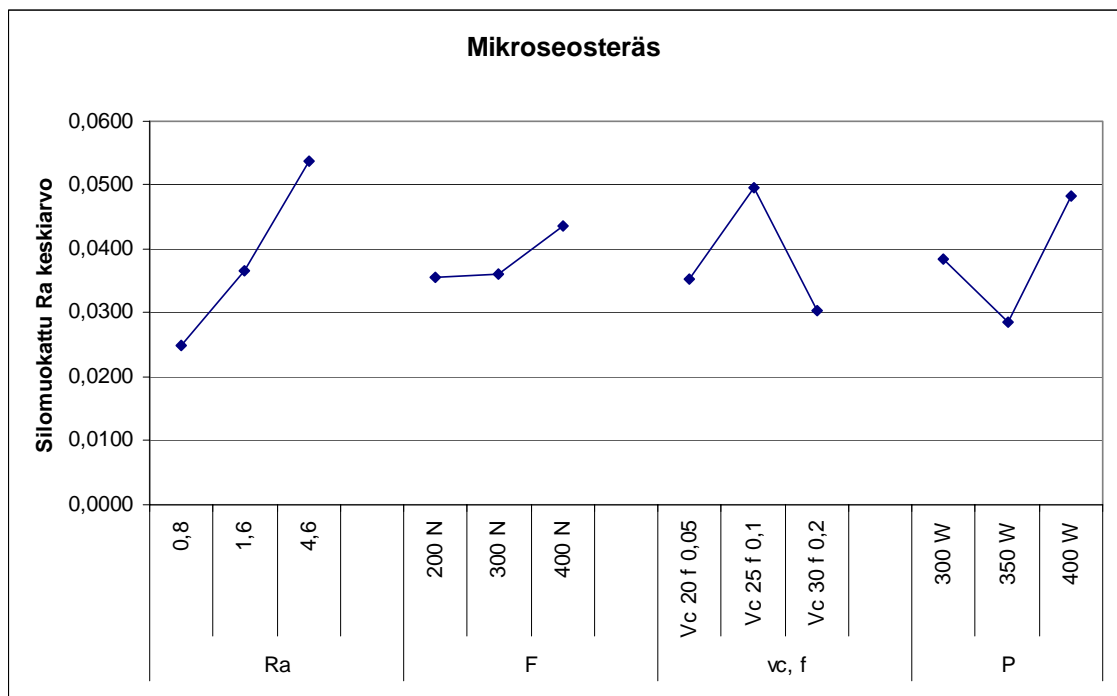
Taulukko 2. Mitatut pinnankarheuden suuret kuvauksineen.

Parametri	Selite
Ra	Pinnankarheuden aritmeettinen keskiarvo.
Rmax	Pinnankarheusprofiilin paikallinen maksimin ja minimin välimatka.
Rp	Maksimiarvo pinnankarheusprofiilin keskilinjan yläpuolella.
Rq	Pinnankarheuden neliöllinen keskiarvo.
Rt	Pinnankarheusprofiilin maksimin ja minimin välimatka koko mittauspituudelta.
Rz	Pinnankarheusprofiilin keskimääräinen maksimin ja minimin välimatka.

3 TULOKSET

3.1 Mikroesteräs, IMAMIC, akseli 300 mm, Ø 100 mm ultraäänimuokkauksessa

Alla olevassa kuvassa (Kuva 5) on esitetty eri työstöparametrien vaikutus saavutettavaan keskimääräiseen pinnankarheuteen mikroesteräksellä (IMAMIC). Koesarja on tehty käyttäen kolmea lähtöpinnanlaatua Ra, kolmea ultraäänimuokkauksjärjen kosketusvoimaa F, kolmea työstönopeutta v_c , syöttöä f ja kolme ultraäänimuokkauslaitteen generaattorin ulostulotehoa P.



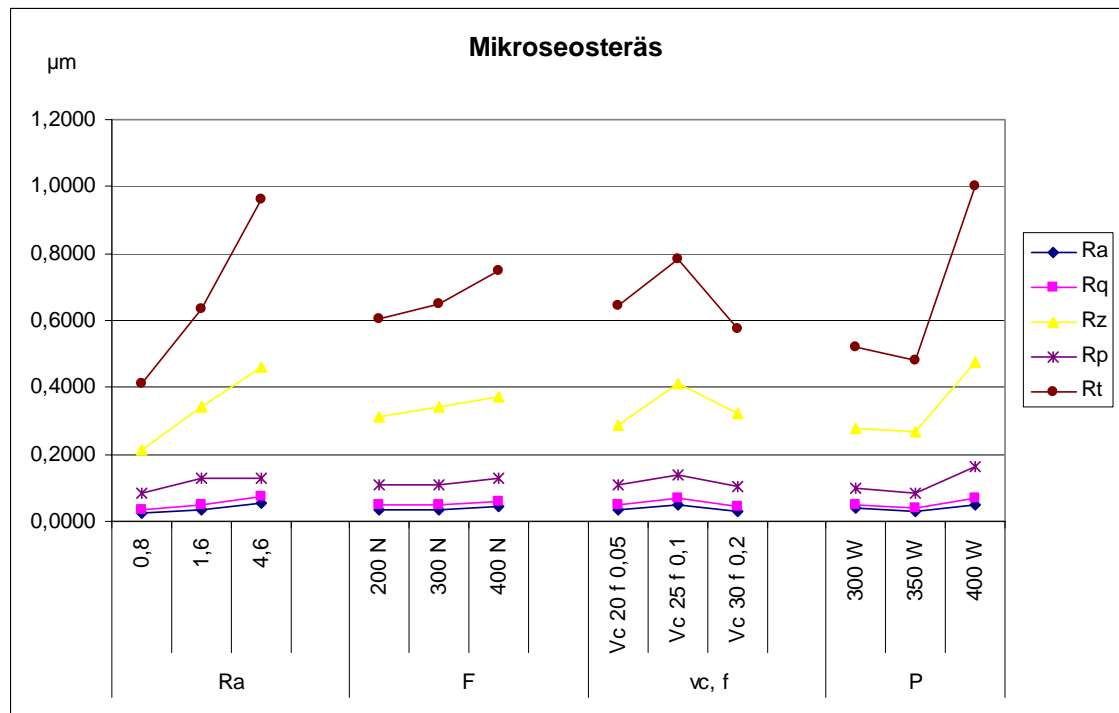
Kuva 5. Eri työstöparametrien vaikutus saavutettavaan keskimääräiseen pinnankarheuteen mikroesteräksellä.

Työstöparametriyhdistelmät muodostettiin oheisen taulukon mukaisesti (Taulukko 3).

Taulukko 3. Työstöparametriyhdistelmien muodostaminen mikroesteräkselle.

	LÄHTÖPINTA	F	v_c, f	TEHO @ 20200 Hz
KOE 1	0,8	200	$v_c 20 f 0,05$	400 W
KOE 2	0,8	300	$v_c 25 f 0,1$	350 W
KOE 3	0,8	400	$v_c 30 F 0,2$	300 W
KOE 4	1,6	200	$v_c 25 f 0,1$	300 W
KOE 5	1,6	300	$v_c 30 F 0,2$	400 W
KOE 6	1,6	400	$v_c 20 f 0,05$	350 W
KOE 7	3,2	200	$v_c 30 F 0,2$	350 W
KOE 8	3,2	300	$v_c 20 f 0,05$	300 W
KOE 9	3,2	400	$v_c 25 f 0,1$	400 W

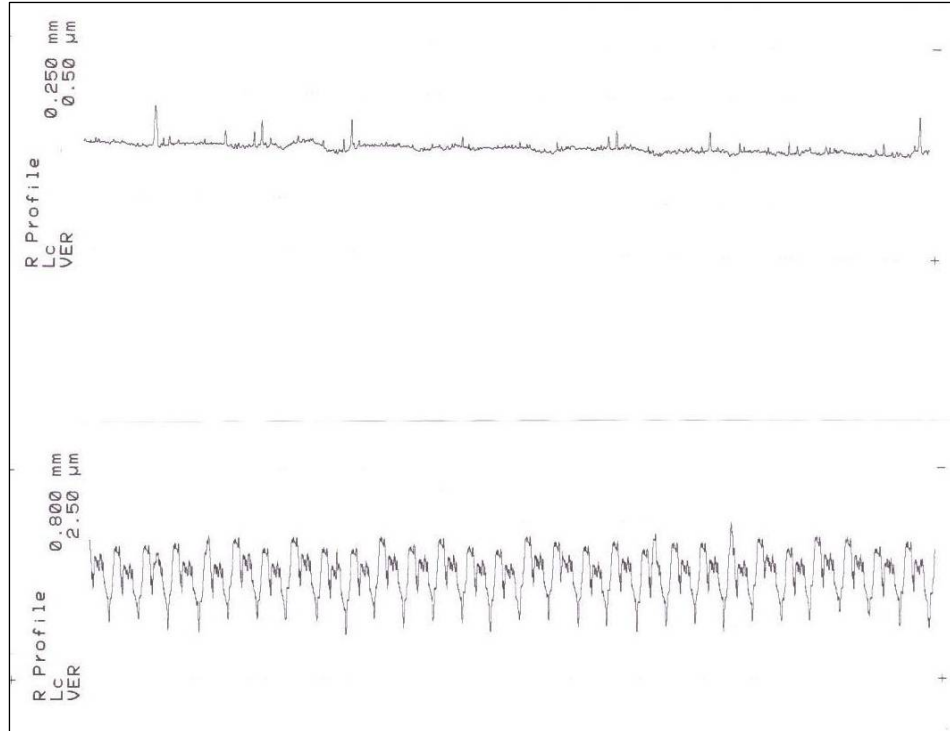
Oheisessa kuvassa (Kuva 6) on esitetty työstöparametrien keskimääräinen vaikutus eri pinnankarheuden suureisiin mikroseosteräksellä.



Kuva 6. Työstöparametrien keskimääräinen vaikutus eri pinnankarheuden suureisiin mikroseosteräksellä.

Eri parametriyhdistelmillä työstetyt pinnat mitattiin ja parametrit laskettiin keskiarvoina jokaista työstöparametria kohden. Esitetty tulos kuvaa kyseisellä materiaalilla eri työstöparametrien muutoksen vaikutusta saavutettavaan pinnanlaatuun, ei siis esim. yksittäistä saavutettavaa Ra – arvoa. Koesarjan pienin Ra – arvo saatiin kokeessa kolme (Ra 0,022 µm) ja suurin kokeessa yhdeksän (Ra 0,08 µm). Muiden pinnankarheuden suureiden minimi löytyivät myös kokeessa kolme ja maksimit kokeessa yhdeksän. Vastaavasti parhaaksi työstöparametriyhdistelmäksi saadaan Ra – arvon (Kuva 5) ja Rt – arvon (Kuva 6) perusteella lähtöpinnalle Ra 0,8 µm, F 200 N, v_c 30 m/min, f 0,2 mm/r, P 350 W.

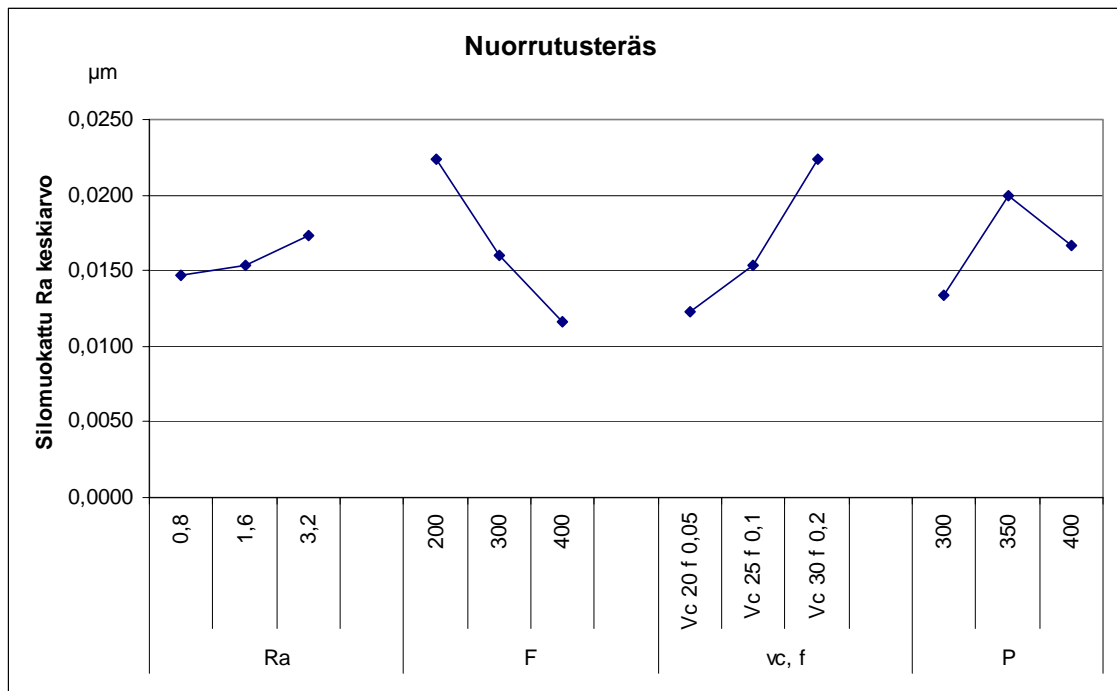
Sorvatun ja ultraäänimuokatun pinnan pintaprofiilit mikroseosteräkselle on esitetty kuvassa (Kuva 7).



Kuva 7. Mikroesteräksen pintaprofiilit sorvauksen (alla) ja ultraäänimuokkauksen (yllä) jälkeen.

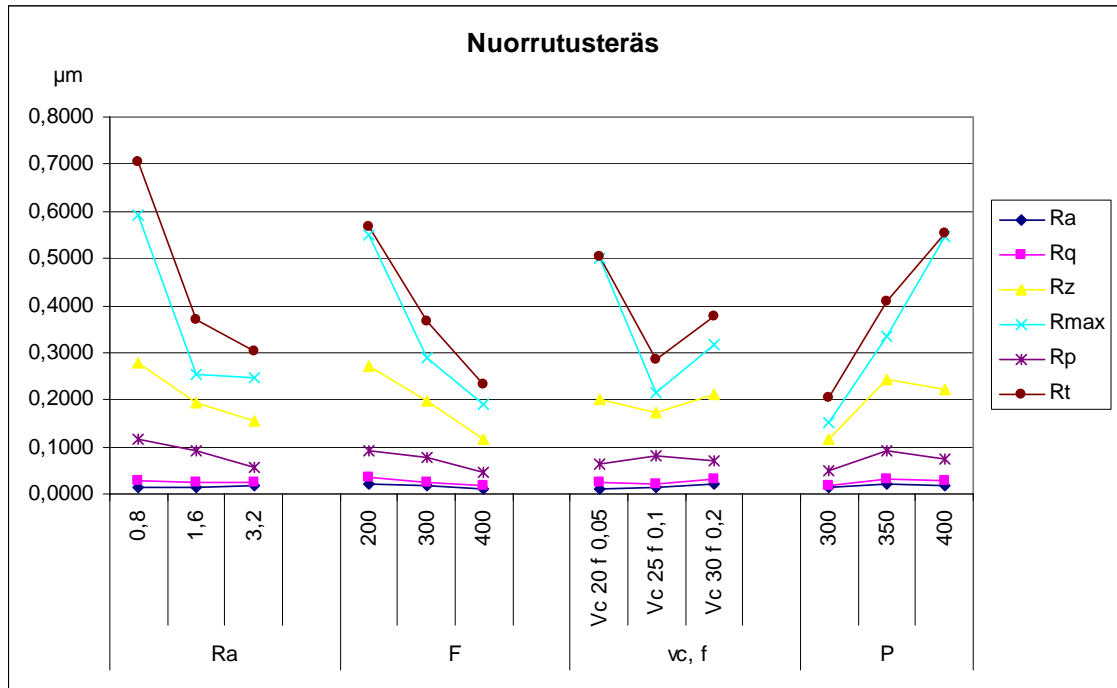
3.2 Nuorrutusteräs, 42 CrMo 4, akseli 300 mm, Ø 60 mm ultraäänimuokkauksessa

Alla olevassa kuvassa (Kuva 8) on esitetty eri työstöparametrien vaikutus saavutettavaan keskimääräiseen pinnankarheuteen nuorrutusteräksellä (42 CrMo 4). Koesarja on tehty käyttäen kolmea lähtöpinnanlaatua Ra, kolmea ultraäänimuokkauksen kosketusvoimaa F, kolmea työstönopeutta v_c , syöttöä f ja kolme ultraäänimuokkauslaitteen generaattorin ulostulotehoa P.



Kuva 8. Eri työstöparametrien vaikutus saavutettavaan keskimääräiseen pinnankarheuteen nuorrutusteräksellä.

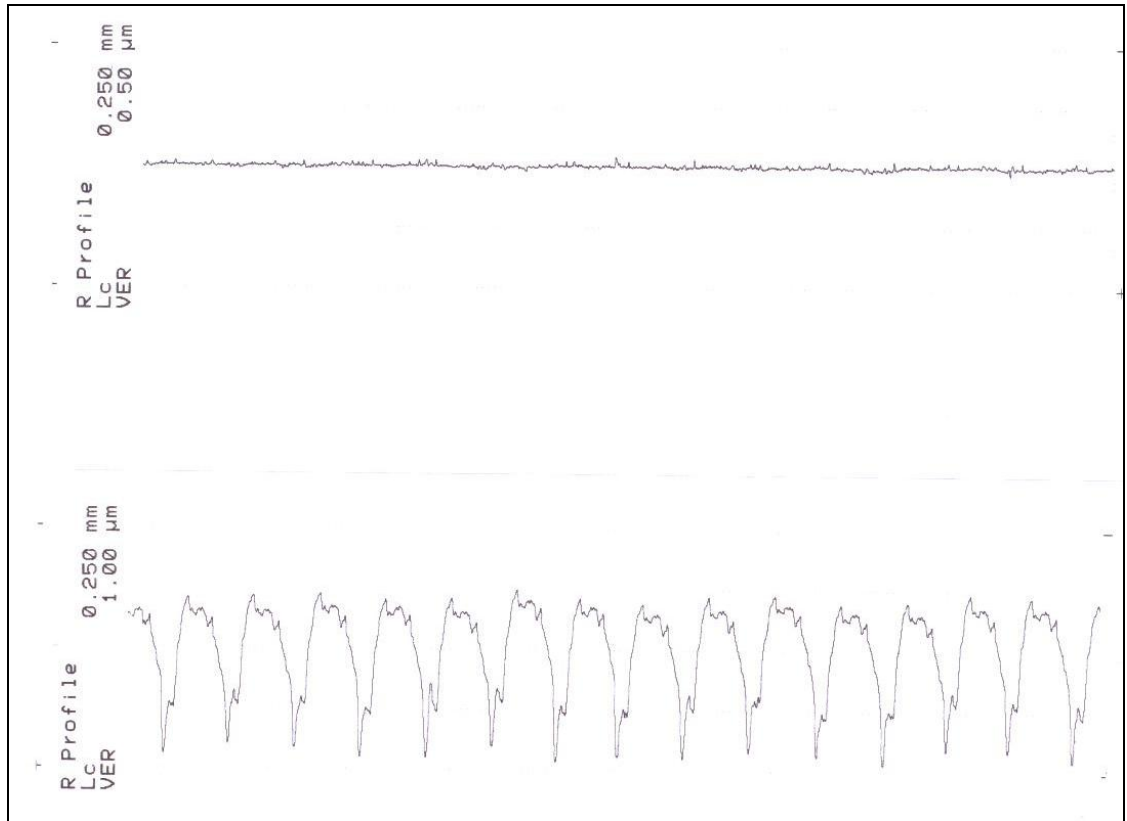
Kuvassa (Kuva 9) on esitetty työstöparametrien keskimääräinen vaikutus eri pinnankarheuden suureisiin nuorrutusteräksellä.



Kuva 9. Työstöparametrien keskimääräinen vaikutus pinnankarheuden suureisiin nuorrutusteräksellä.

Työstöparametrit muodostettiin edellä esitetyn (Taulukko 3) mukaisesti ultraäänimuokauslaitteen taajuuden ollessa 20800 Hz. Koesarjan pienin Ra – arvo saatiin kokeessa kahdeksan (Ra 0,01 µm) ja suurin kokeessa seitsemän (Ra 0,033 µm). Parametrien Rz, Rmax, Rp ja Rt maksimi-arvot saatiin kokeessa yksi ja Rq maksimi kokeessa seitsemän. Kaikkien parametrien minimiarvot saatiin kokeessa kahdeksan. Parhaaksi parametriyhdistelmäksi saadaan (Kuva 8) lähtöpinnalle Ra 0,8 µm F 400 N, v_c 20 m/min, f 0,05 mm/r, P 300 W. Rt – arvon mukaan valittaessa parhaaksi parametriyhdistelmäksi saadaan lähtöpinnalle Ra 3,2 µm, F 400 N, v_c 25 m/min, f 0,1 mm/r, P 300 W. Erot eri parametrien mukaan valituissa parhaissa työstöparametriyhdistelmissä selittyvät keskimääräisten pinnankarheuden arvojen esiintymisellä kapealla alueella (0,0117...0,0223 µm) koko koesarjassa.

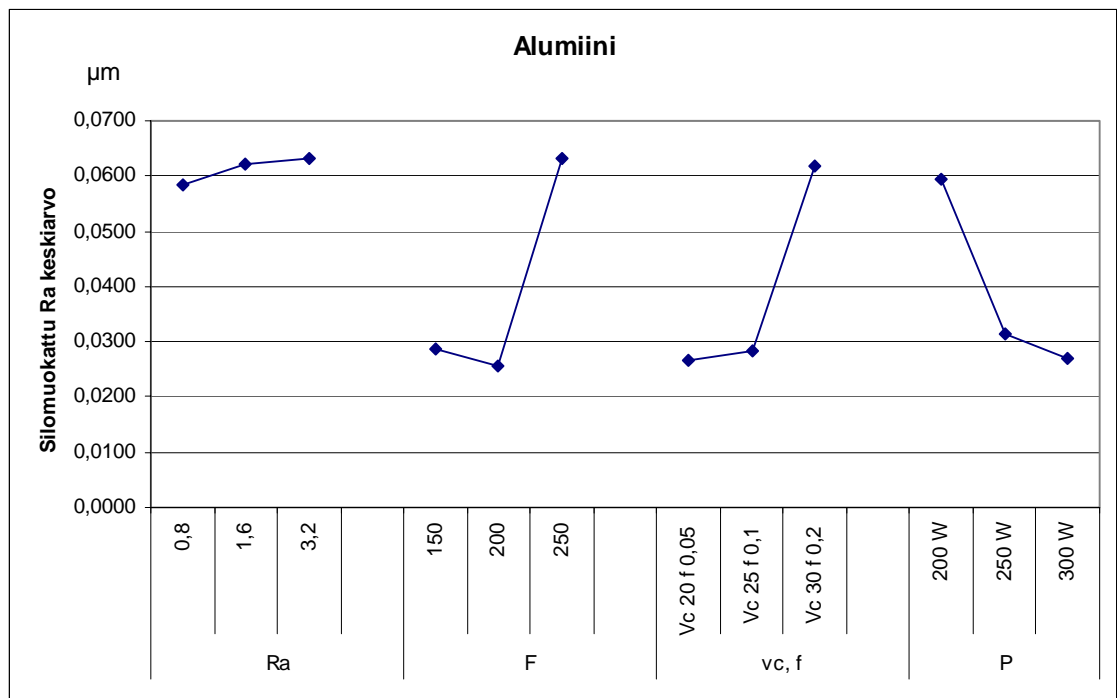
Sorvatun ja ultraäänimuokatun pinnan pintaprofiilit nuorrutusteräkselle on esitetty kuvassa (Kuva 10).



Kuva 10. Nuorrutusteräksen pintaprofiilit sorvauksen (alla) ja ultraäänimuokkauksen (yllä) jälkeen

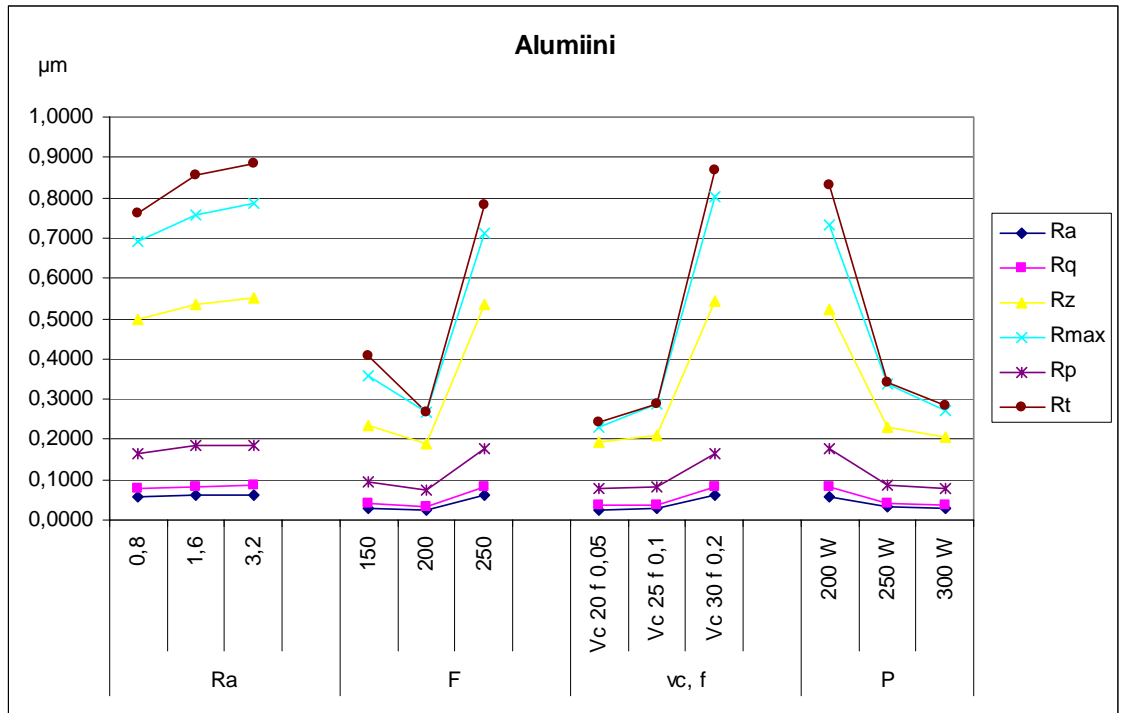
3.3 Alumiini, AV6262 T6, akseli 300 mm, Ø 60 mm ultraäänimuokkauksessa

Kuvassa (Kuva 11) on esitetty eri työstöparametrien vaikutus saavutettavaan keskimääräiseen pinnankarheuteen alumiinilla (AV6262 T6). Koesarja on tehty käyttäen kolmea lähtöpinnanlaatua Ra, kolmea ultraäänimuokkausjärjen kosketusvoimaa F, kolmea työstönopeutta V ja kolmea ultraäänimuokkauslaitteen generaattorin ulostulotehoa P.



Kuva 11. Eri työstöparametrien vaikutus saavutettavaan keskimääräiseen pinnankarheuteen alumiinilla.

Kuvassa (Kuva 12) on esitetty työstöparametrien keskimääräinen vaikutus eri pinnankarheuden suureisiin alumiinilla.



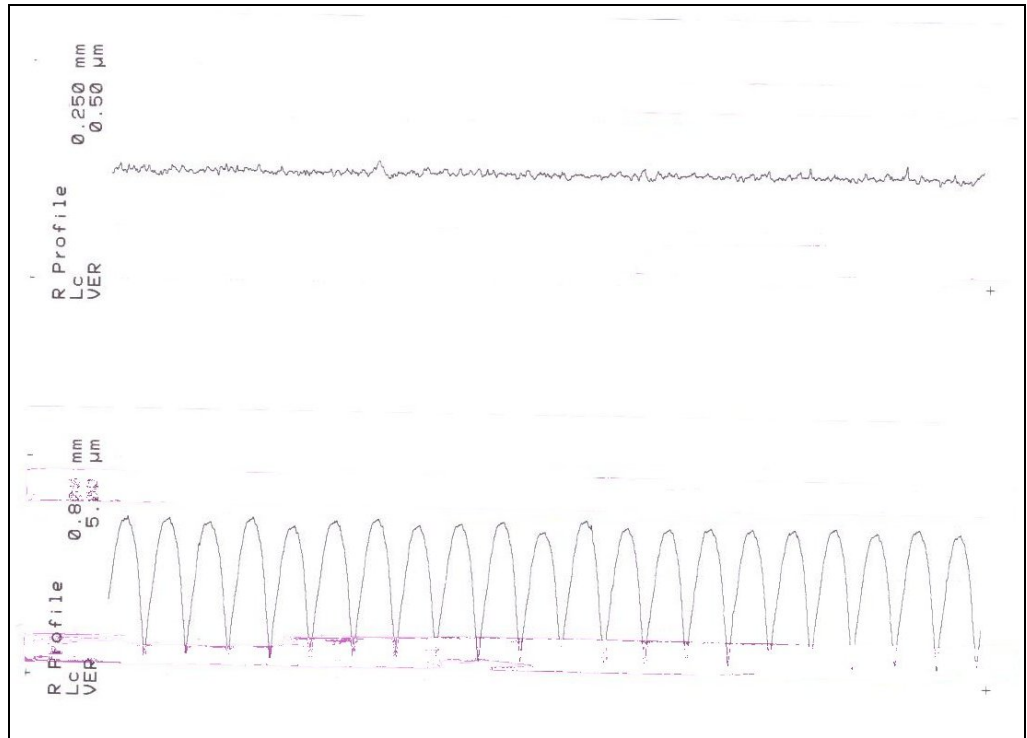
Kuva 12. Työstöparametrien keskimääräinen vaikutus eri pinnankarheussuureisiin alumiinilla.

Työstöparametrit muodostettiin oheisen taulukon mukaisesti (Taulukko 4) ultraäänimuokauslaitteen taajuuden ollessa 20400 Hz. Koesarjan pienin Ra – arvo saatiin kokeessa kahdeksan (Ra 0,019 µm) ja suurin kokeessa kolme (Ra 0,125 µm). Muiden pinnankarheussuureiden minimi saatiin kokeessa kahdeksan ja maksimit kokeessa kolme. Parhaaksi parametriyhdistelmäksi saadaan Ra – arvon (Kuva 11) ja Rt – arvon (Kuva 12) mukaan lähtöpinnalle Ra 0,8 µm, F 200 N, v_c 20 m/min, f 0,05 mm/r, P 300 W.

Taulukko 4. Työstöparametriyhdistelmien muodostaminen alumiinille.

	LÄHTÖPINTA	F	v_c, f	TEHO @ 20400 Hz
KOE 1	0,8	150	v_c 20 f 0,05	300 W
KOE 2	0,8	200	v_c 25 f 0,1	250 W
KOE 3	0,8	250	v_c 30 F 0,2	200 W
KOE 4	1,6	150	v_c 25 f 0,1	200 W
KOE 5	1,6	200	v_c 30 F 0,2	300 W
KOE 6	1,6	250	v_c 20 f 0,05	250 W
KOE 7	3,2	150	v_c 30 F 0,2	250 W
KOE 8	3,2	200	v_c 20 f 0,05	200 W
KOE 9	3,2	250	v_c 25 f 0,1	300 W

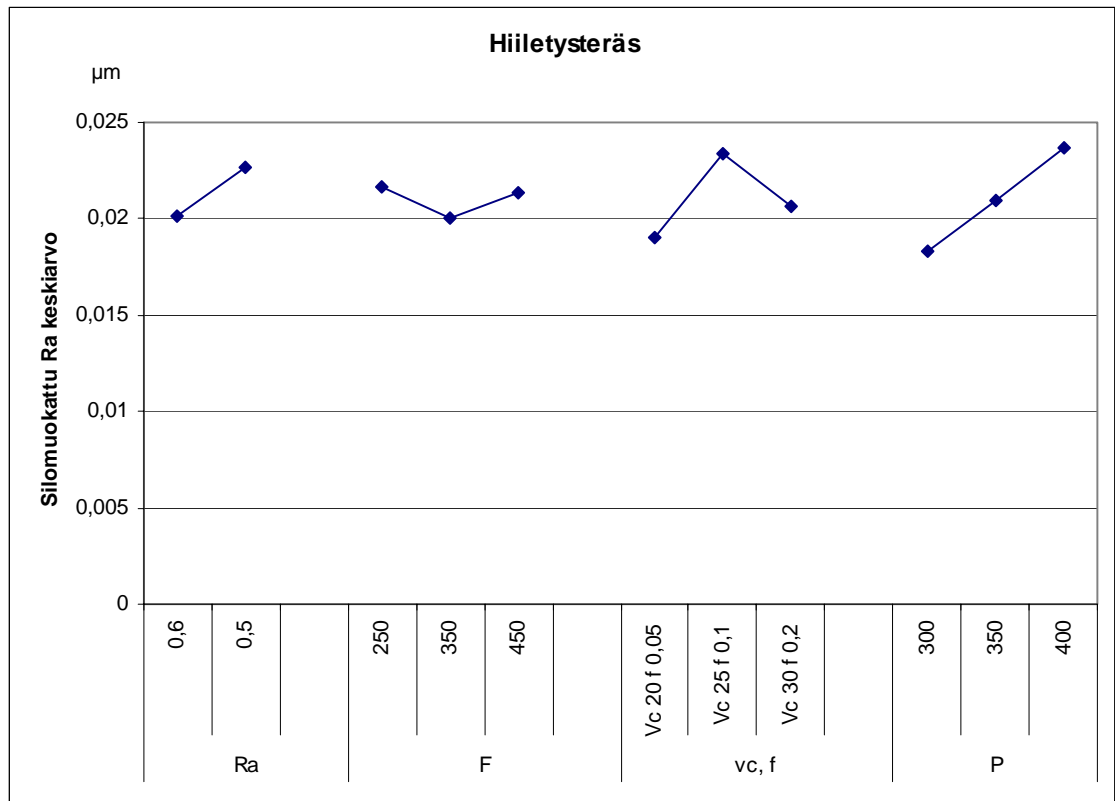
Sorvatun ja ultraäänimuokatun pinnan pintaprofiilit alumiinille on esitetty kuvassa (Kuva 13).



Kuva 13. Sorvatun (alla) ja ultraäänimuokatun (yllä) pinnan pintaprofiilit alumiinille.

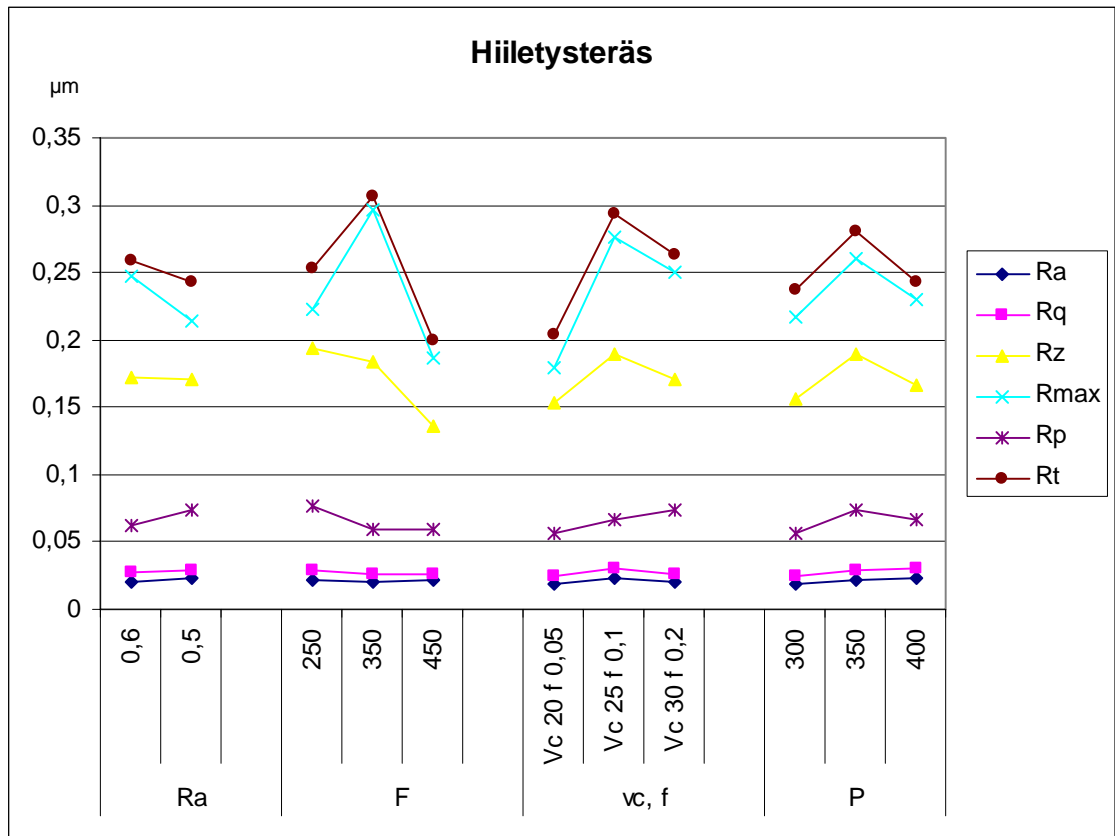
3.4 Hiiletysteräs, 16 MnCr 5, hiiletyskarkaisu 58 ... 63 HRC, akseli 300 mm, Ø 60,4 mm ultraäänimuokkauksessa

Alla olevassa kuvassa (Kuva 14) on esitetty eri työstöparametrien vaikutus saavutettavaan keskimääräiseen pinnankarheuteen hiiletysteräksellä. Koesarja on tehty käyttäen kahta lähtöpinnanlaatua Ra, kolmea ultraäänimuokkauuskärjen kosketusvoimaa F, kolmea työstönopeutta v_c , syöttöä f ja kolmea ultraäänimuokklauslaitteen generaattorin ulostulotehoa P



Kuva 14. Työstöparametrien keskimääräinen vaikutus saavutettavaan pinnankarheuteen hiiletysteräksellä.

Kuvassa (Kuva 15) on esitetty työstöparametrien keskimääräinen vaikutus eri pinnankarheussuureisiin hiiletysteräksellä.



Kuva 15. Työstöparametrien keskimääräinen vaikutus eri pinnankarheussuureisiin hiiletysteräksellä.

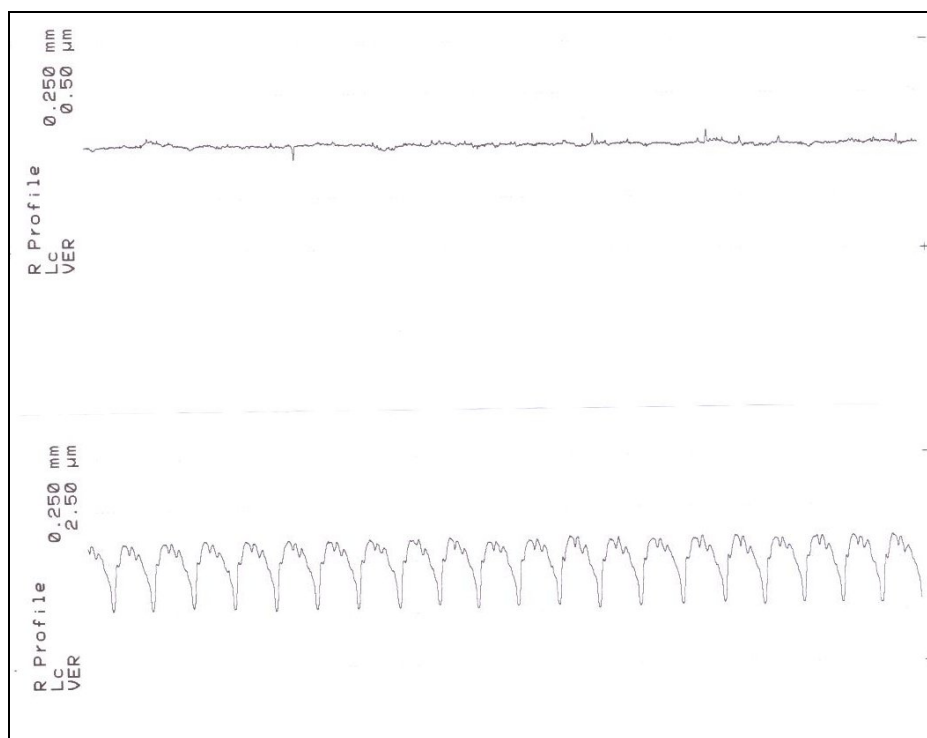
Työstöparametrit muodostettiin taulukossa kolme esitetyllä tavalla generaattorin taajuuden ollessa 20600 Hz. Koesarjan pienin Ra – arvo saavutettiin kokeessa kahdeksan (Ra 0,015 µm) ja suurin kokeessa kolme (Ra 0,028 µm). Rp ja Rq arvojen minimi löytyivät myös kokeessa kahdeksan, Rmax, Rz ja Rt arvojen minimi löytyivät kokeessa kuusi. Rz, Rmax ja Rt arvojen maksimit löytyivät kokeessa kaksi, Rq arvon maksimi kokeessa yhdeksän ja Rp arvon maksimi kokeessa seitsemän.

Parhaaksi parametriyhdistelmäksi saadaan keskimääräisten Ra – arvojen perusteella (Kuva 14) lähtöpinnalle Ra 0,5 µm F 350 N, v_c 20 m/min, f 0,05 mm/r ja P 300 W. Keskimääräisten Rt – arvojen mukaan (Kuva 14) parhaaksi parametriyhdistelmäksi saadaan lähtöpinnalle Ra 0,6 µm F 450 N, v_c 20 m/min, f 0,05, P 300 W. Pinnankarheuden Ra – arvon perusteella ero on ainoastaan 0,002 µm ja kärjen kosketusvoiman F perusteella 0,001 µm sekä työstönopeuden V perusteella 0,003 µm, joten käytännössä erot ovat lähinnä laskennallisia.

Taulukko 5. Työstöparametriyhdistelmien muodostaminen hiiletysteräkselle.

	LÄHTÖPINTA	F	v_c, f	TEHO @ 20600 Hz
KOE 1	0,6	250	$v_c 20 f 0,05$	400 W
KOE 2	0,6	350	$v_c 25 f 0,1$	350 W
KOE 3	0,6	450	$v_c 30 F 0,2$	300 W
KOE 4	0,6	250	$v_c 25 f 0,1$	300 W
KOE 5	0,6	350	$v_c 30 F 0,2$	400 W
KOE 6	0,6	450	$v_c 20 f 0,05$	350 W
KOE 7	0,5	250	$v_c 30 F 0,2$	350 W
KOE 8	0,5	350	$v_c 20 f 0,05$	300 W
KOE 9	0,5	450	$v_c 25 f 0,1$	400 W

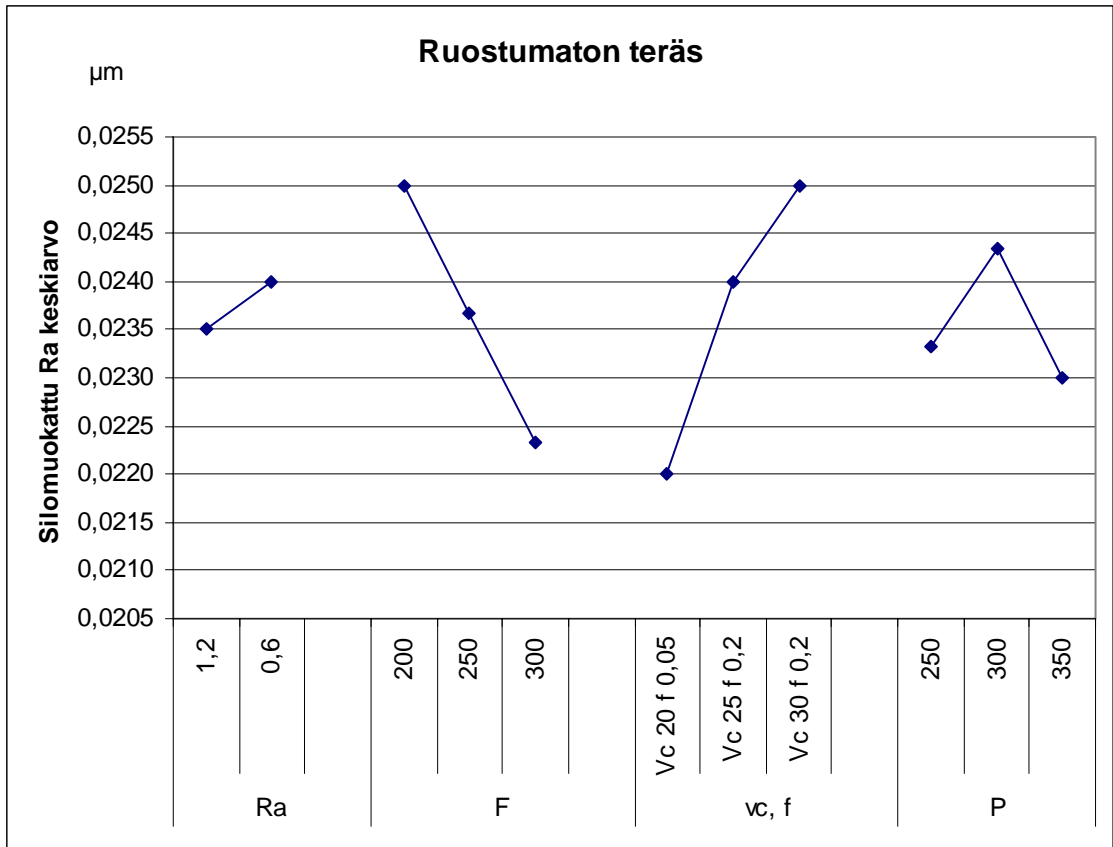
Sorvatun ja ultraäänimuokatun pinnan pintaprofiilit hiiletysteräkselle on esitetty kuvassa (Kuva 16).



Kuva 16. Sorvatun (alla) ja ultraäänimuokatun (yllä) pinnan pintaprofiili hiiletysteräkselle.

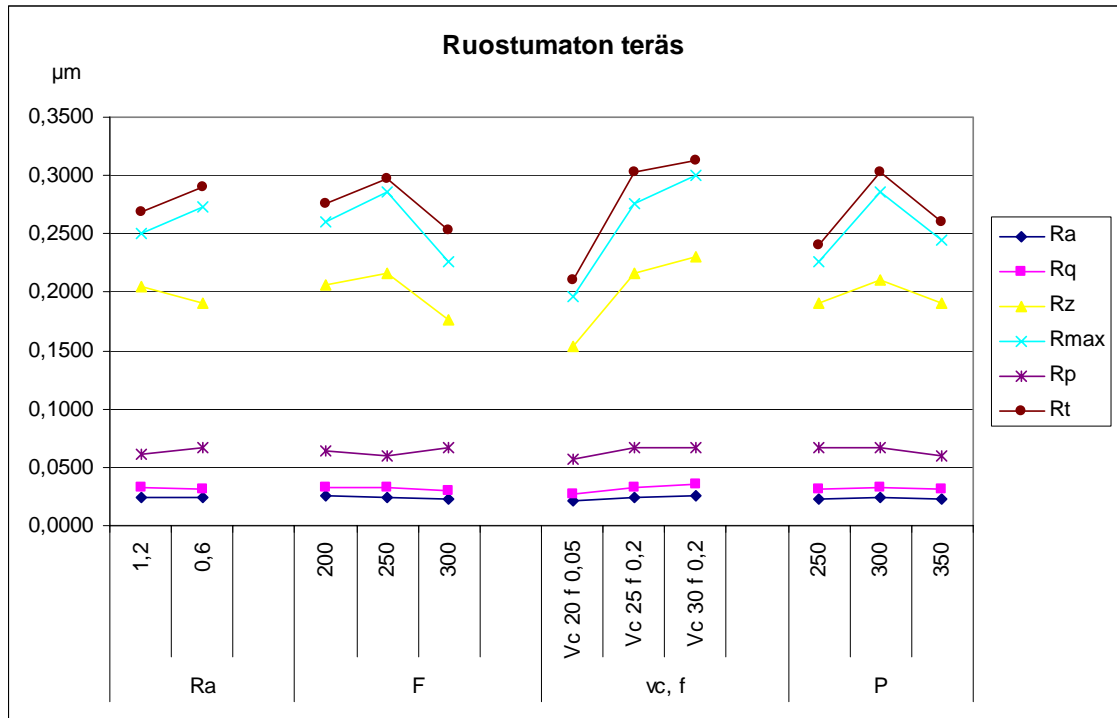
3.5 Ruostumaton teräs, 1,4301, akseli 300 mm, Ø 60 mm ultraäänimuokkauksessa

Kuvassa (Kuva 17) on esitetty eri työstöparametrien vaikutus saavutettavaan keskimääräiseen pinnankarheuden Ra -arvoon ruostumattomalla teräksellä (1,4301). Koesarja on tehty käyttäen kahta lähtöpinnanlaatua Ra, kolmea ultraäänimuokkauksen kosketusvoimaa F, kolmea työstönopeutta v_c , syöttöä f ja kolmea ultraäänimuokkauslaitteen generaattorin ulostulotehoa P.



Kuva 17. Työstöparametrien vaikutus saavutettavaan keskimääräiseen pinnankarheuteen ruostumattomalla teräksellä

Kuvassa (Kuva 18) on esitetty työstöparametrien vaikutus eri pinnankarheuden suureisiin ruostumattomalla teräksellä.



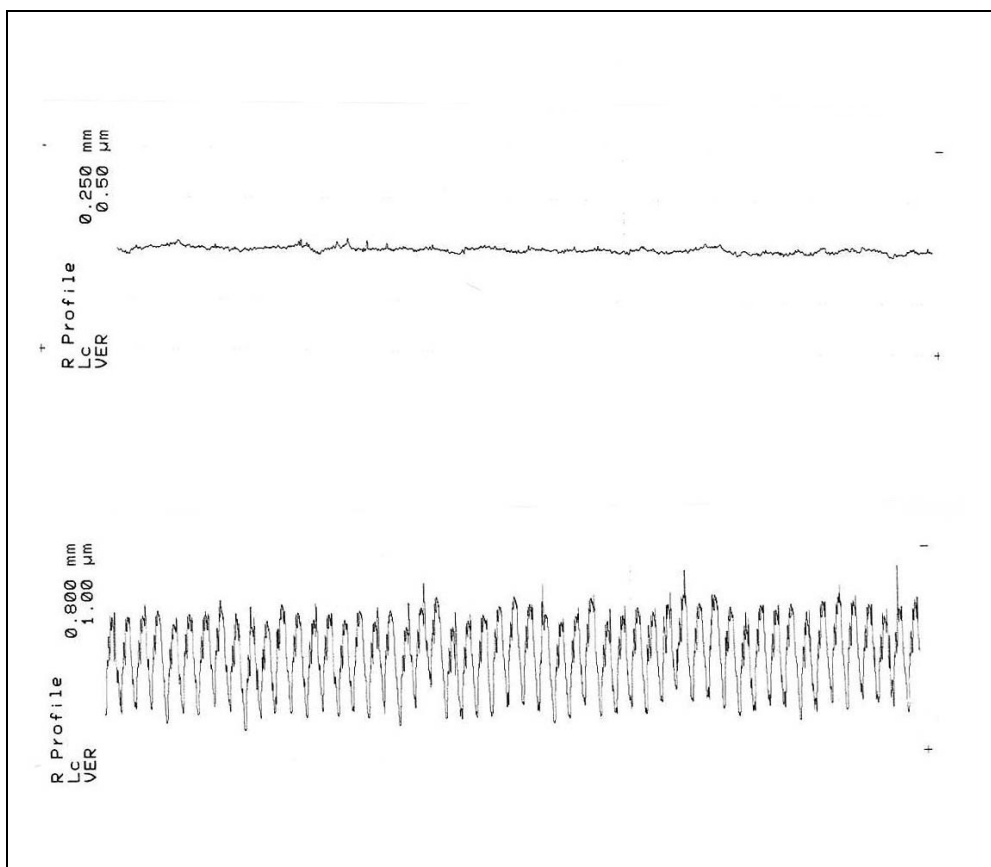
Kuva 18. Työstöparametrien keskimääräinen vaikutus eri pinnankarheussuureisiin ruostumattomalla teräksellä.

Työstöparametrit muodostettiin taulukossa (Taulukko 6) esitetyllä tavalla generaattorin taajuuden ollessa 20600 Hz. Koesarjan pienin Ra – arvo saavutettiin kokeessa kuusi (Ra 0,021 µm) ja suurin kokeessa seitsemän (Ra 0,027 µm). Parhaaksi parametriyhdistelmäksi saadaan pinnankarheuden Ra – arvojen perusteella (Kuva 17) lähtöpinnalle Ra 1,2 µm F 300 N, v_c 20 m/min, f 0,05 mm/r ja P 350 W. Rt – arvojen mukaan (Kuva 18) saadaan parhaaksi parametriyhdistelmäksi lähtöpinnalle Ra 1,2 µm F 300 N, v_c 20 m/min, f 0,05 mm/r ja P 250 W. Keskimääräiset Ra – arvot generaattorin ulostulotehon mukaan laskettuna ovat välillä 0,0230...0,0243 µm, joten eroa ei voida pitää merkittävänä.

Taulukko 6. Työstöparametriyhdistelmien muodostaminen ruostumattomalle teräkselle.

	LÄHTÖPINTA	F	v_c, f	TEHO @ 20600 Hz
KOE 1	1,2	200	v_c 20 f 0,05	350 W
KOE 2	1,2	250	v_c 25 f 0,1	300 W
KOE 3	1,2	300	v_c 30 F 0,2	250 W
KOE 4	1,2	200	v_c 25 f 0,1	250 W
KOE 5	1,2	250	v_c 30 F 0,2	350 W
KOE 6	1,2	300	v_c 20 f 0,05	300 W
KOE 7	0,6	200	v_c 30 F 0,2	300 W
KOE 8	0,6	250	v_c 20 f 0,05	250 W
KOE 9	0,6	300	v_c 25 f 0,1	350 W

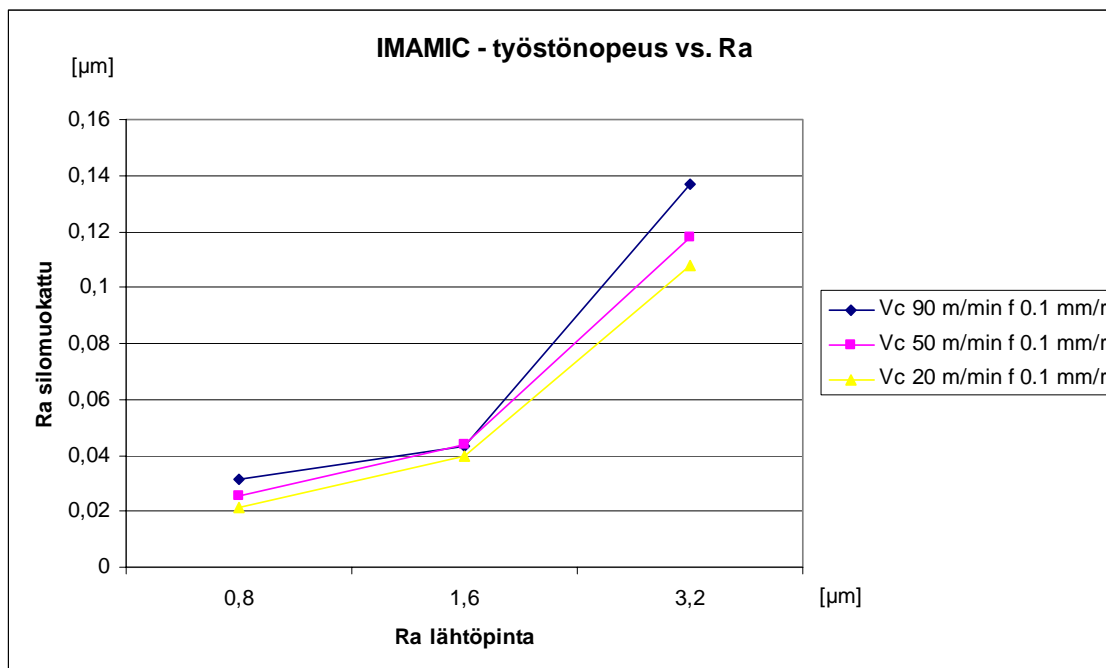
Sorvatun ja ultraäänimuokatun pinnan pintaprofiilit ruostumattomalle teräkselle on esitetty kuvassa (Kuva 19).



Kuva 19. Sorvatus (alla) ja ultraäänimuokatun pinnan pintaprofiilit ruostumattomalle teräkselle.

3.6 LASTUAMISNOPEUDEN VAIKUTUS ULTRAÄÄNIMUOKKAUKSESSA

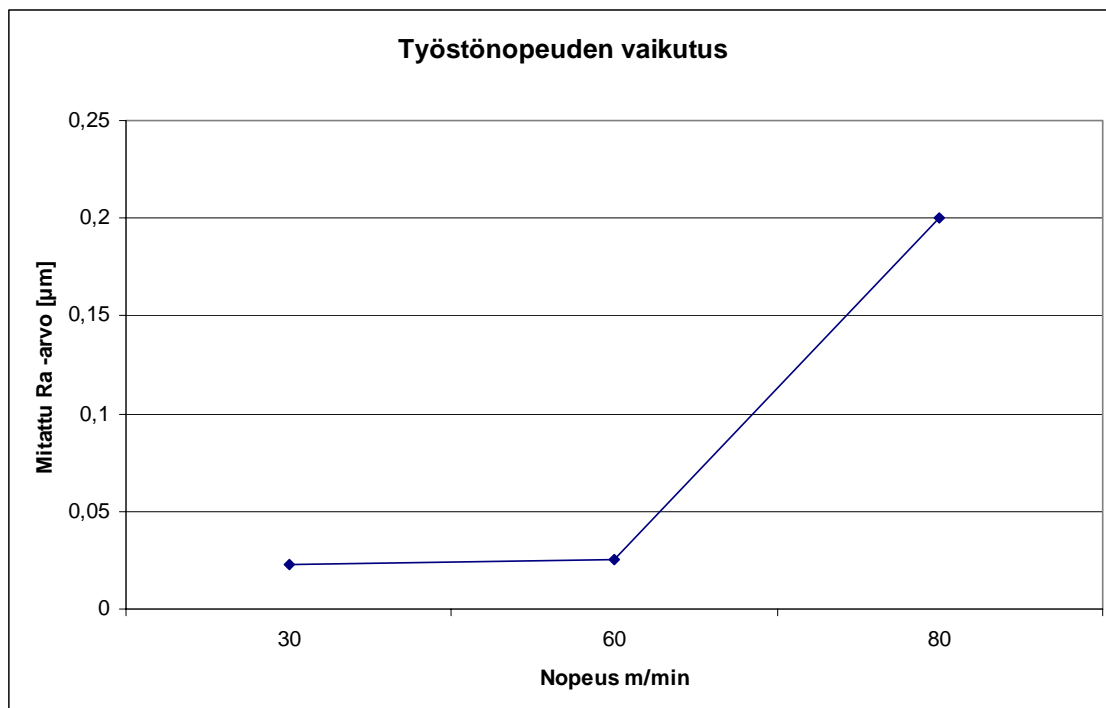
Lastuamisnopeuden muutoksen vaikutusta saavutettavaan Ra – arvoon mikroseosteräksellä tutkittiin kolmella nopeudella (20, 50 ja 90 m/min) syötön ollessa 0,1 mm/r. Ultraäänimuokattujen pintojen Ra – arvojen erot eri lähtöpinnalla ovat pieniä, kun huomioidaan mittalaitteiston mittausepävarmuus ja resoluutio. Selkeää saavutettavan Ra – arvon muutosta ei voida todeta kuin lähtöpinnalla Ra 3,2 µm (Kuva 20).



Kuva 20. Nopeuden vaikutus saavutettavaan Ra -arvoon mikroseosteräksellä.

Lähtöpinnalla Ra 0,8 µm saavutettujen muokattujen pintojen Ra – arvot kasvoivat 18 % nopeuden kasvaessa 150 % (20...50 m/min) ja 47 % nopeuden kasvaessa 350 % (20...90 m/min). Vastaavasti lähtöpinnalla Ra 1,6 µm muokattujen pintojen Ra -arvot kasvoivat 11 % nopeuden kasvaessa 150 % ... 350 % (mitattu Ra – arvo oli 0,4 nm pienempi nopeudella 50 m/min kuin nopeudella 90 m/min). Kahdella sileämmällä lähtöpinnalla nopeuden muutoksen suhdetta saavutettavaan pinnankarheuteen ei voida osoittaa. Lähtöpinnan Ra 3,2 µm muokattujen pintojen Ra – arvot kasvoivat 10 % nopeuden kasvaessa 150 % ja 27 % nopeuden kasvaessa 350 %.

Lastuamisnopeuden muutoksen vaikutusta saavutettavaan Ra – arvoon tutkittiin myös nuorrutusteräksellä. Kokeessa käytettiin 300 mm pitkää akselia, jonka halkaisija sorvauksen jälkeen oli 60 mm ja pinnankarheus Ra 0,8 µm. Akseliin ultraäänimuokattiin kolme vierekkäistä pintaa nopeuksilla 30, 60 ja 80 m/min syötön ollessa 0,2 mm/r. Mitatut Ra – arvot on esitetty oheisessa kuvassa (Kuva 21).



Kuva 21. Nopeuden vaikutus nuorrutusteräksen ultraäänimuokkauksessa.

Tulos vahvistaa käsitystä, että ultraäänimuokkauksessa nopeutta voidaan kasvattaa tiettyyn rajaan asti ilman, että saavutettava pinnankarheus muuttuu merkittävästi. Kun nopeutta kasvatetaan liikaa alkaa kappale värähtelemään, mikä näkyy myös muokatussa pinnassa. Oheisen kuvan (Kuva 21) tapauksessa työstö oli keskeytettävä nopeudella 80 m/min kappaleen värähtelyamplitudin kasvaessa liian suureksi. Kappaleen kehänopeuden suhde halkaisijaan osoittautui pelkkää kehänopeutta merkittävämmäksi tekijäksi. Kuvien (Kuva 20, Ø 100 mm ja Kuva 21, Ø 60 mm) kappaleiden pyörimisnopeuden ero samalla lastuamisnopeudella on 66,7 %.

3.7 ULTRAÄÄNIMUOKKAUKSEN VAIKUTUS KAPPALEEN GEOMETRIAAN

Mikroseos-, nuorrutus- ja hiiletysteräkselle valittiin edellä esitetyn mukaiset parhaat ultraäänimuokkauksen työstöarvot. Ultraäänimuokkauksen vaikutusta kappaleen geometriaan tutkittiin 300 mm pitkien koekappaleiden avulla, jotka sorvattiin tiettyihin pinnankarheuksiin ja ultraäänimuokattiin 150 mm matkalta. Mitatut pinnankarheusarvot sorvauksen ja ultraäänimuokkauksen jälkeen on esitetty ohessa (Taulukko 7).

Taulukko 7. Koekappaleiden pinnankarheusarvot sorvauksen ja ultraäänimuokkauksen jälkeen.

		Ra	Rq	Rz	Rmax	Rp	Rt
Mikroseosteräs	Sorvattu	0,825	0,998	4,72	5,23	2,81	5,32
	Ultraäänimuokattu	0,023	0,037	0,31	0,41	0,06	0,44
Nuorrutusteräs	Sorvattu	0,623	0,729	2,77	2,80	1,84	2,87
	Ultraäänimuokattu	0,012	0,016	0,10	0,12	0,04	0,15
Hiiletysteräs	Sorvattu	0,732	0,916	3,41	3,47	2,36	3,49
	Ultraäänimuokattu	0,015	0,021	0,14	0,18	0,06	0,27

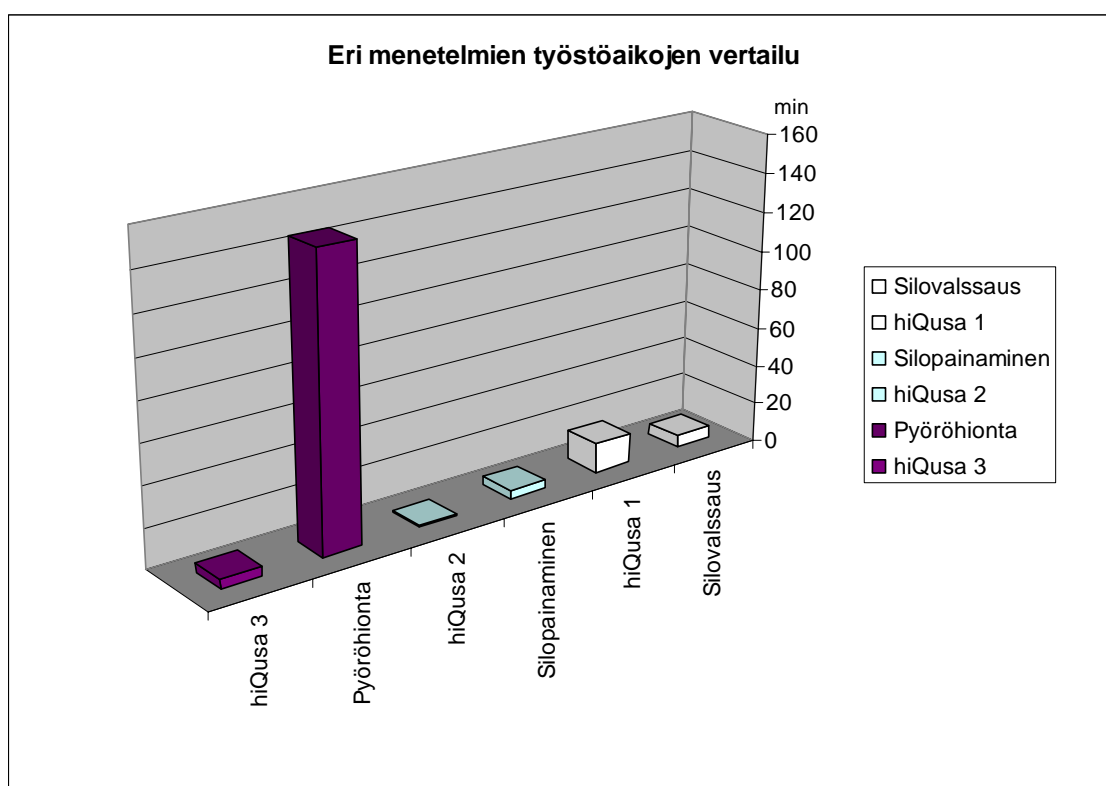
Kappaleet mitattiin koordinaattimittauskoneella SIP CMM 5 n:o 401 -93, jonka mittausepävarmuus on esitetty suurekohtaisesti osoitteessa http://www.finas.fi/Scopes/K003_A09_2005.htm. Mitattujen muotovirheiden keskiarvot on esitetty ohessa (Taulukko 8).

Taulukko 8. Mitattujen muotovirheiden keskiarvot [mm].

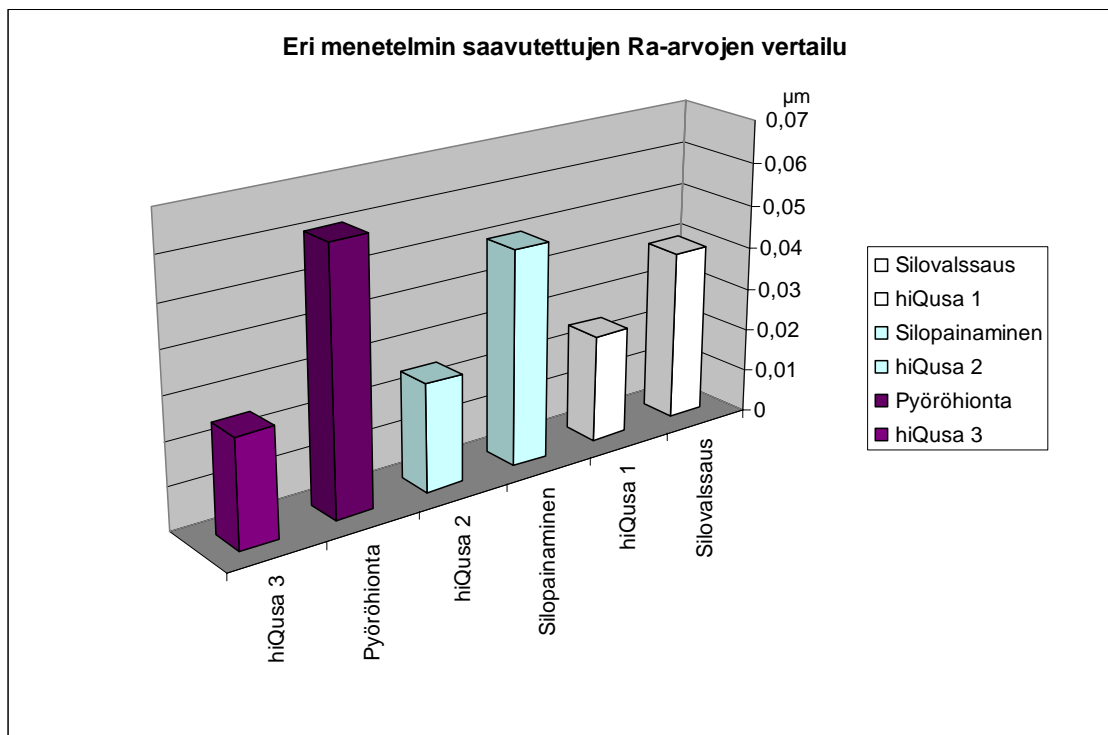
Lieriömäisyys	Sorvattu	Ultraäänimuokattu	Erotus
Mikroseosteräs	0,0494	0,0184	-0,0310
Nuorrutusteräs	0,0149	0,0190	0,0041
Hiiletysteräs	0,0185	0,0203	0,0018
Kartiomaisuus	Sorvattu	Ultraäänimuokattu	Erotus
Mikroseosteräs	0,0495	0,0174	-0,0321
Nuorrutusteräs	0,0149	0,0177	0,0028
Hiiletysteräs	0,0193	0,0205	0,0013
Ympyrämäisyys	Sorvattu	Ultraäänimuokattu	Erotus
Mikroseosteräs	0,0146	0,0098	-0,0048
Nuorrutusteräs	0,0105	0,0092	-0,0013
Hiiletysteräs	0,0124	0,0100	-0,0024

4 VERTAILU MUIHIN MENETELMIIN

Oheisessa kuvassa (Kuva 22) on verrattu ultraäänimuokkauksen, silovalssauksen, silopainamisen ja pyöröhionnan työstöaikoja kirjallisuudesta löytyneiden esimerkkien perusteella. Eri menetelmillä saavutettuja Ra – arvoja on vertailtu kuvassa (Kuva 23). Silovalssauksen kohteena oli $\varnothing 55 * 890$ mm männän varsi. Materiaalina oli C 45, lähtöpinnan Ra $0,7 \mu\text{m}$, silovalssauksen jälkeinen Ra $0,04 \mu\text{m}$ ja työstöaika 360 s. Aikaisemmin esitettyjen tulosten perusteella voidaan tätä silovalssausta vastaavalle ultraäänimuokkaukselle arvioida lähtöpinnan Ra $1,6 \mu\text{m}$ ultraäänimuokkauksen jälkeinen Ra $0,025 \mu\text{m}$ ja työstöaika 923 s.



Kuva 22. Eri menetelmien työstöaikojen vertailu.



Kuva 23. Eri menetelmin saavutettujen Ra-arvojen vertailu.

Silopainettu kappale oli $\varnothing 51 * 38$ mm teräksinen mäntä ($n 350$ r/min, $f 0,025$), lähtöpinnan Ra $0,3 \mu\text{m}$ ja $1,14 \mu\text{m}$, silopainettu Ra $0,05 \mu\text{m}$ ja $0,13 \mu\text{m}$, työstöaika 261 s. Tätä vastaavalle ultraäänimuokkaukselle voidaan arvioida lähtöpinnalle Ra $1,6 \mu\text{m}$ ultraäänimuokkauksen Ra $0,025 \mu\text{m}$ ja työstöaika 37 s.

Pyöröhiottu kappale oli $\varnothing 50,25 * 300$ mm 34 CrNiMo 6 akseli. Käytetyn laikan halkaisija oli 290 mm, leveys 22 mm, pyörimisnopeus 1640 r/min ja lastuamisnopeus 1490 m/min. Pyöröhiotun pinnan Ra $0,061 \mu\text{m}$ ja työstöaika 8760 s. Vastaavalle ultraäänimuokatulle akselille voidaan arvioida lähtöpinnalle Ra $1,6 \mu\text{m}$ ultraäänimuokkauksen jälkeinen Ra $0,025 \mu\text{m}$ ja työstöaika 284 s.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Keskimääräisten pinnankarheussuureiden laskennallisten arvojen vaihteluväli työstöparametreittain oli materiaaliikohtainen. Kyseiset vaihteluvälit on koottu oheisiin taulukkoihin (Taulukko 9...Taulukko 12) materiaalien työstöparametrien mukaan.

Taulukko 9. Keskimääräisten pinnankarheussuureiden vaihteluväli lähtöpinnan Ra -arvon mukaan.

[Ra]	Ra	Rq	Rz	Rmax	Rp	Rt
Mikroseosteräs	0,0287	0,0413	0,2500	*****	0,0433	0,5500
Nuorrutusteräs	0,0027	0,0060	0,1233	0,3467	0,0600	0,4000
Alumiini	0,0050	0,0073	0,0567	0,0967	0,0200	0,1233
Hiiletysteräs	0,0025	0,0018	0,0017	0,0333	0,0117	0,0150
Ruostumaton teräs	0,0005	0,0005	0,0150	0,0233	0,0050	0,0217

Taulukko 10. Keskimääräisten pinnankarheussuureiden vaihteluväli kärjen kosketusvoiman F mukaan.

[F]	Ra	Rq	Rz	Rmax	Rp	Rt
Mikroseosteräs	0,0080	0,0110	0,0600	*****	0,0167	0,1433
Nuorrutusteräs	0,0107	0,0200	0,1533	0,3600	0,0433	0,3333
Alumiini	0,0377	0,0503	0,3467	0,4467	0,1033	0,5167
Hiiletysteräs	0,0017	0,0023	0,0567	0,1100	0,0167	0,1067
Ruostumaton teräs	0,0027	0,0040	0,0400	0,0600	0,0067	0,0433

Taulukko 11. Keskimääräisten pinnankarheussuureiden vaihteluväli työstönopeuden V mukaan.

[V]	Ra	Rq	Rz	Rmax	Rp	Rt
Mikroseosteräs	0,0193	0,0243	0,1200	*****	0,0333	0,2067
Nuorrutusteräs	0,0100	0,0103	0,0367	0,2867	0,0167	0,2167
Alumiini	0,0350	0,0473	0,3500	0,5733	0,0900	0,6233
Hiiletysteräs	0,0043	0,0060	0,0367	0,0967	0,0167	0,0900
Ruostumaton teräs	0,0030	0,0073	0,0767	0,1033	0,0100	0,1033

Taulukko 12. Keskimääräisten pinnankarheussuureiden vaihteluväli generaattorin ulostulotehon P mukaan.

[P]	Ra	Rq	Rz	Rmax	Rp	Rt
Mikroseosteräs	0,0197	0,0317	0,2100	*****	0,0800	0,5200
Nuorrutusteräs	0,0067	0,0137	0,1267	0,3967	0,0400	0,3500
Alumiini	0,0323	0,0453	0,3167	0,4633	0,0967	0,5500
Hiiletysteräs	0,0053	0,0060	0,0333	0,0433	0,0167	0,0433
Ruostumaton teräs	0,0013	0,0023	0,0200	0,0600	0,0067	0,0633

Kun tuloksissa huomioidaan käytetyn laitteiston mittauskyky ja -epävarmuus sekä resoluutio ovat esim. Rt, Rz ja Rmax – arvojen vaihteluvälit oltava $> 0,01 \mu\text{m}$ jotta kyseisellä työstöparametrilla voidaan todeta olevan vaikutusta ko. arvoihin materiaalia muokattaessa. Keskimääräisten Ra – arvojen vaihteluvälin tulisi olla $> 0,006 \mu\text{m}$ jotta työstöparametrilla voidaan katsoa olevan vaikutusta saavutettavaan Ra – arvoon.

Materiaaleista ainoastaan mikroseosteräksellä lähtöpinnan Ra – arvolla voidaan todeta olevan vaikutusta ultraäänimuokatun pinnan Ra – arvoon. Mikroseosteräksellä sorvattujen pintojen Ra – arvot olivat välillä $0,8 \dots 4,6 \mu\text{m}$ ja muita materiaaleja suurempi vaihteluväli selittää tuloksen. Kärjen kosketusvoimalla F, työstönopeudella v_c , syötöllä f ja generaattorin antoteholla P voidaan todeta olevan merkitystä

saavutettavaan Ra – arvoon mikroseos- ja nuorrutusteräksellä sekä alumiinilla. Muiden materiaalien kohdalla mittaustulokset ovat hyvin lähellä toisiaan.

Vaikka lähtöpinnan Ra – arvolla ei voida todeta olevan vaikutusta saavutettavaan Ra – arvoon kaikilla materiaaleilla, ei tämä tarkoita sitä, että lähtöpinta voisi olla mikä tahansa. Valituilla työstöparametreilla ja lähtöpintojen Ra -arvoilla saadaan aikaiseksi toisiinsa nähden niin samanlaisia pintoja, ettei eroja pystytä osoittamaan käytössä olevilla mittausmenetelmillä.

Kaikilla työstöparametreilla voidaan todeta olevan vaikutusta Rmax, Rt ja Rz -arvoihin kaikilla materiaaleilla (Rmax -arvoa ei mitattu mikroseosteräkselle).

Ultraäänimuokkauksen vaikutusta kappaleen geometriaan arvioitaessa tulee ottaa huomioon geometrian mittausmenetelmä. Ympyrämäisyyden arvot osoittavat hienoista paranemista ultraäänimuokatuissa kohdissa, mutta erot ovat selitettävissä merkittävästi parantuneilla pinnankarheusarvoilla sorvattuihin pintoihin nähden (Taulukko 7). Lieriömäisyyden ja kartiomaisuuden arvojen suhteen ei voida osoittaa merkittäviä ultraäänimuokkauksesta aiheutuvia muutoksia, koska eri pinnoilta mitatut arvot (Taulukko 8) eivät ole suoraan vertailukelpoisia.

Laitteen testauksen aikana havaittiin joitakin sen käyttöön liittyviä ongelmia ja kehityskohtia. Lastuamismesteen esisuodatus 10 µm suodatusasteella osoittautui hankalaksi käytetyllä suodatinpanoksella lyhyen vaihtovälin vuoksi. Näin korkean suodatusasteen suodatin aiheuttaa huomattavaa virtausvastusta lastuamismestelle ja lastuamismestepumpun mitoitus tulisi tarkistaa suodatusastetta vastaavaksi. Pienentynyt lastuamismesteen virtaus herkistää ultraäänimuokkaimen muunninosan ylikuumentumiselle erityisesti generaattorin ulostulotehon ollessa yli 350 W ja kärjen kosketusvoiman yli 350 N. Ongelma voidaan ratkaista käyttämällä toisentyyppistä suodatinpanosta ja lastuamismesteen erilliskiertoa laitteen muunninosalle. Lisäksi kyseeseen voisi tulla erilaisten automaattisuodattimien käyttö.

Teollista käyttöä ajatellen merkittäväksi tekijäksi nousee menetelmän vaatima kokonaisaika, johon sisältyy myös ultraäänimuokkaimen käynnistäminen ja asetettujen työstötaajuuksien ja – tehojen saavuttaminen. Tutkimuksessa käytetyssä sorvissa lastuamismeste saadaan revolverista ulos yhdestä työkalupaikasta, jolloin lastuamismestettä ei voi kierrättää muissa paikoissa ilman erikoisjärjestelyjä eikä laitetta voida käynnistää etukäteen. Käynnistyksen yhteydessä ilmennyttä viivettä voidaan lyhentää generaattorin asetuksia muuttamalla.

Laitteen testauksessa käytettiin käsin hiottuja kovametallisia kärkipaloja joiden geometria oli työkalumikroskoopilla tarkastellen epämääräinen. Käsin hiottaessa tulisi käyttää sapluunaa, joka minimoisi geometrian vaihtelut ja auttaisi työstöparametrien optimoinnissa. Kärkipalat kiinnitettiin ultraäänimuokkaimen muuntimen karan kierrereikään ilman ohjausviistettä, joten kärkipalan kiinnitys oli epämääräinen eikä sen vaihtaminen onnistunut ilman esiasetuslaitetta. Lisäksi tämän tyyppisten (Kuva 4) kärkipalojen kiristäminen käsin aiheuttaa kärkipalan rikkoutumisriskin.

Ultraäänimuokkauksen parhaat ominaisuudet ovat menetelmäintegraatio ja lyhyet työstöajat saavutettaviin pinnanlaatuihin nähden. Laitteiston kiinnitettävyyden erilaisiin työstökoneisiin luo monipuolisia mahdollisuuksia sen käytölle. Tavanomaisten menetelmien rajoitteena ovat tyypillisesti erilliskoneiden työstöavaruus ja kappaleiden painorajoitukset. Mahdolliset uudelleen kiinnityksestä ja varastoinnista aiheutuvat muodonmuutokset eliminoidaan työstettäessä kappale kerralla valmiiksi samassa kiinnityksessä.

Myös tasomaisten ja kaksoiskaarevien pintojen käsittely on mahdollista erilaisten kärkipalageometrioiden avulla. Kärkipalageometrioiden kehittymisen myötä ultraäänimuokkausta on mahdollista soveltaa esim. muottien, hammaspyörien ja erilaisten akselien viimeistelyssä ja huollossa. Lisäksi tässä tutkimuksessa käytettyjä työstönopeuksia on mahdollista kasvattaa erilaisten geometrioiden avulla.

Tässä tutkimuksessa käytetyt lähtöpinnanlaadut saavutetaan sorvaamalla käytetyille materiaaleille helposti. Koska ultraäänimuokkaus ei ole varsinaisesti ainetta poistava työstömenetelmä, tulee esityöstetyn kappaleen geometrian vastata lopullista vaatimusta mahdollisimman tarkasti.