



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Materjalitehnika instituut

Materjaliõpetuse õppetool

MTM40LT

Liisa Kurisoo

**TRAATEROSIOONLÕIKUSEL VALMISTATUD
TÖÖRIISTADE EELTÖÖTLUS
PVD PINDAMISEL**

Bakalaureusetöö

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn
2014

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Eron Adobergi juhendamisel

“.....” mai 2014 a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” mai 2014 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”2014 a.

..... allkiri

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2014 aasta 6 semester

Üliõpilane: Liisa Kurisoo, 112411
Õppekava: MATB02/09
Eriala: Tootearendus ja tootmistehnika
Juhendaja: Eron Adoberg, teadur
Konsultandid: Priidu Peetsalu, Toomas Raik

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Traaterosioonlõikusel valmistatud tööriistade eeltötlus PVD pindamisel

(inglise keeles) Pre-treatment of wire EDM cut tools before PVD coating

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaate teostamine	30.03.2014
2.	Uurimismetoodika kirjeldus	10.04.2014
3.	Vastavalt valitud uurimismetoodikatele katsetuste teostamine	20.04.2014
4.	Tulemuste töötlemine ja analüüs	10.05.2014

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Optimaalsemate töötluste valik traaterosioonlõikusel valmistatud silelõike stantsi templitele enne PVD pindamist lähtudes ettevõtte poolt antud nõuetest. Ettevõtte poolt antud nõuded: pinnakaredus R_a kuni $0,4 \mu\text{m}$, hea PVD pinde adhesioon, traaterosioonlõikusest kahjustatud kihi (valge kihi, *white layer*) puudumine.

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 12.mai .2014

Töö esitamise tähtaeg 22. mai 2014

Üliõpilane Liisa Kurisoo /allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja Eron Adoberg /allkiri/ kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

Eessõna.....	6
Sissejuhatus	7
1 Töö teoreetilised alused.....	8
1.1 Traaterosioonlõikus ja tööpõhimõte	8
1.2 Mikroabrasiivtöötlus.....	10
1.3 PVD pindamine	11
1.4 Pinnatekstuur ja seda iseloomustavad parameetrid	12
2 Uurimise meetodika	15
2.1 Traaterosioon lõikamisel kasutatud seadmed ja katsekehad	15
2.2 Pinnakareduse mõõtmine.....	16
2.3 Mikroabrasiivtöötlus.....	16
2.4 PVD pindamine	18
2.5 Adhesiooni määramine	19
2.6 Traaterosioonist kahjustatud kihi uurimise meetodika.....	20
3 Tulemused ja analüüs	22
3.1 Pinnakareduse mõõtmise tulemused peale traaterosioonlõikust	22
3.2 Pinnakareduse mõõtmiste tulemused peale mikroabrasiivtöötlust	23
3.3 SEM analüüs.....	24
3.4 Adhesioon.....	28
3.5 Traaterosioonlõikusest kahjustatud pinna uurimine	31
Kokkuvõte	35
Summary	37
Kasutatud kirjandus.....	38
LISAD	40
Lisa 1	40
Lisa 2	42

Lisa 3	43
Lisa 4	44
Lisa 5	45

EESSÕNA

Käesolev bakalaureusetöö on valminud Tallinna Tehnikaülikooli Materjalitehnika instituudis ning seotud instituudi ja ettevõtte AS Norma vahelise projektiga. Antud töö peamiseks eesmärgiks on töötada välja optimaalne ja parim eeltöötlus traaterosioonpingis lõigatud tööriistadele enne PVD pindamist. Lõputöö teema pakkus välja TTÜ Materjalitehnika instituudi teadur Eron Adoberg, kes oli töö juhendajaks.

Töö valmimisele aitasid kaasa AS Normast Adolf Talkop ja Toomas Raik, kes andsid AS Norma poolse panuse katsetuste teostamiseks. Sooviksin veel tänada Materjalitehnika instituudi vanemteadur Priidu Peetsalu, kes aitas mõista traaterosioonlõikuse olemust ja sellest tulenevat mõju tööriistadele.

Lõpetuseks tänaksin oma juhendajat Eron Adobergi, kes aitas lõputöö valmimisele kaasa oma teadmiste, nõuannete ja kannatlikkusega.

SISSEJUHATUS

Stantsimiseks vajalike tööriistu on võimalik valmistada kahel meetodil, üheks meetodiks on lihvimine, teiseks elektroerosioontöötlus. Silelõike stantsimisel kasutatavate templitele järgneb enamasti PVD pindamine, suurendamaks kulumiskindlust. Viimasel ajal on suundumus rohkem kasutada keeruka kujuga pindade korral elektroerosioontöötlust, kuna see on majanduslikult kiirem ja odavam kui koordinaatlihvimine.

Traaterosioonlõikuse negatiivseks küljeks on protsessi käigus detaili pinnale tekkiv kahjustatud kiht, mis tuleb eemalda tööriista lõikeelemendi pikema tööea tagamiseks. Kahjustatud kihi eemaldamiseks kasutatakse eeltöötlust, mida on võimalik teostada kahel viisil – lihvides või mikroabrasiivtööteldes. Viimane neist on eelistatum, kuna meetod võimaldab eemaldada kahjustatud kihti keeruka kujuga pindadelt suhteliselt lühikese aja jooksul ja on kasutusel eeltötlusena enne PVD pindamist.

Töö temaatika kasvas välja AS Norma poolsest soovist parandada arusaama traaterosioonlõikuse protsessi mõjust tööriista pinnale erinevatel seadmetel ja režiimidel. AS Norma poolt ette antud nõuded silelõike stantsi templitele on järgmised: pinnakaredus R_a kuni $0,4 \mu\text{m}$; pinde hea adhesioon ja traaterosioonlõikusest kahjustatud kihi (valge kihi, *white layer*) puudumine. Seadmete, lõikamisel kasutatud traatide, lõikerežiimide ja abrasiivtöötamise valiku teostas AS Norma. Töö üheks ülesandeks on pakkuda välja optimaalsem traaterosioonlõikus režiim ning teiseks ülesandeks eeltöötamise meetod enne PVD pindamist, et kõik esitatud nõuded oleksid täidetud.

Töö käigus võrreldi erinevate režiimidega traaterosioonlõikusel valmistatud katsekehade pinnakaredusi, seejärel mikroabrasiivtööteldi katsekehi erinevate abrasiividega ning uuriti töötluste mõju pinnakaredusele. Peale õhukese kõvapiinde sadestamist hinnati pinde adhesiooni alusmaterjalile ning kõige lõpuks uuriti traaterosioonlõikusest kahjustatud kihi olemasolu ja selle paksust.

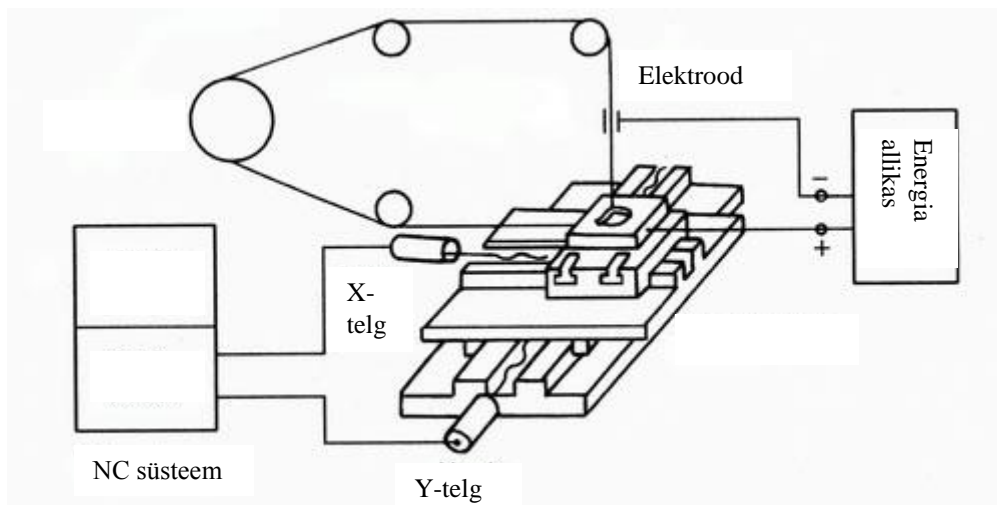
Katsed viidi läbi AS Normas, Tallinna Tehnikaülikooli Materjalitehnika instituudi katselaboris ja Materjaliuuringute teaduskeskuses.

1 TÖÖ TEOREETILISED ALUSED

1.1 Traaterosioonlõikus ja tööpõhimõte

Traaterosioonlõikuse meetod seisneb elektrivoolu elektrilahendusel anoodi (grafiit ja vask) ja katoodi (tööriistateras või muu tööriistamaterjal) vahel dielektrikus keskkonnas. Traaterosioonlõikusel toimub materjali eemaldamine suure sagedusega sädelahenduse abil. Viimase tekkimiseks peab toimuma läbilöök tooriku ja tööriista vahelises pilus. Sädelahenduse kontsentreerimiseks sukeldatakse tööriist ja toorik dielektrikusse, mis aitab jahutada elektroodi ja eemaldada aineosakesi pilust. Sädelahendusel lähtutakse põhimõttest, et toimuks tööriista või töödeldava detaili erosioon. [1, 2]

Dielektrik, teiste sõnadega läbiuhutav vedelik, on ioniseeritud mahalaadimise protsessi ajal. Sädelahenduse ajal pommitavad positiivselt laetud ioonid katoodi, mille tõttu temperatuur terase välises kihis tõuseb nii kõrgele, et põhjustab terase sulamise või aurustumise. Tulemusena tekivad väikesed sulanud metalli piisad, mis uhutakse killustikuna dielektrikusse. [2]



Sele 1.1 Traaterosioonlõikuse tööpõhimõte [3]

Tööriistaterase traaterosiooni opereerimisparameetrite määramisel tuleb silmas pidada nelja olulist faktorit:

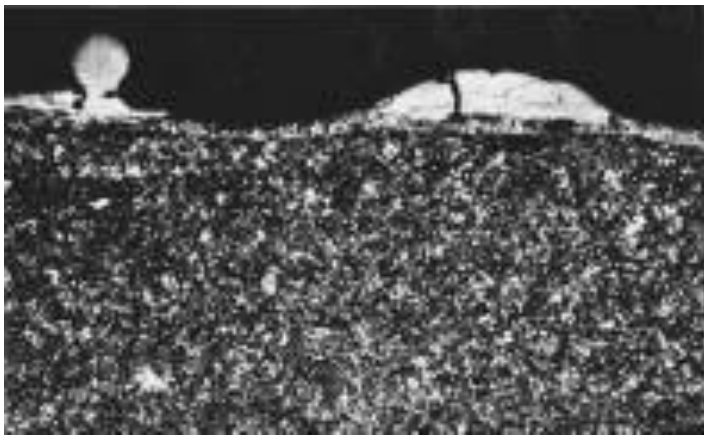
- toormaterjali eemaldamise määr
- saavutatav pinnatekstuur
- elektroodi kulumine
- mõju tööriistaterasele.

Ebasoodsates tingimustes võib traaterosiooni protsess mõjutada töödeldavat materjali nii, et see omakorda mõjutab tööriista püsivust. Sellistel juhtudel tuleb valida esimese kolme teguri puhul parameetrid, mis oleksid neljanda jaoks optimaalsed. [2]

Traaterosiooni mõju töödeldavale materjalile on tavapärastest masintööstlustest täiesti erinev. Kõrged temperatuurid terase pinnal põhjustavad terase sulamist või aurustumist, mille mõjust terase pinnale on Uddeholm on teinud põhjaliku uuringu. Kõikide muutuste põhjuseks on suur temperatuuri tõus pinnakihi. Temperatuuri tõusust on mõjutatud neli peamist pinnakõvadust iseloomustavat tegurit:

- mikrostruktuur
- kõvadus
- pingeseisund
- karbiidide sisaldus.

Traaterosioonlõikusest tekib lõigatud pinnale kahjustatud kiht. Põhimõtteliselt on see sulanud ja ümbersulatatud kiht, mida nimetatakse ka „valgeks kihiks“, kuna see ei söövitu metallograafilisel prepeareerimisel (sele 1.2). [2]



Sele 1.2 Traaterosioonlõikusest kahjustatud kiht [2]

Kahjustatud kiht on ümbersulatatud tsoon, mille all on termiliselt mõjutatud tsoon. Kahjustatud kiht on kiiresti kristalliseerunud kiht, kus on pinna suunas kasvanud välja pikad kristallid, milles võib tekkida pragusid. Kihi paksuseks on 15-30 μm sõltuvalt traadilõikuse parameetritest. Kahjustatud ala väheneb vastavalt lõikuste arvule. Feintooli uuringute kohaselt Agie Progress traaterosioonpingis lõigatud 5 lõikega detailid omavad kuni 1,5 μm paksust kahjustatud kihti. Kahjustatud kiht on rikastatud süsinikuga nii palju, et see on erinev

põhistruktuurist. Süsinikuga rikastamine toimub siis, kui süsivesinikud lagunevad elektroodis ja vedelikus või tekivad karbiidide lahustumusest. Kahjustatud tsoon ja termiliselt mõjutatud tsoon mõjutavad tööriista eluiga, kuna sisaldavad defekte ja on erinevad oma omadustelt, mistõttu tuleb traadilõikusel kahjustatud kiht viia miinimumini ja/või eemaldada. [2, 4]

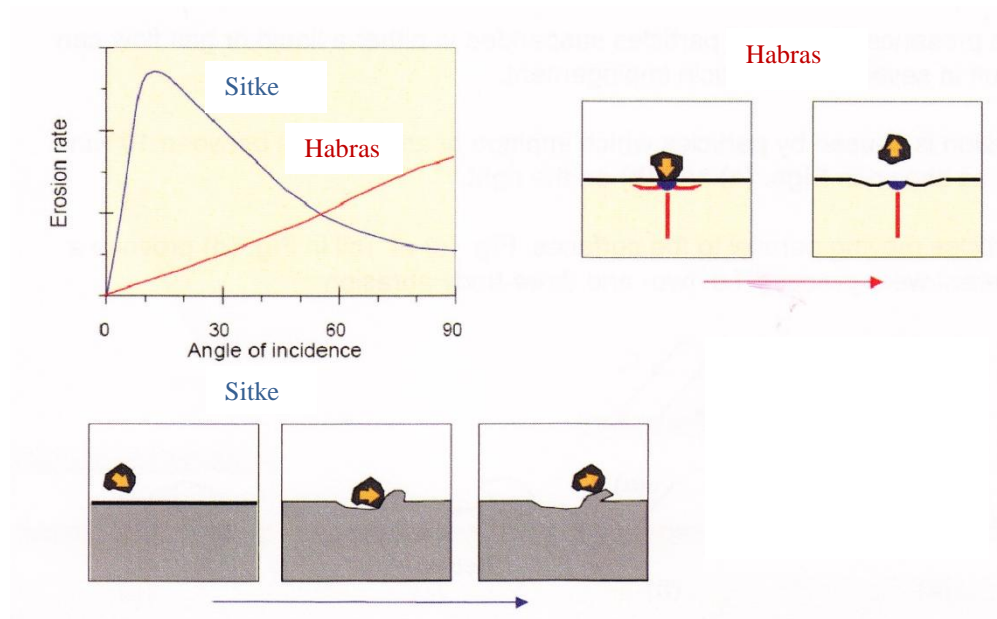
1.2 Mikroabasiivtöötlus

Mikroabasiivtöötlus on mehaaniline pinnatöötlusprotsess, mida kasutatakse oksiidide ja materjali eemaldamiseks metallselt pinnalt. Mikroabasiivtöötlused jagunevad kaheks – märg ja kuiv. Märja töötuse korral kasutatakse abrasiivi ja vedelikku, kuiva protsessi käigus segatakse ühtlaselt gaas ja abrasiiv, mis omakorda lastakse väikesest otsikust suure survega abrasiivjoana töödeldavale pinnale. [5]

Mikroabasiivtöötlust kasutatakse pinnakihti survepingete tekitamiseks, mis takistab praod arengut nii alusmaterjalis kui ka pindes. [6]

Lõpptulemust mõjutab abrasiivi materjal, abrasiivi suurus ja kuju, pihustusotsiku kuju, rõhk ja aeg. Abrasiividel, mille osakesed on nurgelised ja servadega, on löikav ja materjali eemaldav toime. Sellisteks abrasiivideks on alumiiniumoksiid ja ränikarbiid. Sfäärilised osakesed nagu klaaskuulid ei oma löikeservi ja neid kasutatakse siidja pinna ning sisepingete tekitamiseks. Abrasiivi kõvadus määrab ära osakese võime eemaldada töödeldavalt materjalilt pinnakihte, nt. alumiiniumoksiid mõjub pinnale väga agressiivselt. Osakese suurus mõjutab materjali eemaldamise aega ja pinnatekstuuri- ning karedust. [5]

Oluline abrasiivtöötlust mõjutav faktor on töötlusnurk. Pinnatöötlus 90° nurga all võib põhjustada alusmaterjalis mikropragusid, pinna võimalikult väheseks kahjustamiseks peaks mikroabasiivtöötlusnurk jääma vahemikku $15 - 45^\circ$. Seel 1.3 on näidatud sitke ning hapra materjali puhul abrasiivi mõju pinnale ja pinna kulumine sõltuvalt abrasiivtöötlusnurgast. [7]



Sele 1.3 Abrasiivi mõju erinevatele pindadele ja abrasiivtöötlusnurga mõju kulumisele [7]

1.3 PVD pindamine

Tööriistade eluea tõstmiseks kasutatakse õhukesi kõvapindeid. Õhukesteks pinneteks loetakse kuni 10 μm paksuseid keraamilisi pindeid. Tööriistade enimkoormatud osa on lõikepind ja nende katmine pindega parendab tööriista triboloogilisi omadusi, kuna nende pinnete kõvadus on kordades suurem (kuni 45 GPa) kui stantsitav materjal ja stantsimisprotsessi sattunud keskkonnast tingitud jääkproduktid (tolm, liivaosakesed, erinevad rauaoksiidid). Võimalik on kasutada nii keemilisi aurustus-sadestuspindeid (CVD) kui ka füüsikalisi aurustus-sadestuspindeid (PVD). PVD pinnete eeliseks on protsessis kasutatav madalam sadestustemperatuur (350 - 500 °C) võrreldes CVD pinnetega (700 - 1000 °C). Tööriistade pindamisel kasutatakse just PVD pindamismeetodit, kuna selle käigus kasutatav temperatuurivahemik ei mõjuta terase kõvadusnäitajaid. [8, 9, 10]

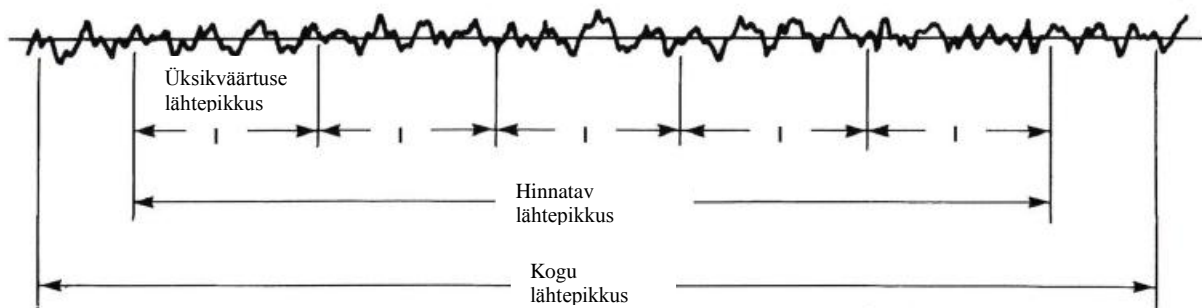
Enimlevinud kõvapinneteks on Ti, Al, Cr, Zr, Si, Nb, V jt. nitriidid ja karbiidid (nt. AlCrN, TiAlN, TiCN). [10]

1.4 Pinnatekstuur ja seda iseloomustavad parameetrid

Mõõtmised ja nende täpsus on vahetult seotud pinnakaredusega. Mis tahes viisil valmistatud pind erineb nimipinnast, kuna seal esinevad alati mitmesugused mikrokonarused. Ka kõige hoolikamal töötlemisel jätab lõikeriist pinnale enamasti üksteise kõrval paiknevaid mikrovagusid. [11]

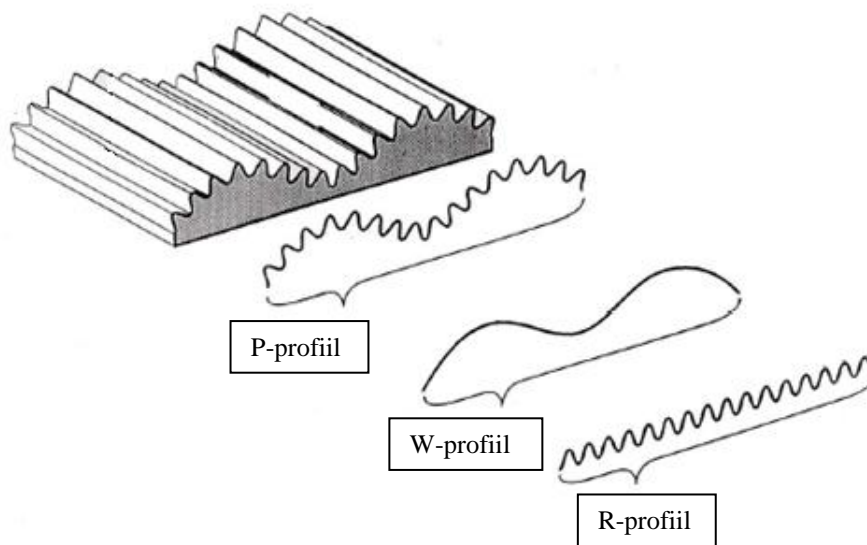
Pinnatekstuuri on võimalik mõõta kahel viisil – kontakt ja mitte-kontakt meetodil. Kontaktmeetodil veetakse mõõteotsikut mööda mõõdetavat pinda, mitte-kontakt meetodi puhul kasutatakse näiteks skanneerivaid mikroskoobe. [12]

Pinna reljeefi määramisel kasutatakse teatud lähtepikkust, mis koosneb omakorda üksikväärtuse lähtepikkustest. Kogu lähtepikkus peab olema seitse korda suurem, kui üksikväärtuse lähtepikkus. Pinnatekstuuri väärtusi hinnatakse viie üksikväärtuse lähtepikkuse vahemikus. Ülejäänud kahte üksikväärtuse lähtepikkust nimetatakse eel- ja järellähtepikkuseks (sele 1.4). [11, 12]



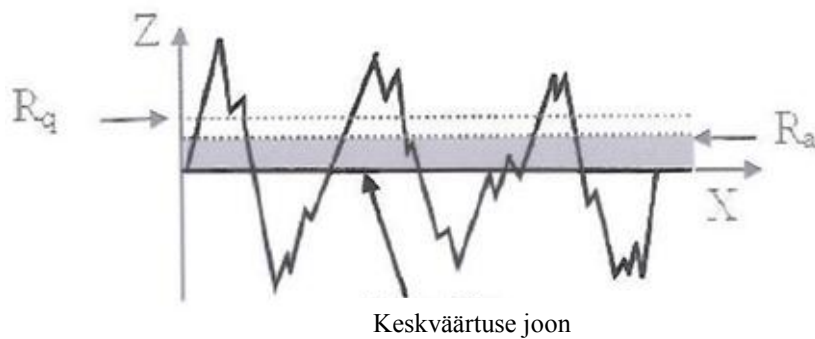
Sele 1.4 Pinnatekstuuri mõõtmise pikkuste skeem [13]

Pinnatekstuur jaguneb kolmeks profiiliks (sele 1.5). P-profiil (*primary profile*) on tegelik ehk lähteprofiil, mis on parameetrite arvutamise aluseks ja formeerib lainelisuse ja pinnakareduse lähte. W-profiil (*waviness profile*) on laineprofiil, mis kujuneb välja järefiltreerimise tulemusena, kus lühikese lainepikkusega komponendid puuduvad. R-profiiliks (*roughness profile*) nimetatakse pinnakaredusprofiili, mis kujuneb välja peenfiltreerimisel, kus pika lainepikkusega komponendid puuduvad. [14]



Sele 1.5 Pinnatekstuuri kolm erinevat profiili [13]

Pinnakaredus ehk R_a on kõikide R-profiili ordinaatide väärtuste aritmeetiline keskmine. W_a ja P_a on vastavalt W-profiili ja P-profiili ordinaatide väärtuste aritmeetilised keskmised. R_q (*RMS – root mean square*) on keskmine ruutjuur kõikidest R-profiili ordinaatidest (sele 1.6). [16]

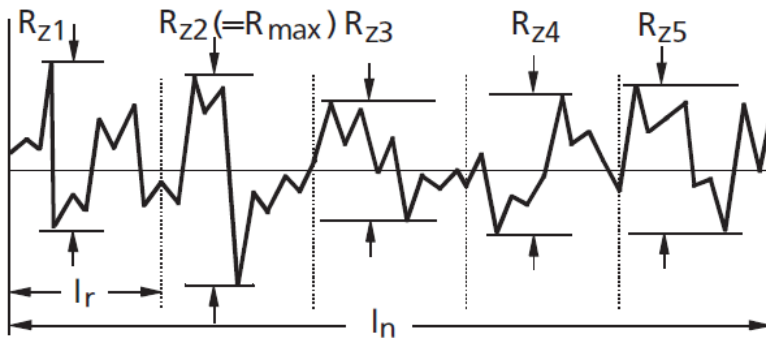


Sele 1.6 R_a ja R_q väärtusi iseloomustav skeem [15]

R_z näitab R-profiili tippkõrguste ja tippügavuste summa keskmine viiel üksikväärtuse lähtepikkusel ja seda arvutatakse valemiga:

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5} \quad (1.1)$$

R_{max} näitab maksimaalset viiest mõõdetust tippkõrguse ja tippügavuse summast üksikväärtuse lähtepikkusel. [16]



Sele 1.7 R_z ja R_{max} väärtusi iseloomustav skeem [16]

2 UURIMISE METOODIKA

2.1 Traaterosioon lõikamisel kasutatud seadmed ja katsekehad

Antud uurimustöös kasutati detailide lõikamiseks kolme erinevat traaterosioonpinkki - Agie Progress, Sodick AQ750 ja Sodick AQ350. Traaterosioonlõikusel kasutati 6 erinevat traati – Brass, Gamma Z, Thermo SA, Thermo SE, Thermo SD, Bedra Megacut Plus. Kõik traadid v.a. Brass on kattega ning valmistatud CuZn sulamist. EN/DIN 1.2739 (Böhler K110) terasest valmistati 22 katsekeha, mõõtudega 10.200x10.200x79 mm. Tabelis 2.2 on näidatud EN/DIN 1.2739 keemiline koostis. Tabelis 2.1 on toodud katsekehade lõikamiseks kasutatud traaterosioonpingid, traadid ja lõigete arv. Lisas 1 on näidatud lisaks katsekehade lõikamiseks kulunud aeg, teoreetiline pinnakaredus ja kõikide pinkide lõiketäpsuse kontrollmõõtmised.



Sele 2.1 Traaterosioonis lõigatud 22 katsekeha

Tabel 2.1 Katsekehade lõikamiseks kasutatud traaterosioonpingid, traadid ja lõigete arv

Nr.	Tähis	Pink	Traat	Lõigete arv	Nr.	Tähis	Pink	Traat	Lõigete arv
1	AB4	Agie	Brass	4	12	ASA6	Agie	Thermo SA	6
2	AZ4	Agie	Gamma Z		13	ASE6	Agie	Thermo SE	
3	ASD4	Agie	Thermo SD		14	ASD7	Agie	Thermo SD	7
4	ASA4	Agie	Thermo SA		15	ASA7	Agie	Thermo SA	
5	ASE4	Agie	Thermo SE		16	S7B4	AQ750	Brass	4
6	AB5	Agie	Brass	17	S7M4	AQ750	Bedra M. P.		
7	AZ5	Agie	Gamma Z	18	S7Z4	AQ750	Gamma Z		
8	ASD5	Agie	Thermo SD	5	19	S7Z5	AQ750	Gamma Z	5
9	ASA5	Agie	Thermo SA		20	S3B4	AQ325	Brass	4
10	ASE5	Agie	Thermo SE		21	S3M4	AQ325	Bedra M. P.	
11	ASD6	Agie	Thermo SD	6	22	S3Z4	AQ325	Gamma Z	

Tabel 2.2 EN/DIN 2.2739 keemiline koostis

EN/DIN 1.2739 keemiline koostis (keskmise %)					
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1,55	0,30	0,30	11,30	0,75	0,75

2.2 Pinnakareduse mõõtmine

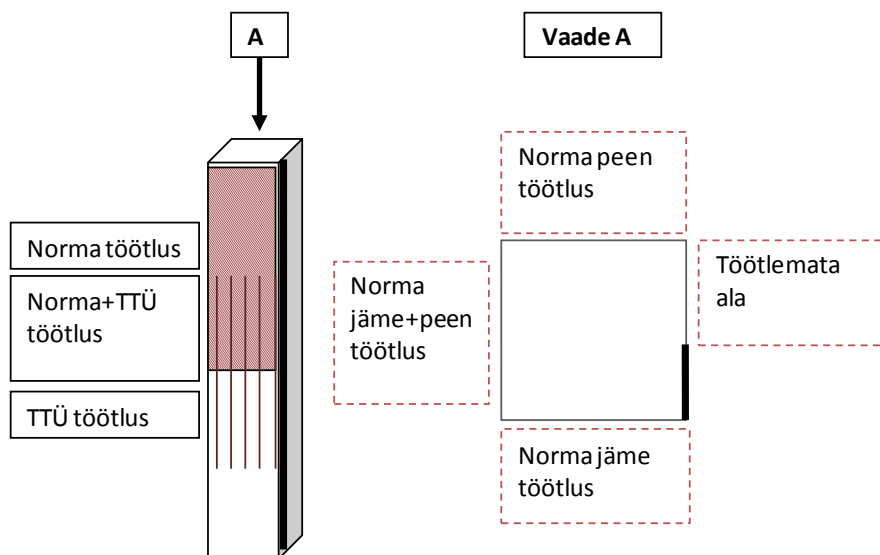
Pinnakareduse mõõtmiseks kasutati Mahr Perthometer Concept profilomeetrit. Mõõtmiseks vajaliku hinnatava lähtepikkuse määramiseks on Mahri parameetrite kataloogis standardi DIN EN ISO 4288 kohaselt paika pandud kindlad väärtused. Esmalt teostatakse pinnakareduse proovimõõtmine, saadud R_a väärtuse kaudu valitakse standardi kohaselt vastav λ_c (hinnatav lähtepikkus). Valitud λ_c korrutatakse seitsmega ning saadakse mõõtmiseks vajalik kogu lähtepikkus millimeetrites. Selline mõõteparameetri määramise meetod tagab mõõtmiste täpsema tulemuse. Tabelis 2.3 on toodud mõõtmiste teostamiseks kasutatud parameetrid.

Tabel 2.3 Pinnakareduse mõõtmise parameetrid

Mõõtmise lähtepikkus ($\lambda_c \times 7$) (mm)	Mõõtevahemik (μm)	Mõõtejõud (mN)
5,6 x 7	± 250	0,75

2.3 Mikroabrasiivtöötlus

AS Normas tehti mikroabrasiivtöötlus kõikidele katsekehadele vastavalt skeemile seel 2.2. Katsekehade kolm külge töödeldi kahe erineva abrasiiviga SM2001A ja SM2000A, rõhuga 2,5 – 3 bar, 20 – 30 mm kauguselt, 50 – 80 kraadise nurga all 10 sekundit. TTÜs töödeldi valikuliselt neist pooled – 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 18, 21, 22. Töödeldi F500 abrasiiviga (sele 2.3), rõhuga 2 bar, 100 mm kauguselt, 20-30 kraadise nurga all umbes minut aega. Katsekehasid nr. 7 ja 18 töödeldi Norma jäme + peen ja Norma peen töötluste külgedelt vastavalt 2 ja 3 minutit. Tabelis 2.4 on näidatud mikroabrasiivtöötluste tähtsamad parameetrid.

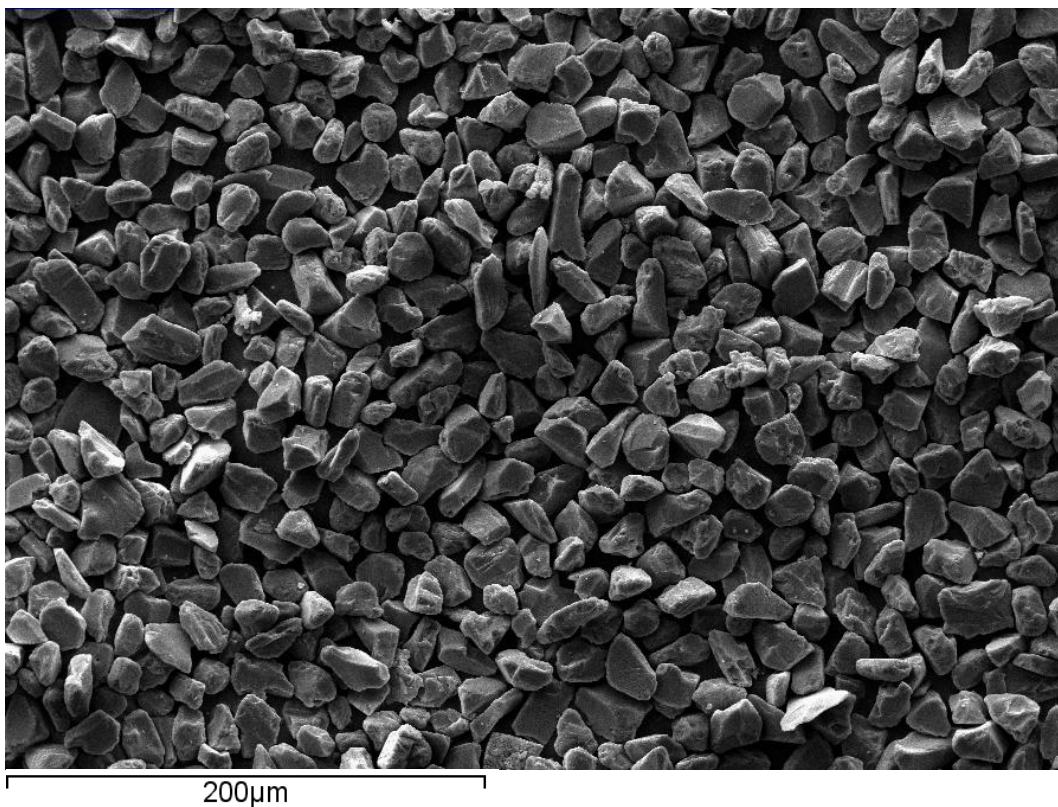


Sele 2.2 Mikroabasiivtöötluste skeem

Tabel 2.4 Mikroabasiivtöötluste abasiivid ja parameetrid

Töötlus	Abrasiiv	Rõhk (bar)	Kaugus (mm)	Nurk (°)	Aeg (sek)	Abrasiivosakese suurus (µm)
Norma						
Jäme	SiC + Al ₂ O ₃ (SM2001A*)	2,5	20-30	50-80	10	101
Peen	SiC + Al ₂ O ₃ (SM2000A*)	3	20-30	50-80	10	68
Jäme+peen	SM2001A+SM2000A	2,5 + 3	20-30	50-80	10	
TTÜ						
Ülipeen	Al ₂ O ₃ (F500)	2	100	20-30	60-180	20

* HGH – luedenscheid toode



Sele 2.3 SEM foto F500 mikroabasiivist

2.4 PVD pindamine

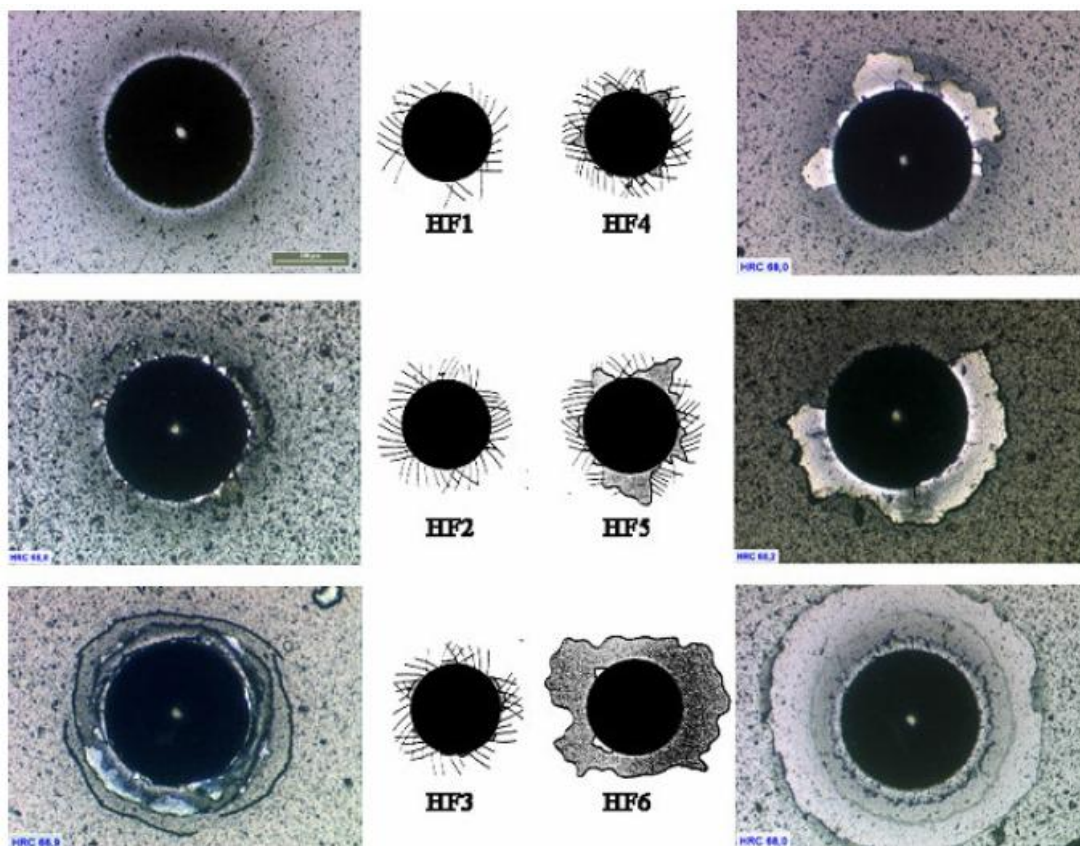
Enne pindamist puhastati katsekehad piiritusega, järgnevalt asetati katsekehad hoidikutesse (sele 2.4). Pindamisprotsess viidi läbi seadmega PLATIT π 80. Katsekehad kuumutati seadmes 475 °C 1 h vältel, millele järgnes plasmapuhas Ar - ioonidega. Katsekehadele sadestati TiAlN monopinnet, pinde paksusega 1,6 μ m.



Sele 2.4 Katsekehade paigutus hoidikutes

2.5 Adhesiooni määramine

Uurimaks pinnete adhesiooni alusmaterjalile viidi läbi Rockwelli adhesiooni test, mille mõõtmiseks kasutati Daimler-Benz'i meetodikat vastavalt standardile *Verein Deutscher Ingenieure Normen, VDI 3198, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1991*. Lähtudes standardist kasutati indenteerimiseks Rockwelli C skaalat ning jäljed jagati 6 erinevasse klassi: HF1 – HF6 (sele 2.5). HF1 viitab väga heale adhesioonile, pinde pragunemine on minimaalne ja delamineerumist ei esine üldse ja HF 6 viitab väga kehvale adhesioonile, esineb pinde täielik delamineerumine.



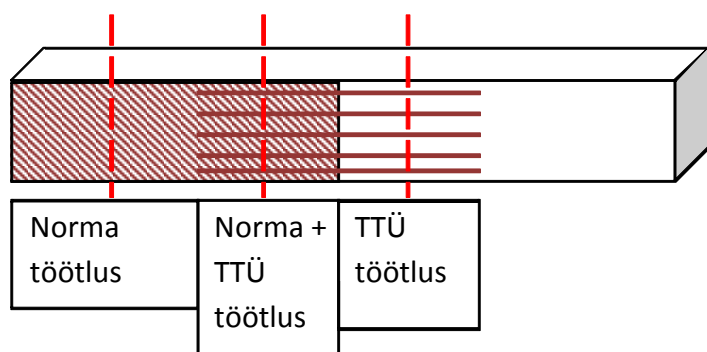
Sele 2.5 Daimler-Benz indenteerimisjälgede klassid hindamaks pinde adhesiooni alusmaterjalile

2.6 Traaterosioonist kahjustatud kihi uurimise meetodika

Traaterosioonist kahjustatud kihi uurimiseks kasutatud meetod koosnes viiest etapist:

1. Katsekehade lõikamine
2. Lõigatud tükide paigaldamine mikrolihvi
3. Lihvimine ja poleerimine
4. Söövitus
5. Kahjustatud kihi uurimine valgusmikroskoobiga

Katsekehad lõigati kolmeks tükiks, lõikamise skeem on näidatud seel 2.6. Lõigatud tükid paigaldati mikrolihvi seadmega Buehler Simplimet 3000.



Sele 2.6 Katsekehade lõikamise skeem

Järgnevalt viidi läbi lihvimise ja poleerimise protseduur, et eemaldada katsekeha lõikamisel tekkinud kahjustused ning tuua esile materjali originaalpind. Tabelis 2.5 on toodud lihvimiseks ja poleerimiseks kasutatud lihvimispaberid, poleerriided ja jahutusvedelikud. Poleeritud pinda söövitati 5-10 sekundit 3% HNO₃ happega. Viimaks uuriti optilise valgusmikroskoobiga traaterosioonist kahjustatud kihti.

Tabel 2.5 Lihvimisel ja poleerimisel kasutatavad vahendid

Jrk. Nr.	Pind	Vedelik
1	Buehler SiC Abrasive Paper / P80 – P320	vesi
2	Buehler Polishing Cloth TriDent / 6 µm	MetaDi Monocrystalline Diamond Suspension 6 µm + monoetüleenglükool
3	Buehler Polishing Cloth VerduTex / 3 µm	MetaDi Monocrystalline Diamond Suspension 3 µm + monoetüleenglükool
4	Buehler Polishing Cloth Chemomet I / 0,05 µm	MetaDi Supreme Polycrystalline Diamond Suspension 0,05 µm

3 TULEMUSED JA ANALÜÜS

3.1 Pinnakareduse mõõtmise tulemused peale traaterosioonlõikust

Pinnakareduse mõõtmisi peale traaterosioonlõikust teostati nii piki kui ka risti, mõõtetulemused on lisas 2. Piki ja risti mõõdetud pinnakareduste tulemuste vahel märkimisväärset erinevust ei esine. Tabelis 3.1 on näidatud katsekehade keskmised R_a ja R_z väärtused peale traaterosioonlõikust. Võrdluseks on näidatud ka traadilõikuspinkide tarnijate poolt esitatud teoreetilised pinnakareduste väärtused. Nagu näha on enamikel juhtudel tegelikud väärtused lähedased teoreetilistele. Suurem erinevus teoreetilise ja tegeliku kareduse vahel esineb katsekehade nr. 16 - 18 puhul, kus vahe on kuni 0,35 μm . Süstemaatilist R_a ja R_z erinevust erinevate traatide vahel ei esine.

Tabel 3.1 Katsekehade R_a ja R_z peale traaterosioon lõikust

Nr.	R_a (μm)	R_z (μm)	Teoreetiline R_a (μm)	Nr.	R_a (μm)	R_z (μm)	Teoreetiline R_a (μm)
1	0,41	3,23	0,3	12	0,12	1,31	0,18
2	0,44	3,22	0,3	13	0,20	1,84	0,18
3	0,47	3,63	0,3	14	0,09	0,81	0,15
4	0,47	3,42	0,3	15	0,09	1,03	0,15
5	0,48	3,94	0,3	16	0,87	6,46	0,65
6	0,18	1,62	0,2	17	1,00	7,24	0,65
7	0,22	2,23	0,2	18	0,90	6,27	0,65
8	0,18	2,10	0,2	19	0,32	2,62	0,32
9	0,18	1,60	0,2	20	0,37	3,47	0,32
10	0,22	2,19	0,2	21	0,38	3,11	0,32
11	0,12	1,15	0,18	22	0,41	3,47	0,32

3.2 Pinnakareduse mõõtmiste tulemused peale mikroabrasiivtöötlosti

Pinnakareduste väärtused peale Normas tehtud mikroabrasiivtöötlust on toodud lisas 3. Peale Normas tehtud jämetöötlust jäi kõikide katsekehade keskmine pinnakaredus R_a vahemikku $0,7 - 0,91 \mu\text{m}$ ja R_z $5,74 - 7,48 \mu\text{m}$. Jäme + peen töötlus andis R_a vahemikus $0,50 - 0,65 \mu\text{m}$, R_z $3,9 - 4,83 \mu\text{m}$ ja peentöötluste puhul olid vahemikud R_a $0,48 - 0,68 \mu\text{m}$, R_z $3,85 - 5,59 \mu\text{m}$. Tulemuste suur hajuvus on tingitud mikroabrasiivtöödeldud pinna ebaühtlusest. Jämetöötlust üksinda ei ole sobilik, kuna soovitud R_a peab olema vahemikus $0,2 - 0,4 \mu\text{m}$. Ka jäme + peen ja ainult peentöötlus ei saavuta ette antud pinnakaredust.

TTÜ mikroabrasiivtöötlust tehti valikuliselt 12 katsekehale, arvestades erinevaid traadilõikusseadmeid, pinna kvaliteeti peale traaterosioonlõikust, ajalist kulu. Kuue ja seitsme lõikega valmistatud katsekehad pole ajaliselt kõige optimaalsemad, seega vaatluse alla jäid 4 ja 5 lõikega valmistatud katsekehad. Pinnakareduse mõõtmise tulemused peale TTÜ mikroabrasiivtöötlust on toodud lisas 4. TTÜ töötlus Normas tehtud mikroabrasiivtöötlust pindasid oluliselt parandada ei suuda. Selgub, et kui algne traadilõikuse pinna R_a on suur (R_a $0,9$), siis TTÜ töötlus parendab (silub) pinda (R_a $0,65$), ning see on sõltuv töötluste ajast, kuid soovitud tulemuseni ei jõuta. Keskmise pinnakareduse R_a $0,45 \mu\text{m}$ korral saavutatakse TTÜ abrasiivtöötlustega pinnakaredus R_a $0,3 \mu\text{m}$, mis on soovitud tulemuse piirides. Väiksema R_a korral (R_a $0,2$) muudab TTÜ töötlus traadilõikuse pinnakaredust kuni R_a $0,12 \mu\text{m}$.

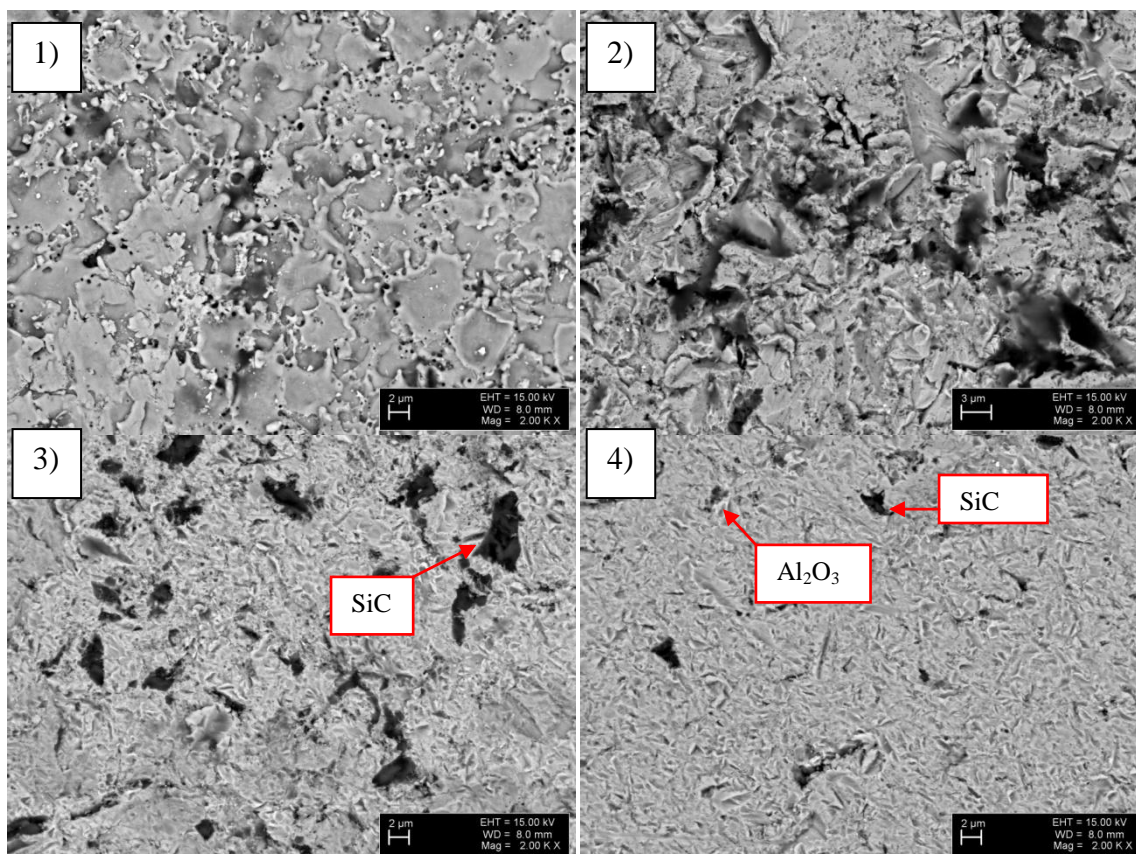
Erinevate karedustega pindade võrdlemiseks valiti edasisteks katsetusteks katsekehad nr. 7 ja 18. Mikroabrasiivtöötluste ajalise mõju välja selgitamiseks võeti võrdluseks katsekeha nr. 8. Kuna Normas tehtud jäme ja jäme + peen töötluste pinnad ei anna soovitud karedust, uuriti edasi vaid Norma peentöödeldud külge. Tabelis 3.2 on toodud edasisteks katsetusteks valitud katsekehade R_a ja R_z .

Tabel 3.2 Edasisteks katsetusteks valitud katsekehade Ra ja Rz

Nr.	R _a Traaterosioon -lõikus (µm)	R _z Traaterosioon -lõikus (µm)	R _a Norma peen (µm)	R _z Norma peen (µm)	R _a Norma peen + TTÜ (µm)	R _z Norma peen + TTÜ (µm)	R _a TTÜ (µm)	R _z TTÜ (µm)
7	0,22	2,23	0,55	4,40	0,44	3,67	0,12	1,28
8	0,18	2,10	0,48	3,93	0,51	4,06	0,14	1,40
18	0,90	6,27	0,69	5,59	0,43	3,19	0,64	4,43

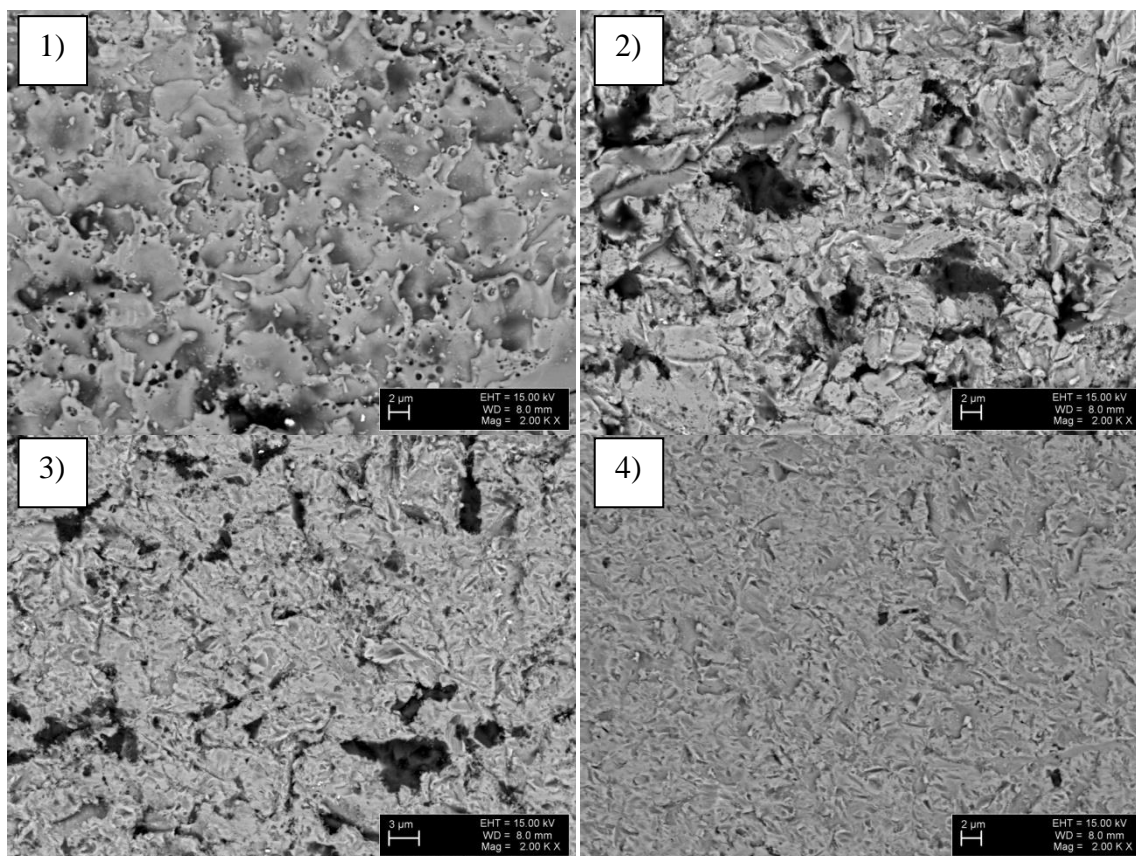
3.3 SEM analüüs

Järgnevalt on toodud skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) fotod erinevatest mikroabrasiivtöötlus pindadest. Piltideks on valitud BE (*back-scattered electrons*) väljas tehtud fotod, et tuua välja keemilise koostise erinevust. Raskemad elemendid on antud väljas heledamad kui kergemad elemendid. Fotod on tehtud katsekehade nr. 7, 8 ja 18 töödeldud pindadest.



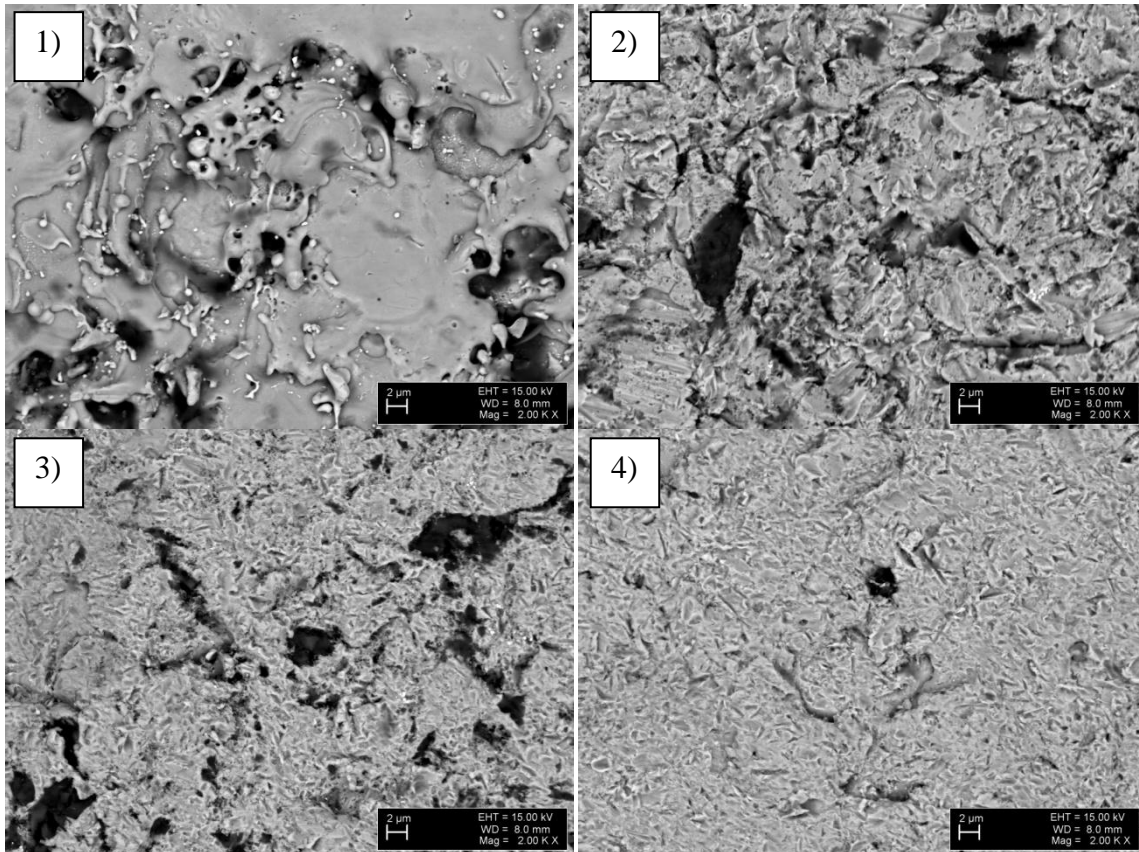
Sele 3.1 SEM fotod katsekeha nr. 7 töödeldud pindadest 1) traadilõikus 2) Norma peentöötlus 3) Norma peen + TTÜ töötlus (3 minutit) 4) TTÜ töötlus (3 minutit); suurendusel 2000x

Kõikide traadilõikus pindade EDS keemiline koostis näitas, et pinnal leidub Cu ja Zn, millest järeldub, et traadilõikusel on traat sulanud metalli pinnale (lisa 5). Katsekeha nr. 7 Norma ja Norma + TTÜ abrasiivtöödeldud pindadelt on traadist tulenev kiht töötamise käigus täielikult eemaldatud, TTÜ 3 minutiline töötus eemaldab traadikihi peaaegu täielikult - vähesel määral täheldati keemilises koostises Cu ja Zn. Normas töödeldud pinnad sisaldavad SiC osakesi suurusega kuni 10 μm (tumedad), mis pihustatakse abrasiivtöötamise käigus pinnale ning mille tagajärjel osakesed pinna külge kinni kleepuvad. Ka järgnev TTÜ töötus ei ole suutnud neid eemaldada ning abrasiiv jätab pinnale Al_2O_3 osakesi (heledad). TTÜ töödeldud pinnal olevad tumedad SiC osakesed on Norma abrasiivi tekitatud, kuna F500 abrasiiv SiC osakesi ei sisalda.



Sele 3.2 SEM fotod katsekeha nr. 8 töödeldud pindadest 1) traadilõikus 2) Norma peentöötlus 3) Norma peen + TTÜ töötlus (1 minut) 4) TTÜ töötlus (1 minut); suurendusel 2000x

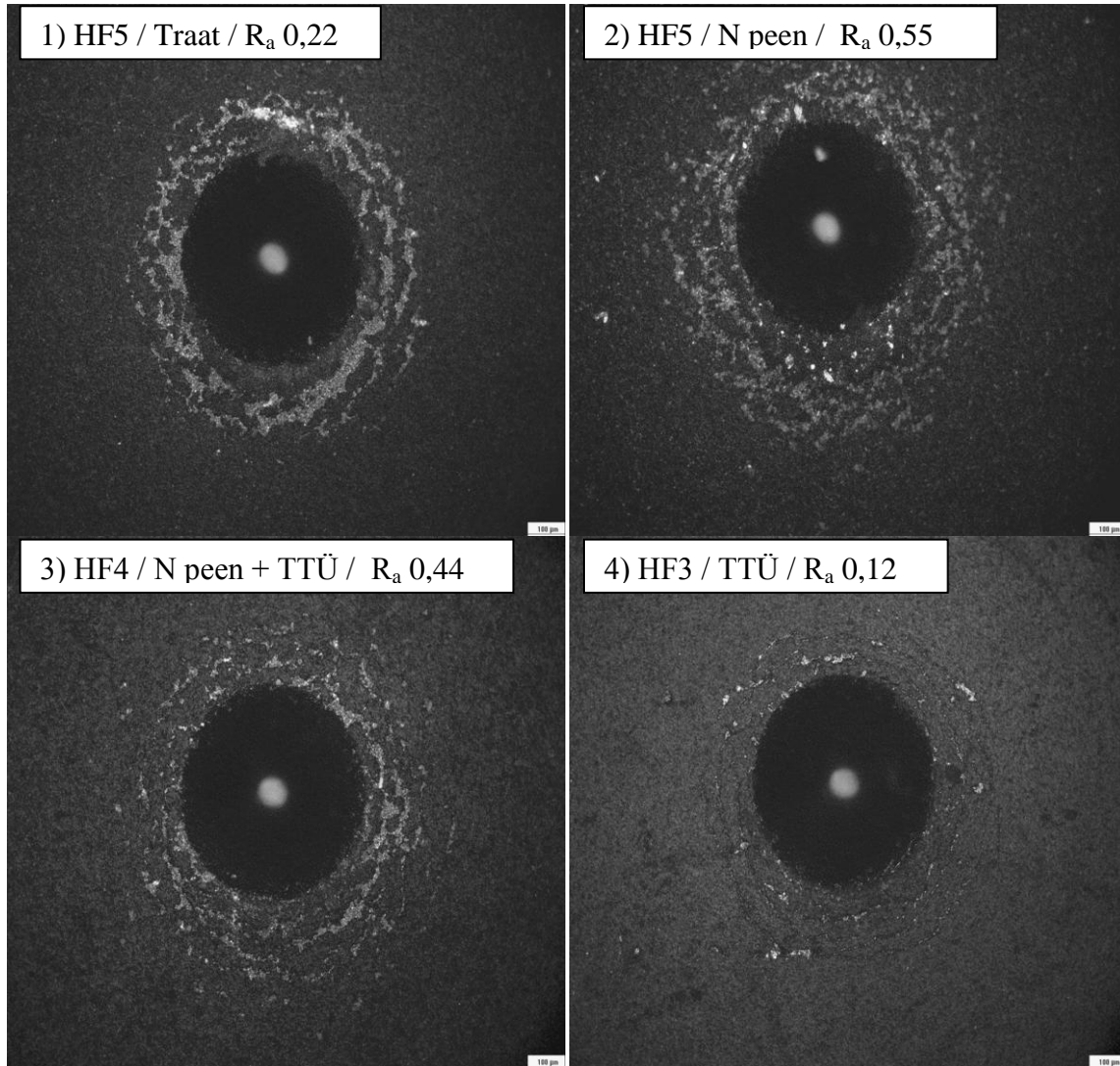
Katsekeha nr. 8 TTÜ töödeldud pind on puhas, kuid 1 minutiline töötlus ei eemalda traadist tulenevat kihti. Norma töötlus eemaldab traadikihi kõikidelt pindadelt, kuid jätab pinnale SiC osakesed. Selet 3.3 on näha kuidas pinnakareduse tõttu erineb katsekeha nr. 18 (R_a 0,9) traadilõikuspind katsekehade nr. 7 (R_a 0,22) ja 8 (R_a 0,18) pinnast. Katsekeha nr. 18 puhul ei piisa TTÜ 3 minutilisest töötlustest, et traadist tulenevat kihti eemaldada, kuna SEM uuringu ajal oli näha Cu ja Zn pinnakihi. Suure tõenäosusega on katsekehal paksem traadi kahjustatud kiht, mis ei ole eemaldatud 3 minutilise TTÜ abrasiivtöötlustega.



Sele 3.3 SEM fotod katsekeha nr. 18 töödeldud pindadest 1) traadilõikus 2) Norma peentöötlus 3) Norma peen + TTÜ töötlus (3 minutit) 4) TTÜ töötlus (3 minutit) ; suurendusel 2000x

3.4 Adhesioon

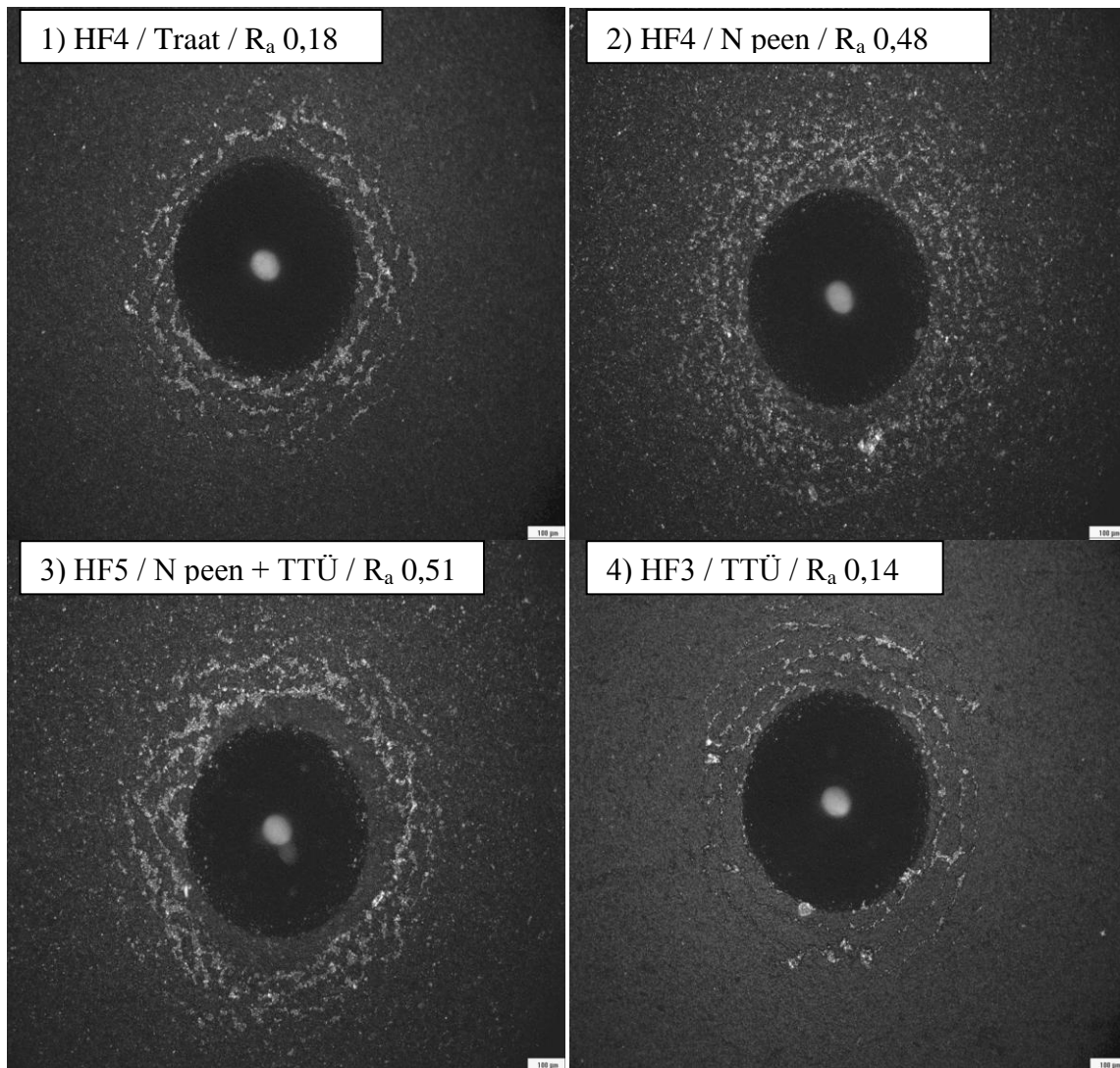
Järgnevalt on toodud katsekehade nr. 7, 8 ja 18 adhesioonitesti tulemused.



Sele 3.4 Katsekeha nr. 7 adhesiooni mõõtetulemused 1) traadilõikus pind 2) Norma peentöötlus pind (3 minutit) 3) Norma peen + TTÜ töötlus pind (3 minutit) 4) TTÜ töötlus pind (3 minutit); suurendusel 200x

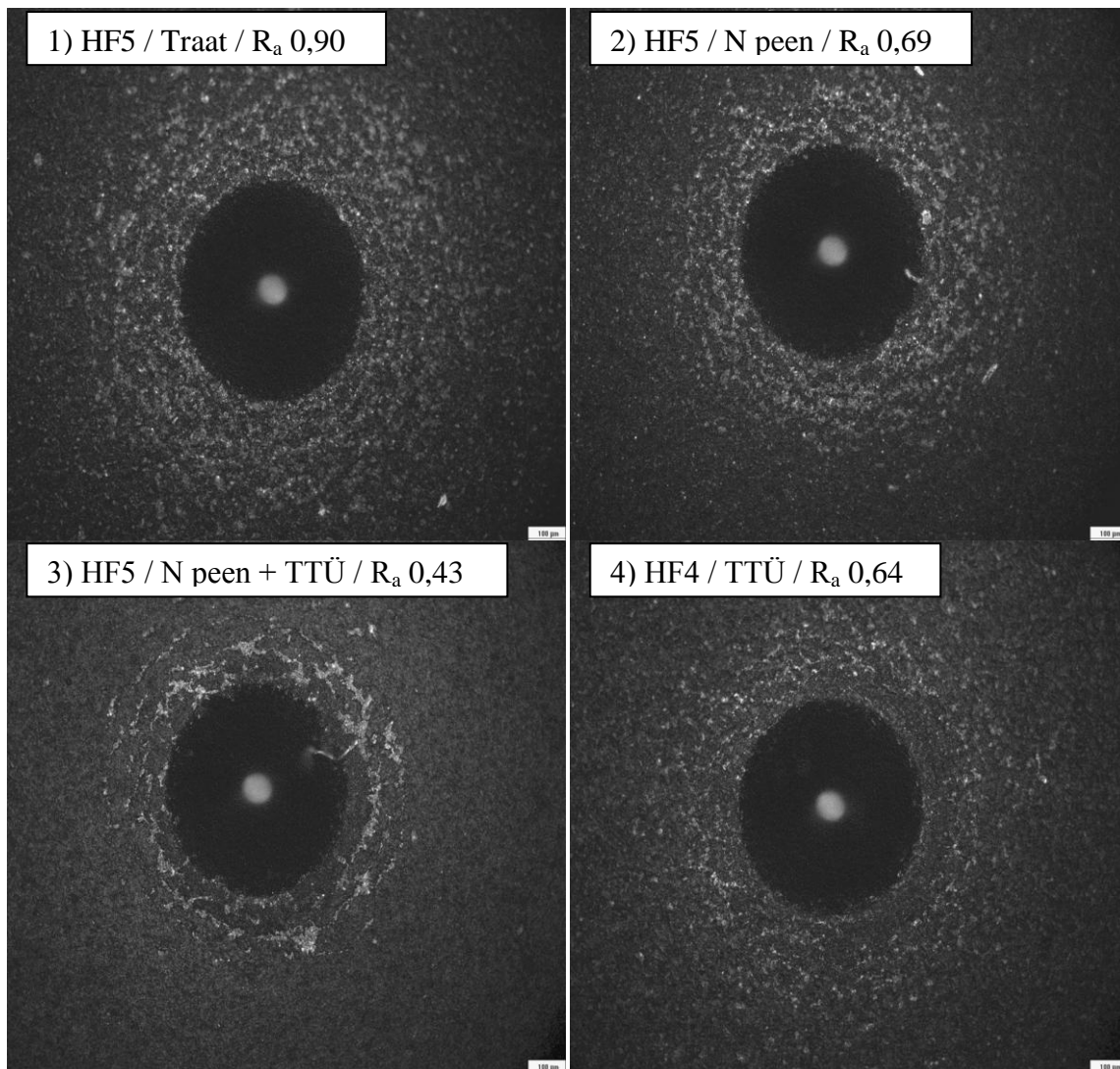
Pinde adhesioon aluspinnale on katsekehade nr. 7 ja 8 puhul suhteliselt sarnane. On teada, et Norma peen + TTÜ töödeldud pind on katsekehal nr. 8 karedam, kui katsekehal nr. 7. See kareduse erinevus mõjutab ka adhesiooniklassi. Kõige parem adhesioon on TTÜs töödeldud pindadel, kuna need on ka kõige väiksema pinnakaredusega. Traadilõikus pindadel, mille

pinnakaredus on ka väike katsekehade nr. 7 ja 8 puhul, kuid pinde adhesioon on halb, seega mikroabrasiivtöötlus peale traaterosioonlõikust on vajalik.



Sele 3.5 Katsekeha nr. 8 adhesiooni mõõtetulemused 1) traadilõikus pind 2) Norma peentöötlus pind 3) Norma peen + TTÜ töötlus pind (1 minut) 4) TTÜ töötlus (1 minut); suurendusel 200x

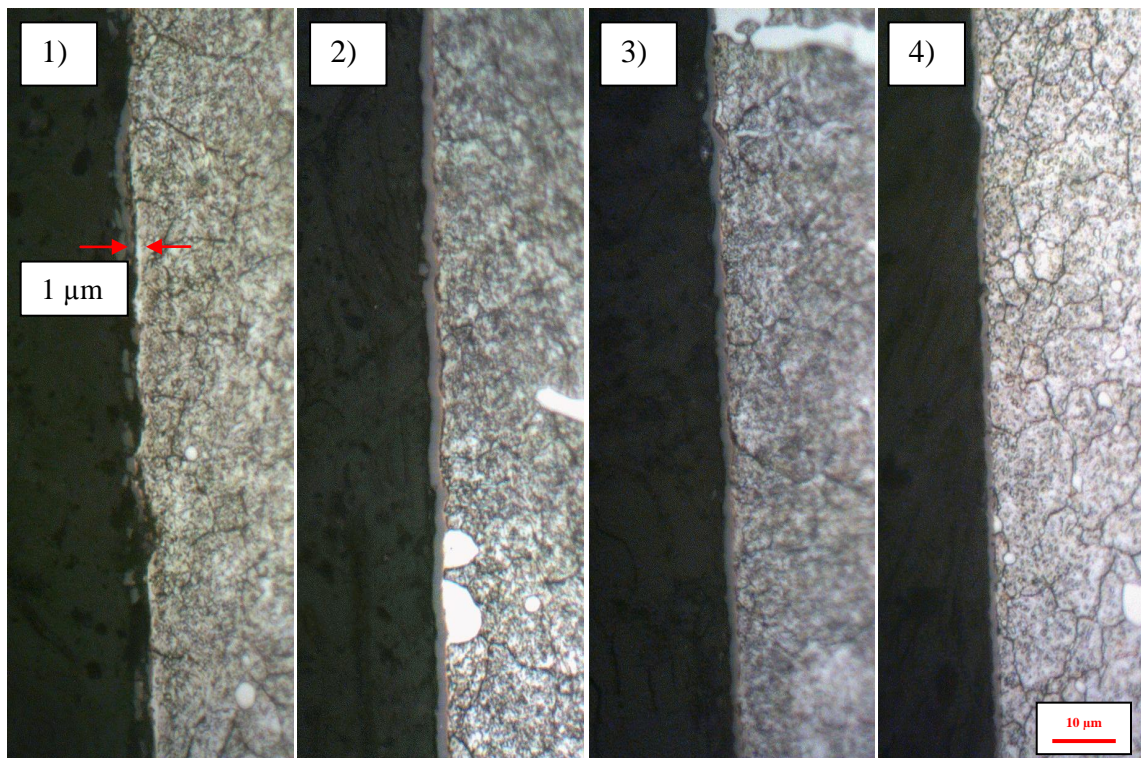
Katsekeha nr. 18 puhul on märgata, et suurema pinnakareduse puhul käitub pinne adhesioonitesti korral erinevalt (sele 3.6). Traadilõikus ja Norma peentöödeldud pinnalt, mis on mõlemad suure karedusega, on näha kuidas pinde delamineerumine toimub hoopis teistmoodi, kui Norma peen + TTÜ töödeldud pinnalt, mille karedus on märgatavalt väiksem. Võib eeldada, et mida suurem on pinnakaredus või PVD pinde all eksisteerib traadist kahjustatud kiht, seda kehvem on pinde adhesioon aluspinnale.



Sele 3.6 Katsekeha nr. 18 adhesiooni mõõtetulemused 1) traadilõikus pind 2) Norma peentöötlus pind (3 minutit) 3) Norma peen + TTÜ töötlus pind (3 minutit) 4) TTÜ töötlus (3 minutit); suurendusel 200x

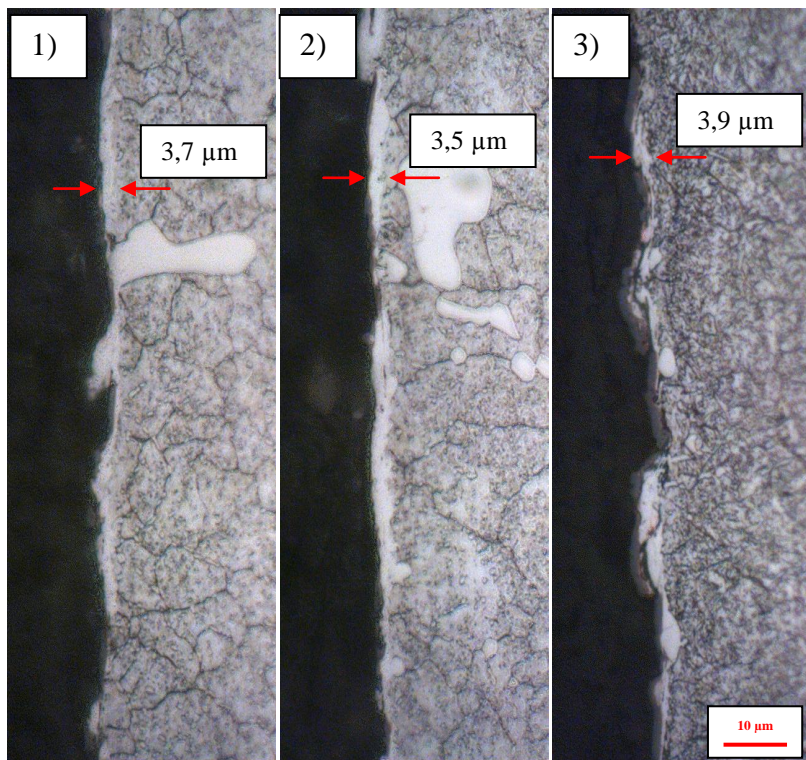
3.5 Traaterosioonlõikusest kahjustatud pinna uurimine

Traaterosioonlõikusest kahjustatud pinna olemasolu uuriti mikrolihvis kõikidel katsekehadel. Agie Progress pingis 4 lõikega lõigatud katsekehadel võib täheldada 1 - 2 μm paksust kahjustatud kihti; 5, 6 ja 7 lõikega lõigatud katsekehadel antud meetodiga ei tuvastatud kahjustatud pinnakihti (sele 3.7). Kõik järgnevad abrasiivtötlused eemaldavad traaterosioonist kahjustatud kihi.



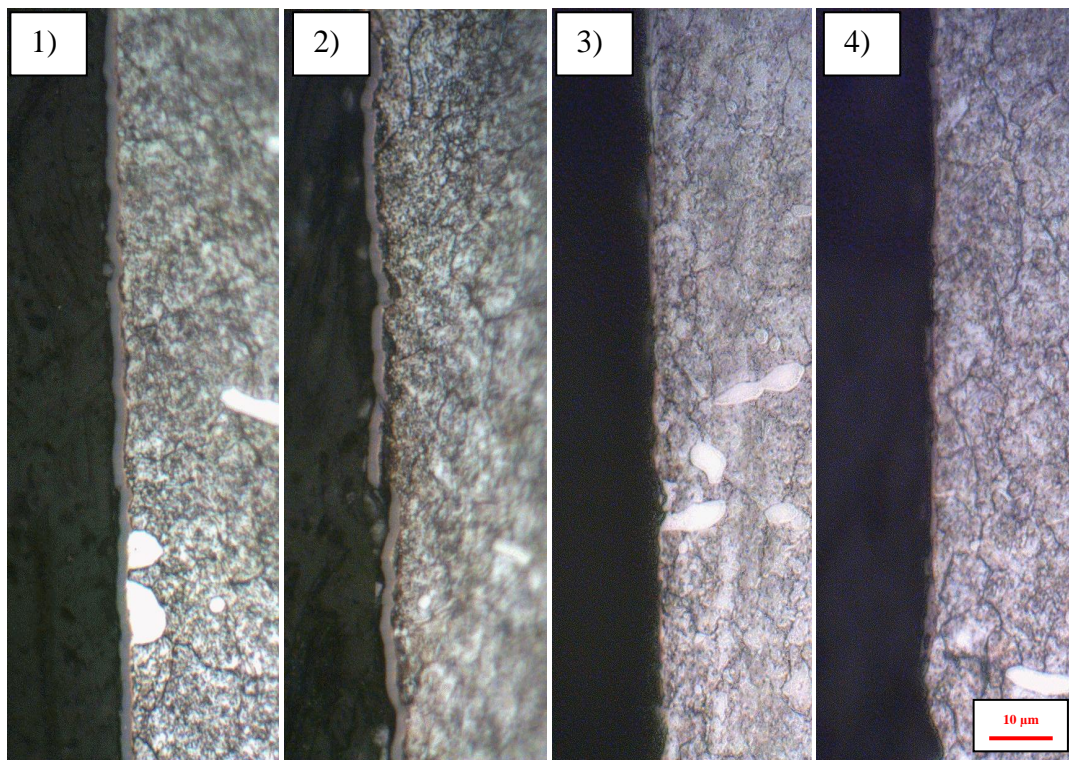
Sele 3.7 Tüüpnäited traaterosioonlõikuse pindadest 1) 4 lõikuse 2) 5 lõikuse 3) 6 lõikuse 4) 7 lõikuse puhul; suurendusel 1000x

Sodick AQ 350 ja Sodick AQ 750 traaterosioonpinkides valmistatud katsekehad seevastu omavad peale lõikust kahjustatud pinnakihti (sele 3.8), mille järgnevad tötlused suudavad eemaldada (v.a. Sodick AQ750 TTÜ F500 abrasiiviga tötlus ei ole piisav), kuid enamikul juhtudel jätavad pinna liiga karedaks.



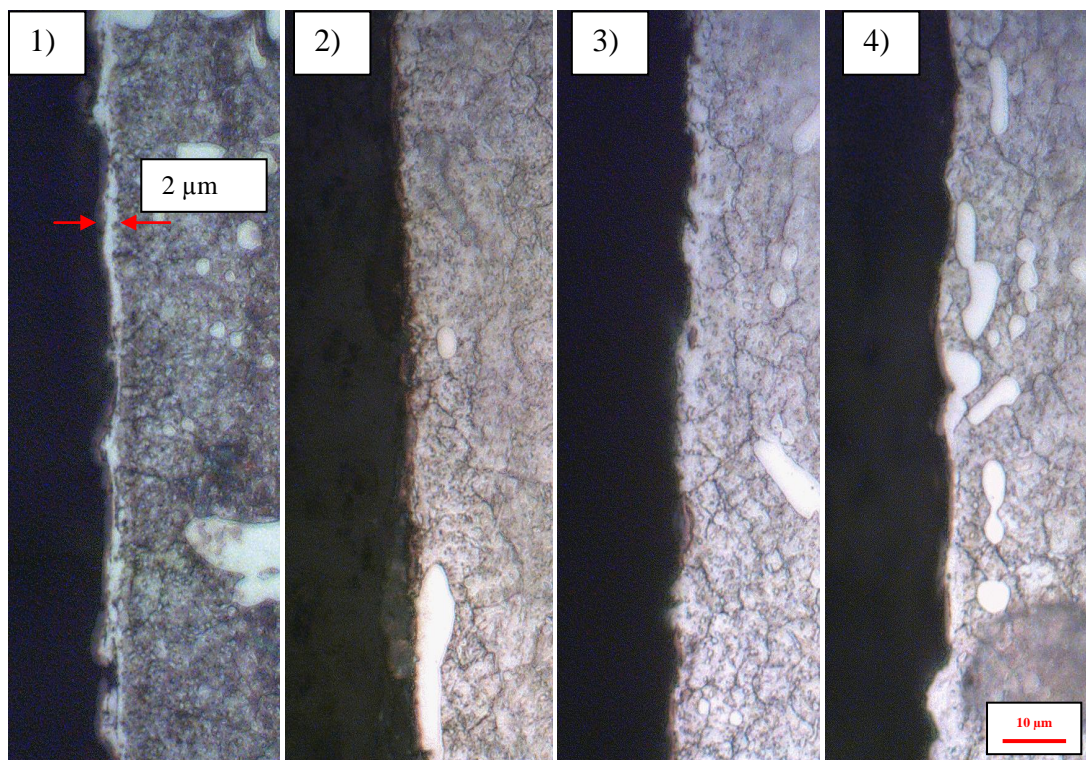
Sele 3.8 Sodick pinkide traaterosioonlõikuse pinnad 1) AQ750 4 lõikega 2) AQ750 5 lõikega 3) AQ350 4 lõikega; suurendusel 1000x

Selelt 3.9 - 1 on näha, et katsekehal nr. 7, mis on valmistatud Agie Progress traaterosioonpingis 5 lõikega, traadilõikus pinnal traaterosioonist kahjustatud kihti ei tuvasta. Katsekeha nr. 18 (valmistatud 4 lõikega Sodick AQ750 traaterosioonpingis) traadipinnalt on 2 μm paksust kahjustatud kihti näha. Järgnevad Norma töötused suudavad kahjustatud kihi eemaldada. TTÜ töötus kahjustatud kihti täielikult ei eemalda (sele 3.10).



Sele 3.9 Katsekeha nr. 7 pinnad peale traaterosioonlõikust ja mikroabrasiivtöötusi 1) traadilõikus pind 2) Norma peentöötlus 3) Norma peen + TTÜ töötlus (3 minutit) 4) TTÜ töötlus (3 minutit); suurendusel 1000x

Tabelis 3.3 on toodud traaterosioonlõikusest kahjustatud kihi olemasolu ja selle ligikaudne paksus kõikide katsekehade traadilõikuse pinna puhul. Katsekehad nr. 16 ja 20, mis on lõigatud Sodicki AQ750 ja AQ350 pinkides Brass (katteta) traadiga, omavad palju paksemat kahjustatud kihti (3,7 ja 3,9 µm), millest võib järeldada, et kattega traatide kasutamine õigustab end.



Sele 3.10 Katsekeha nr. 18 pinnad peale traaterosioonlõikust ja mikroabrasiivtötlusi 1) traadilõikus pind 2) Norma peentöötlus 3) Norma peen + TTÜ töötlus (3 minutit) 4) TTÜ töötlus (3 minutit); suurendusel 1000x

Tabel 3.3 Traaterosioonlõikusest tekkinud kahjustatud kihi olemasolu ja kihi ligikaudne paksus

Katsekeha nr.	Kahjustatud kihi olemasolu	Kihi ligikaudne paksus (μm)	Katsekeha nr.	Kahjustatud kihi olemasolu	Kihi ligikaudne paksus (μm)
1	+	2	12	Ei tuvastatud	
2	+	1	13		
3	+	0,5	14		
4	+	2	15		
5	+	0,5	16	+	3,7
6	Ei tuvastatud		17	+	2
7			18	+	2
8			19	+	3,5
9			20	+	3,9
10			21	+	1
11			22	+	1,5

KOKKUVÕTE

Antud bakalaureuse töös valiti sobiv eeltöötlus traaterosioonlõikusel valmistatud silelõike stantsi templitele enne PVD pindamist tuginedes AS Norma poolt ette antud nõuetele. Keskenduti kolmele nõudele: pinnakaredus R_a kuni 0,4, pinde hea adhesioon ning traaterosioonlõikusest kahjustatud kihi puudumine. Ülesandeks oli ka leida optimaalseim traaterosioonlõikuse režiim.

Peale traaterosioonlõikust olid pinnakareduse poolest sobilikud Agie Progress pingis lõigatud 5, 6, 7 lõikega katsekehad. AS Normas tehtud mikroabrasiivtöötledused ei saavutanud ette antud pinnakaredust, samuti ei suutnud TTÜ abrasiivtöötlus Normas tehtud mikroabrasiiv töötledusi oluliselt parandada. Soovitud pinnakaredus saavutati töödeldes katsekehasid ainult TTÜ töötledusega v.a. Sodick AQ750 pingis lõigatud katsekehadel. SEM uuringud näitasid EDM keemilise koostise korral traadilõikuspindadel ja TTÜ 1 minutilise töötleduse korral Cu ja Zn, millest võib järeldati, et traaterosioonlõikusel on traat sulanud metalli pinnale ning ei ole 1 minutilise töötledusega eemaldatud. Adhesioonitesti tulemused olid kõige paremad väiksema pinnakareduse puhul (R_a 0,15) TTÜ töödeldud pindadel. Traaterosioonlõikusest kahjustatud kiht tuvastati Agie Progress pingis 4 lõikega lõigatud katsekehadel ning kõikidel Sodick traaterosioonpinkides lõigatud katsekehadel. Kõik järgnevad töötledused suutsid kahjustatud kihi eemaldada, v.a. TTÜ töötledus, mis ei olnud Sodick pingis lõigatud katsekehadele piisav. Kuigi 5, 6 ja 7 lõikega lõigatud katsekehade puhul traaterosioonlõikusest kahjustatud kihti ei tuvastatud, oli traadilõikuspinna pinde adhesioon halb, seega mikroabrasiivtöötledust täielikult välistada ei saa.

Tulemustele tuginedes oleks edaspidi tööriistade valmistamisel AS Normal soovituslik kasutada Agie Progress traaterosioonlõikuspinki. Agie Progress traaterosioonpinkides lõigatud katsekehadele piisab ainult TTÜ mikroabrasiivtöötledusest. Kuna Sodick AQ750 ja AQ350 traaterosioonpinkides lõigatud katsekehade puhul ei ole TTÜ töötledus piisav, oleks soovitud pinnakareduse saavutamiseks otstarbekas vahetada välja Normas kasutatavad abrasiivid peenemate vastu, nt. Al_2O_3 (F240), keskmise osakese suurusega 45 μm .

Edasisteks uuringuteks võiks vaatluse alla võtta TTÜ mikroabrasiivtöötleduse ajalise mõju Agie Progress pingis lõigatud 4 lõikega katsekehade pinnale. Edasistes traaterosioonlõikusest

kahjustatud pinna uuringutes peaks lisaks „valge kihi“ olemasolule süvenema ka termomõjutsooni uuringutele.

SUMMARY

In the course of this thesis a suitable pre-treatment for wire EDM cut tools before PVD coating were selected. The main focus were concentrated on three demands: surface roughness Ra up to 0,4 microns, good coating adhesion and absence of white layer caused by wire EDM cut process. The assignment was also finding the most optimal wire EDM cut regime.

After wire EDM cut process, suitable samples according to surface roughness were cut with 5, 6 or 7 cuts. Micro abrasive blasting made in AS Norma did not achieve given surface roughness, also blasting made in TTÜ could not improve Norma blasted surfaces. Wanted surface roughness was reached only with TTÜ blasting except samples cut in Sodick AQ750. SEM study showed that chemical composition contains Cu and Zn on wire EDM cut surfaces and on TTÜ 1 minute micro abrasive blasted surfaces, in conclusion during the wire EDM cut process the wire melts on the surface and it is not removed with TTÜ 1 minute blasting. In case of low surface roughness in TTÜ blasted surfaces, the adhesion was the finest. The white layer was identified in Agie Progress 4 cut samples and in all samples prepared with Sodick. Therefore, all micro abrasive blasting operations were able to remove the white layer, except TTÜ blasting. Although, the white layer was no identified in samples prepared with 5, 6 and 7 cuts, the Rockwell coating adhesion was bad, thus, the micro abrasive blasting is necessary.

Results showed that hereafter AS Norma should use Agie Progress device during wire EDM cut process. TTÜ micro abrasive blasting is enough for samples cut with Agie Progress device. While TTÜ micro abrasive blasting is not enough for samples cut with Sodick AQ750 and AQ350, optimal choice would be exchanging Norma abrasives for thinner ones, for example Al₂O₃ (F240), with average grain size 45 µm.

For future research, the TTÜ micro abrasive blasting influence for samples cut with Agie Progress with 4 cuts should be investigated. Besides white layer investigations the focus should also be on investigating heat affected zone.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Lõikamise mõiste ja liigid
http://www.e-ope.ee/_download/euni_repository/file/1098/Loikamise_moiste_ja_liigid.pdf (03.03.2014)
2. Uddeholmi kataloog [WWW]
<http://uddeholm.ee/1684.htm> (03.03.2014)
3. Traaterosioonlõikuse tööpõhimõtte foto [WWW]
<http://www.kingedms.com/blog/index.php/2011/11/principle-of-wire-cut-edm/>
(03.03.2014)
4. Schmidt, Rolf-A. (2010). Properties of the edge zone of EDM treated tool steels. – *INFORMATION – the Feintool Group customer magazine*, 39, 6-7.
5. Weightman, C. Micro-Abrasive Blasting - Finishing Small Parts with Pinpoint Precision, 2006 [WWW]
<http://www.pfonline.com/articles/micro-abrasive-blasting> (15.03.2014)
6. Bouzakis K.-D. (2009). The Effect of Micro-Blasting Procedures on the Cutting Performance of Coated Tools. – *FME Transactions*, VOL. 37, No 2, 71-82. [E-ajakiri]
(http://www.mas.bg.ac.rs/istrazivanje/biblioteka/publikacije/Transactions_FME/VoluVo37/2/03_KDBouzakis.pdf) (10.04.2014)
7. Wood R.J.K. Introduction and basic of wear. – *Proceedings of the TWC wear course: 19th Oct 2010, Tampere, Finland*
8. Bunshah R. F, McGuire G. E., Rossnagel S. M., Handbook of Hard Coatings, USA 2001, Noyes Publications, 550 lk.
9. Bach F.-W., Laarmann A., Wenz T., Modern Surface Technology, Saksamaa 2006, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 325 lk.
10. Platit kodulehekülg [WWW]
platit.com (05.04.2014)
11. Edgar Hanseni õppematerjalid [WWW]
http://www.e-ope.ee/_download/euni_repository/file/1970/Tehniline%20mootmine.zip/pinnakaredup1.html (20.03.2014)
12. Pinnatekstuuri iseloomustavad parameetrid [WWW]
<http://www.zygo.com/?/met/applications/measuringsurfacefinish/> (08.04.2013)

13. Pinnatekstuuri iseloomustavad parameetrid [WWW]
http://www.bcmac.com/pdf_files/surface%20finish%20101.pdf (15.02.2014)
14. Kulu P., Hendre E., Mehaanikainseneri käsiraamat, Tallinn 2012, TTÜ kirjastus, 98 lk.
15. Pinnatekstuuri iseloomustav foto [WWW]
<http://www.finetubes.co.uk/uploads/images/Roughness%201.JPG> (15.02.1014)
16. Pinnatekstuuri iseloomustavad parameetrid[WWW]
http://lab.fs.uni-lj.si/lat/uploads/metrologija/o_hrapavosti_Mahr_publikacija.pdf
17. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture. (1998) DIN EN ISO 4288:1998
18. Verein Deutscher Ingenieure Normen, VDI 3198, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1991
19. M. Randrüüt, F. Sergejev, K. Sonk, A. Vragner. Nõuded ja vormistamise juhend bakalaureusetööle mehaanikateaduskonnas. Tallinn 2013

LISAD

Lisa 1

Traaterosioonis lõigatud katsekehad

Mõõtmed: 10.200x10.200x79.0

Materjal: 1.2379

Nr.	Katsekeha tähis	Pingi mark	Traadi mark	Lõigete arv	Teor. R _a (μm)	Lõikamise aeg (h)	Detaili paksus (mm)
1	AB4	Agie Progress	Brass	4	0,3	1,29	10,197
							10,197
							10,201
2	AZ4	Agie Progress	Gamma Z	4	0,3	1,16	10,204
							10,201
							10,204
3	ASD4	Agie Progress	Thermo SD	4	0,3	1,16	10,196
							10,201
							10,203
4	ASA4	Agie Progress	Thermo SA	4	0,3	1,16	10,200
							10,203
							10,206
5	ASE4	Agie Progress	Thermo SE	4	0,3	1,10	10,203
							10,202
							10,206
6	AB5	Agie Progress	Brass	5	0,2	1,58	10,198
							10,194
							10,198
7	AZ5	Agie Progress	Gamma Z	5	0,2	1,37	10,201
							10,203
							10,203
8	ASD5	Agie Progress	Thermo SD	5	0,2	1,40	10,196
							10,200
							10,201
9	ASA5	Agie Progress	Thermo SA	5	0,2	1,39	10,199
							10,198
							10,200
10	ASE5	Agie Progress	Thermo SE	5	0,2	1,26	10,202
							10,201
							10,202
11	ASD6	Agie Progress	Thermo SD	6	0,18	1,57	10,198
							10,199
							10,201
12	ASA6	Agie Progress	Thermo SA	6	0,18	1,57	10,196
							10,197
							10,199

Traaterosioonis lõigatud katsekehad

Mõõtmed: 10.200x10.200x79.0

Materjal: 1.2379

Nr.	Katsekeha tähis	Pingi mark	Traadi mark	Lõigete arv	Teor. R _a (μm)	Lõikamise aeg (h)	Detaili paksus (mm)
13	ASE6	Agie Progress	Thermo SE	6	0,18	1,52	10,201
							10,202
							10,203
14	ASD7	Agie Progress	Thermo SD	7	0,15	2,40	10,197
							10,196
							10,197
15	ASA7	Agie Progress	Thermo SA	7	0,15	2,25	10,196
							10,197
							10,199
16	S7B4	Sodick AQ750	Brass	4	0,65	1,03	10,202
							10,200
							10,200
17	S7M4	Sodick AQ750	Bedra Megacut Plus	4	0,65	1,03	10,200
							10,201
							10,201
18	S7Z4	Sodick AQ750	Gamma Z	4	0,65	1,03	10,203
							10,205
							10,208
19	S7Z5	Sodick AQ750	Gamma Z	5	0,32	1,58	10,207
							10,208
							10,208
20	S3B4	Sodick AQ325	Brass	4	0,32	1,29	10,198
							10,200
							10,202
21	S3M4	Sodick AQ325	Bedra Megacut Plus	4	0,32	1,18	10,196
							10,197
							10,200
22	S3Z4	Sodick AQ325	Gamma Z	4	0,32	1,15	10,203
							10,202
							10,201

Lisa 2 Katskehade R_a ja R_z piki ning risti peale traaterosioonlõikust

Nr.	Katse keha	Pingi mark	Traadi mark	Lõigete arv	R_a piki (μm)			R_z piki (μm)			R_a risti (μm)			R_z risti (μm)		
					Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max
1	AB4	Agie Progress	Brass	4	0,41	0,41	0,43	3,13	3,23	3,36	0,44	0,46	0,48	3,38	3,78	4,19
2	AZ4	Agie Progress	Gamma Z	4	0,42	0,44	0,46	3,00	3,22	3,36	0,45	0,46	0,47	3,21	3,53	3,84
3	ASD4	Agie Progress	Thermo SD	4	0,46	0,47	0,48	3,48	3,63	3,87	0,41	0,43	0,45	2,92	3,12	3,35
4	ASA4	Agie Progress	Thermo SA	4	0,45	0,47	0,49	3,15	3,42	3,72	0,46	0,47	0,49	3,22	3,66	4,15
5	ASE4	Agie Progress	Thermo SE	4	0,46	0,48	0,50	3,56	3,94	4,42	0,49	0,53	0,55	3,82	4,22	4,64
6	AB5	Agie Progress	Brass	5	0,18	0,18	0,18	1,42	1,62	1,83	0,18	0,19	0,20	1,56	1,95	2,46
7	AZ5	Agie Progress	Gamma Z	5	0,21	0,22	0,23	1,87	2,23	2,74	0,20	0,21	0,21	2,02	2,12	2,28
8	ASD5	Agie Progress	Thermo SD	5	0,15	0,18	0,23	1,43	2,10	3,40	0,18	0,18	0,18	1,57	1,88	2,26
9	ASA5	Agie Progress	Thermo SA	5	0,18	0,18	0,19	1,48	1,60	1,74	0,18	0,19	0,19	1,49	1,55	1,62
10	ASE5	Agie Progress	Thermo SE	5	0,20	0,22	0,23	1,90	2,19	2,41	0,24	0,25	0,25	2,24	2,34	2,53
11	ASD6	Agie Progress	Thermo SD	6	0,11	0,12	0,12	1,01	1,15	1,36	0,13	0,14	0,15	1,12	1,68	2,06
12	ASA6	Agie Progress	Thermo SA	6	0,11	0,12	0,13	0,94	1,31	1,71	0,13	0,14	0,14	1,19	1,47	1,80
13	ASE6	Agie Progress	Thermo SE	6	0,19	0,20	0,21	1,77	1,84	1,91	0,21	0,22	0,23	1,73	2,01	2,38
14	ASD7	Agie Progress	Thermo SD	7	0,09	0,09	0,09	0,76	0,81	0,85	0,10	0,10	0,11	0,93	1,03	1,22
15	ASA7	Agie Progress	Thermo SA	7	0,09	0,09	0,09	0,86	1,03	1,30	0,11	0,12	0,13	1,01	1,08	1,12
16	S7B4	Sodick AQ750	Brass	4	0,82	0,87	0,93	5,78	6,46	7,10	0,86	0,92	0,97	5,79	6,54	7,48
17	S7M4	Sodick AQ750	Bedra Megacut Plus	4	0,92	1,00	1,05	6,51	7,24	7,64	0,97	0,98	1,00	6,72	6,87	6,96
18	S7Z4	Sodick AQ750	Gamma Z	4	0,85	0,90	0,95	5,84	6,27	6,78	0,87	0,91	0,96	6,16	6,47	6,79
19	S7Z5	Sodick AQ750	Gamma Z	5	0,30	0,32	0,34	2,38	2,62	2,81	0,33	0,34	0,35	2,68	2,75	2,82
20	S3B4	Sodick AQ325	Brass	4	0,33	0,37	0,41	2,88	3,47	4,31	0,36	0,36	0,36	2,71	3,08	3,56
21	S3M4	Sodick AQ325	Bedra Megacut Plus	4	0,37	0,38	0,40	2,71	3,11	3,47	0,37	0,38	0,39	2,56	2,76	2,93
22	S3Z4	Sodick AQ325	Gamma Z	4	0,38	0,41	0,45	3,19	3,47	3,91	0,42	0,43	0,44	2,99	3,53	3,97

Lisa 3 Katskehade R_a ja R_z peale Norma mikroabrasiivtöötlust

Nr.	Katskeh a tähis	Pingi mark	Traadi mark	Lõigete arv	R _a jäme(μm)			R _z jäme (μm)			R _a jäme+peen (μm)			R _z jäme+peen (μm)			R _a peen (μm)			R _z peen (μm)		
					Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max
1	AB4	Agie Progress	Brass	4	0,81	0,84	0,87	7,12	7,48	7,62	0,59	0,62	0,64	4,36	4,70	5,07	0,49	0,54	0,57	4,02	4,28	4,68
2	AZ4	Agie Progress	Gamma Z	4	0,68	0,75	0,80	5,29	5,74	6,00	0,53	0,55	0,59	4,09	4,18	4,35	0,50	0,54	0,57	3,92	4,22	4,77
3	ASD4	Agie Progress	Thermo SD	4	0,70	0,75	0,80	5,36	6,98	7,88	0,54	0,54	0,54	4,19	4,46	4,94	0,51	0,52	0,54	3,73	4,09	4,46
4	ASA4	Agie Progress	Thermo SA	4	0,80	0,81	0,82	6,21	6,71	7,16	0,46	0,50	0,56	3,88	4,23	4,81	0,45	0,52	0,59	3,32	3,94	4,69
5	ASE4	Agie Progress	Thermo SE	4	0,76	0,82	0,86	5,75	6,72	7,39	0,49	0,53	0,59	3,93	4,19	4,54	0,50	0,55	0,60	4,14	4,40	4,65
6	AB5	Agie Progress	Brass	5	0,81	0,84	0,88	6,22	6,48	6,74	0,59	0,65	0,68	4,18	4,79	5,25	0,41	0,48	0,52	3,08	3,93	4,60
7	AZ5	Agie Progress	Gamma Z	5	0,80	0,82	0,84	5,79	6,47	6,88	0,54	0,56	0,58	4,22	4,43	4,75	0,51	0,54	0,58	4,28	4,51	4,64
8	ASD5	Agie Progress	Thermo SD	5	0,77	0,78	0,79	6,24	6,44	6,59	0,51	0,53	0,57	3,75	4,22	4,52	0,50	0,52	0,56	4,16	4,42	4,89
9	ASA5	Agie Progress	Thermo SA	5	0,66	0,70	0,75	5,88	6,50	7,59	0,51	0,52	0,53	3,66	4,03	4,22	0,47	0,52	0,57	3,83	4,34	4,72
10	ASE5	Agie Progress	Thermo SE	5	0,77	0,81	0,87	6,12	6,56	7,14	0,46	0,51	0,56	3,60	3,93	3,70	0,41	0,47	0,55	3,67	3,98	4,44
11	ASD6	Agie Progress	Thermo SD	6	0,77	0,78	0,79	5,83	6,35	6,77	0,46	0,55	0,64	3,67	4,20	4,78	0,48	0,52	0,58	3,79	4,21	4,89
12	ASA6	Agie Progress	Thermo SA	6	0,79	0,81	0,88	5,76	6,56	7,69	0,51	0,56	0,63	4,25	4,28	4,59	0,39	0,49	0,58	3,45	3,85	4,09
13	ASE6	Agie Progress	Thermo SE	6	0,81	0,83	0,85	6,79	6,67	6,55	0,48	0,51	0,53	3,79	4,28	4,53	0,49	0,51	0,53	3,79	4,14	4,67
14	ASD7	Agie Progress	Thermo SD	7	0,69	0,75	0,81	6,05	6,21	6,40	0,50	0,52	0,55	4,10	4,23	4,42	0,49	0,51	0,55	3,50	3,95	4,75
15	ASA7	Agie Progress	Thermo SA	7	0,82	0,85	0,87	6,88	7,47	8,50	0,51	0,52	0,54	3,73	3,90	4,04	0,45	0,47	0,48	3,69	3,87	3,97
16	S7B4	Sodick AQ750	Brass	4	0,84	0,85	0,86	6,55	6,85	7,04	0,63	0,65	0,66	4,60	4,95	5,16	0,65	0,69	0,76	5,38	5,59	5,70
17	S7M4	Sodick AQ750	Bedra Megacut Plus	4	0,84	0,87	0,89	5,77	6,58	7,54	0,60	0,62	0,64	4,58	4,78	5,06	0,56	0,58	0,59	4,51	4,90	5,28
18	S7Z4	Sodick AQ750	Gamma Z	4	0,76	0,80	0,83	5,87	6,56	7,21	0,60	0,63	0,67	4,22	4,58	5,12	0,52	0,54	0,56	4,18	4,42	4,77
19	S7Z5	Sodick AQ750	Gamma Z	5	0,82	0,84	0,86	6,39	6,91	7,47	0,49	0,56	0,62	3,65	4,35	4,70	0,49	0,56	0,62	3,58	4,40	4,98
20	S3B4	Sodick AQ325	Brass	4	0,78	0,81	0,87	5,84	6,28	6,70	0,49	0,54	0,61	3,89	4,27	4,56	0,48	0,58	0,65	4,06	4,70	5,22
21	S3M4	Sodick AQ325	Bedra Megacut Plus	4	0,77	0,82	0,89	5,86	6,48	7,06	0,55	0,58	0,62	4,32	4,40	4,50	0,53	0,56	0,58	4,58	4,90	5,12
22	S3Z4	Sodick AQ325	Gamma Z	4	0,88	0,91	0,93	5,88	6,81	7,47	0,62	0,63	0,64	4,72	4,83	4,89	0,62	0,66	0,74	4,86	5,17	5,58

Lisa 4 Katsekehade R_a ja R_z peale TTÜ mikroabrasiivtööstlust

Nr.	Katse-keha tähis	Pingi mark	Traadi mark	Lõigete arv	R _a jäme+TTÜ (µm)			R _z jäme+TTÜ (µm)			R _a jäme+peen+TTÜ (µm)			R _z jäme+peen+TTÜ (µm)			R _a peen+TTÜ (µm)			R _z peen+TTÜ (µm)			R _a TTÜ (µm)			R _z TTÜ (µm)					
					Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max	Min	Kesk.	Max
2	AZ4	Agie Progress	Gamma Z	4	0,69	0,75	0,82	5,36	5,84	6,19	0,47	0,50	0,54	3,46	3,61	3,70	0,48	0,50	0,52	3,67	3,92	4,27	0,30	0,30	0,31	2,31	2,42	2,53			
3	ASD4	Agie Progress	Thermo SD	4	0,79	0,80	0,81	6,35	6,41	6,51	0,49	0,49	0,50	3,43	3,54	3,72	0,44	0,47	0,49	3,17	3,72	4,15	0,33	0,34	0,36	2,49	3,00	3,43			
6	AB5	Agie Progress	Brass	5	0,71	0,78	0,88	5,37	5,89	6,90	0,48	0,55	0,64	3,39	4,25	5,23	0,45	0,49	0,51	3,62	3,86	4,00	0,11	0,13	0,14	1,18	1,62	1,97			
7	AZ5	Agie Progress	Gamma Z	5	1 min			2 min			3 min			1 min			2 min			3 min			1 min			2 min			3 min		
					0,72	0,74	0,78	5,97	6,10	6,26	0,43	0,46	0,49	3,33	3,39	3,49	0,40	0,44	0,48	3,27	3,67	4,04	0,13	0,14	0,14	1,24	1,46	1,59			
8	ASD5	Agie Progress	Thermo SD	5	0,79	0,83	0,86	6,11	6,38	6,89	0,56	0,59	0,65	4,18	4,52	5,14	0,48	0,51	0,57	3,66	4,06	4,49	0,13	0,14	0,14	1,31	1,40	1,52			
9	ASA5	Agie Progress	Thermo SA	5	0,65	0,69	0,71	5,65	5,76	5,85	0,45	0,52	0,55	3,48	4,31	5,43	0,43	0,49	0,53	3,33	3,68	3,93	0,11	0,12	0,13	1,04	1,19	1,36			
10	ASE5	Agie Progress	Thermo SE	5	0,65	0,67	0,69	4,58	4,93	5,17	0,45	0,47	0,52	3,31	3,52	3,70	0,45	0,47	0,49	3,41	3,55	3,78	0,13	0,14	0,15	1,14	1,35	1,60			
11	ASD6	Agie Progress	Thermo SD	6	0,73	0,74	0,75	5,59	5,94	6,36	0,45	0,46	0,47	3,33	3,52	3,69	0,42	0,45	0,47	3,50	3,92	4,21	0,08	0,09	0,10	0,99	1,42	1,77			
12	ASA6	Agie Progress	Thermo SA	6	0,81	0,82	0,83	5,84	6,17	6,41	0,50	0,53	0,57	3,99	4,36	4,90	0,36	0,44	0,51	3,08	3,46	3,89	0,08	0,08	0,08	0,70	0,84	1,04			
18	SZ74	Sodick AQ750	Gamma Z	4	1 min			2 min			3 min			1 min			2 min			3 min			1 min			2 min			3 min		
					0,72	0,78	0,84	5,41	6,09	6,29	0,45	0,48	0,49	3,41	3,49	3,62	0,39	0,43	0,47	3,14	3,19	3,30	0,65	0,67	0,72	4,37	5,22	5,74			
21	S3M4	Sodick AQ325	Bedra Megacut Plus	4	0,64	0,71	0,75	5,38	5,89	6,38	0,51	0,54	0,59	3,99	4,11	4,34	0,46	0,52	0,58	3,39	3,95	4,27	0,25	0,26	0,27	1,95	2,23	2,63			
22	S3Z4	Sodick AQ325	Gamma Z	4	0,80	0,83	0,87	6,41	6,65	6,78	0,49	0,54	0,61	3,67	4,26	4,56	0,51	0,56	0,58	3,83	4,34	4,67	0,28	0,32	0,34	2,52	3,37	3,98			

Lisa 5 EDS meetodil mõõdetud keemiline koostis katsekeha nr. 8 traadilõikuspinnalt

