



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

RAUD-KROOM SIDEAINEGA KERMISTE KULUMISE UURIMINE

INVESTIGATING WEAR OF CERMETS WITH IRON- CHROMIUM BINDER

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Andres-Hardi Ormus
/nimi/

Üliõpilaskood: 211625MATM

Juhendaja: Marek Tarraste, teadur, labori
juhataja
/nimi, amet/

Juhendaja: Märt Kolnes, teadur
/nimi, amet/

Tallinn 2024

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“20” mai 2024

Autor: Andres-Hardi Ormus

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“20” mai 2024

Juhendaja: Marek Tarraste

/ allkiri /

Juhendaja: Märt Kolnes

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees: Martin Eerme

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Andres-Hardi Ormus (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Raud-kroom sideainega kermiste kulumise uurimine,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendajad on Marek Tarraste ja Märt Kolnes,
(*juhendajate nimed*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

"20" mai 2024 (kuupäev)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Andres-Hardi Ormus, 211625MATM (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: MATM02/22, Tootearendus ja (kood ja nimetus)
tootmistehnika
Juhendaja(d): teadur, labori juhataja, Marek Tarraste, (amet, nimi, telefon)
6203356;
teadur, Märt Kolnes, 6203361 (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Raud-kroom sideainega kermiste kulumise uurimine

(inglise keeles) Investigating wear of cermets with iron-chromium binder

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Uurida raud-kroom sideainega kermiste kulumist

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse ülevaade.	01.03.24
2.	Katsekehade hoidja projekteerimine ja katsetamine.	01.04.24
3.	Katsekehade valmistamine ja kulumiskatsete läbiviimine.	01.04.24
4.	Katseandmete analüüs.	01.05.24
5.	Kirjaliku osa valmimine.	13.05.24

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "20" mai 2024a

Üliõpilane: Andres-Hardi Ormus "20" mai 2024a
/allkiri/

Juhendaja: Marek Tarraste ".....".....2024a
/allkiri/

Juhendaja: Märt Kolnes ".....".....2024a
/allkiri/

Programmijuht: Martin Eerme ".....".....2024a
/allkiri/

SISUKORD

EESSÕNA	7
1. SISSEJUHATUS.....	8
2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10
2.1 Kermiste tutvustus.....	10
2.2 Kermiste mehaanilised omadused	12
2.3 Kermiste valmistamisprotsess	14
2.3.1 Pulbrite valik	15
2.3.2 Pulbrite valmistamine	16
2.3.3 Pressimine	18
2.3.4 Presstoorikute järeltöötlus.....	20
2.3.5 Keskkonna- ja terviseohutus.....	20
2.3.6 Paagutamine	21
2.3.7 Mikrostruktuurid ja nende teke	22
2.4 Kermiste kulumine ja kulutamiskatsete tüübid.....	24
2.4.1 Kulumise mehhanismid	24
2.4.2 Erosioonkulutamine	26
2.4.3 Löökkulutamine	29
3. EKSPERIMENTAALNE OSA	31
3.1 Katsekehade valmistamine.....	31
3.1.1 Pulbrite valmistamine	31
3.1.2 Katsekehade pressimine	32
3.1.3 Presstoorikute paagutamine	33
3.1.4 Toimingud väiksemate katsekehadega	34
3.1.5 Kõvaduse määramine	35
3.2 Kulutamiskatsed	35
3.2.1 Katsetatavate materjalide valik	35
3.2.2 Katsekehade ettevalmistus.....	36
3.2.3 Erosioonkulutamise katsete läbiviimine	37
3.2.4 Löökkulutamise katsete läbiviimine	38
3.3 Mikrostruktuuri ja katsetulemuste analüüs	40
3.3.1 Metoodika	40
3.3.2 Mikrostruktuuri analüüs	40
3.3.3 Erosioonkulumise analüüs	45
3.3.4 Kulumismehhanismi uurimine	53
3.3.5 Löökkulumise analüüs.....	59
3.4 Järeldused	62

4.	KATSEKEHADE HOIDJA PROJEKTEERIMINE	64
4.1	Probleemi kirjeldus ja aktuaalsus	64
4.2	Rakise projekteerimine	65
4.3	Rakise katsetamine	69
4.4	Labori juhataja hinnang rakisele	70
	KOKKUVÕTE	71
	SUMMARY	73
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	75
	LISAD	76

EESSÕNA

Antud magistritöö teema pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli teadur ja Pulbermetallurgia Labori juhataja Marek Tarraste koostöös teaduriga Märt Kolnes, et saada põhjalikumaid teadmisi raud-kroom sideainega kermiste kulumise kohta. Samuti projekteeritakse ja valmistatakse antud töö raames pulbermetallurgiliste katsekehade hoidja, mida on võimalik kasutada magnetplaadiga tasalihvpinkides, et tõsta katsekehade lihvimise protsessi efektiivsust ja turvalisust ning tagada katsekehade pindade paralleelsus. Antud töös projekteeritakse katsekehade hoidja lihvimismasina FSM 480 (Knuth) näitel. Töö viiakse läbi Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanika ja tööstustehnika instituudi Pulbermetallurgia Laboris, Triboloogia Laboris ning Mehaanika ja Metroloogia Katselaboris.

Autor soovib suurimat tänu avaldada oma töö juhendajatele Marek Tarrastele ja Märt Kolnesele, kes nõustasid autorit kõikides töö etappides. Lisaks soovib autor tänada Tallinna Tehnikaülikooli Materjalide Taaskasutuse Teadus- ja Katselaboratooriumi vanemteadurit Dmitri Goljandinit, kes viis läbi löökkulutamiskatsed ning Vadim Kokurinit, kes valmistas katsekehade hoidja.

Võtmesõnad: kõvasulam, kermis, raud-kroom sideaine, erosioonkulumine, magistritöö.

1. SISSEJUHATUS

Antud magistritöö eesmärgiks on uurida raud-kroom sideainega kermiste kulumist. Alaeesmärkideks on anda lühiülevaade kermiste valmistamise protsessist, valmistada raud-kroom sideainega materjalid, valmistada nendest materjalidest katsekehad, viia katsekehadele läbi kahte erinevat tüüpi kulutamiskatsed ning hinnata nende tulemusi ja projekteerida pulbermetallurgiliste katsekehade hoidja, mida saab kasutada magnetplaadiga tasalihvpinkides. Antud töös projekteeritakse katsekehade hoidja lihvimismasina FSM 480 (Knuth) näitel. Töö teostamise vajadus tuleneb asjaolust, et kermistes kasutatavad volfram ja koobalt on haruldased metallid, need on kallid, nende saadavus on piiratud ning nende kaevandamist ja rafineerimist ei peeta keskkonnasõbralikuks. Mõlemad metallid on Euroopa kriitilise tähtsusega toorainete nimekirjas (CRM) [1] ehk nad on Euroopa majanduse jaoks ülimalt olulised ja neil on suur tarnerisk. Lisaks on koobalt klassifitseeritud kantserogeeniks [2]. Teadaolevalt on koobalt asendatav raud-kroomiga ning õigete valmistamisparameetrite korral on sellistel kermistel kõrged mehaanilised omadused ning teatud kasutusvaldkondades on nad võrreldavad koobalt sideainega kermistega [3]. Siiski on raud-kroom sideainega kermiste kulumist uuritud vaid vähesel määral. Katsekehade hoidja projekteerimine ja valmistamine on vajalik, sest siia maani on katsekehade ettevalmistav lihvimine toimunud Tallinna Tehnikaülikooli Pulbermetallurgia Laboris käsitsi. Spetsiaalse hoidja loomine tõstab protsessi efektiivsust, sest korraga on võimalik töödelda mitut katsekeha, turvalisust, sest operaator ei pea väikesemõõdulisi katsekehi enam käsitsi kinni hoidma ning tagab katsekehade pindade paralleelsuse. Katsekehade hoidja valmistatakse terasest, et see oleks kinnitav lihvimismasina magnetplaadi külge ning projekteerimisel lähtutakse mitmetest nõuetest, sealhulgas valmistamismeetodist (freesimine) ning sellest, et hoidja oleks valmistatav Tallinna Tehnikaülikooli siseselt.

Töö on jagatud kolmeks suuremaks osaks:

- 1) Kirjanduse ülevaade sisaldab kermiste lühitutvustust, nende valmistamise protsessi, mehaanilisi omadusi ning kahte kulutamiskatse tüüpi: erosioon- ja löökkulutamist;
- 2) Eksperimentaalses osas kirjeldatakse antud töö raames loodud raud-kroom sideainega kermiste valmistamisprotsessi, kulutamiskatsete läbiviimist, katsekehade mikrostruktuuri, katsetulemuste analüüsi ning tehtud järeldusi;
- 3) Viimases peatükis käsitletakse katsekehade hoidja projekteerimist magnetplaadiga tasalihvpingile manuaalse lihvimismasina FSM 480 (Knuth) näitel. Välja tuuakse hoidjale seatud nõuded, projekteerimise põhimõtted ja labori juhataja hinnang.

Sõltuvalt liigitamisest võidakse mõista kõvasulamite (*hardmetals*) all ainult volframkarbiidi baasil loodud komposiitmaterjale ning kermiste (*cermets*) all ainult neid komposiitmaterjale, mis on loodud titaankarbiidi või -nitriidi baasil. Lihtsuse huvides nimetatakse antud töös kõik uuritavad komposiidid kermisteks.

2. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

See peatükk sisaldab kermiste lühitutvustust. Antakse ülevaade kermiste valmistamise protsessist, nende mehaanilistest omadustest ning kahest kulutamiskatse tüübist: erosioon- ja löökkulutamisest.

2.1 Kermiste tutvustus

Kermised on vedelfaasis paagutatud komposiitmaterjalid, mis koosnevad vähemalt ühest kõvast kulumiskindlast faasist (üldjuhul volframkarbiid – WC) ja plastsest pehmemast metallifaasist (rauagrupi metallid, üldjuhul koobalt ja selle sulamid – Co). Sideaine ülesanne on liita kõva faasi osakesed kokku ja tagada kermise plastsus ning sitkus ning sellesse lahustuvad ja sadestuvad kõva faasi osakesed. Enimkasutatav sideaine WC baasil kermistes on koobalt ning kõrgendatud korrosioonikindluse nõude korral kasutatakse ka niklit ja selle sulameid. Viimaste kümnendite jooksul on suurenenud huvi alternatiivsete sideainete vastu nende potentsiaalselt paremate omaduste ja tavapäraste sideainete negatiivsete tervise- ja keskkonnamõjude tõttu. Levinuimaks ja kõige rohkem uuritud alternatiiviks on raud-koobalt-nikkel sideaine, millel on võrdväärseid või paremaid omadused koobalt sideainega kermistest [4].

Kermiste ajalugu algab 1923. aastast, mil esitati esimene patent Karl Schröteri poolt. Esimesteks kermistoodeteks olid traattõmbamise stantsid, millele järgnesid lõiketerad. Tänapäeval võib kermiseid pidada tootmise alustalaks, olles kasutusel näiteks metalsete ja mittemetalsete materjalide lõiketöötlemisel, laastuvabas materjalitöötluses (traattõmbamine, sepistamine, kõrgsurvepressimine), kaevandustööstuses, erinevates otsikutes (abrasiivjugatöötlus, vesilõikus), naastrehvide naastude valmistamisel, teehöövliterades ja stantsides. Kermised on kasutusel pea kõikides valdkondades, kus on nõutud kõrge kulumiskindlus, sitkus ja tugevus. Suurem läbimurre saavutati 1970. aastatel, mil keemiline ja hiljem füüsikaline aursadestuspindamine võimaldasid luua kõvasid õhukesi pindeid (TiN, TiC, Al₂O₃), mis tõstsid veelgi produktiivsust erinevates valdkondades, eriti töötlevas tööstuses [4].

Kermiste omadusi on võimalik muuta suhteliselt laias ulatuses, varieerides terasuurst (vähem kui mikromeeter kuni kümned mikromeetrid) ja sideainesisaldust (2-30 massiprotsenti). Kermise tugevus on määratud keraamilise ja metallifaasi omadustega ning karbiid-karbiid ja karbiid-sideaine sidemetega. Karbiidfaasi tugevus sõltub terasuurst, keemilisest koostisest ja stöhiomeetriast. Enamikel juhtudel on kasutusel puhas WC-Co, kuid segule lisatakse sõltuvalt vajadusest ka erinevaid lisandeid. Näiteks on teraste lõiketöötlemisel kasutatavatele WC-Co kermistele juba 1930. aastatest alates lisatud kuupvõrega siirdemetallide karbiide (TiC, TaC, NbC).

Nende metallide lisamisel volframkarbiidile moodustub tardlahus. Saadud materjalil on suurem roome-, oksüdatsiooni- ja kulumiskindlus, mis tõstab omakorda töötlusoperatsioonide produktiivsust, sest tööriist peab vastu kõrgematele temperatuuridele ilma katastroofilise lohkkulumiseta. Mikrostruktuuri ja materjali omaduste parendamiseks lisatakse tihitipeale segule Mo, V või Cr, mis pidurdavad terakasvu. Tööriistade eluiga on veelgi võimalik pikendada, kasutades keemilist või füüsikalist aursadestuspindamist [4].

Koobalti sideainena eelistamine on tingitud mitmetest asjaoludest: sellel on volframkarbiidiga hea märgumine ning temperatuurist sõltuv lahustuvus, mis soodustab paakumist ja tagab väga hea tugevuse ja plastsuse. Kui nõutud on happekindlus, kasutatakse tihti kermistes sideainena niklit ning selle kasutamise korral saab materjali tugevust tõsta legerides, kasutades tardlahustugevdamist või dispersioonkõvendamist. Rauapõhiseid sideaineid on uuritud, kuid siamaani on neil olnud suhteliselt kitsad kasutusvaldkonnad, näiteks puidutööstus. Raud-sideaine kasutamise korral on täheldatud koobaltiga võrreldes kõrgemat vastupanu oksüdeerumisele, mida saab veelgi tõsta, legerides sideainet kroomi või molübdeeniga. Raud-sideainega kermistel on võrreldes koobalt-sideainega sama kõvaduse juures ka kõrgem purunemissitkus juhul, kui terakasvu pidurdamiseks on kasutatud VC või Cr_3C_2 [4], [5].

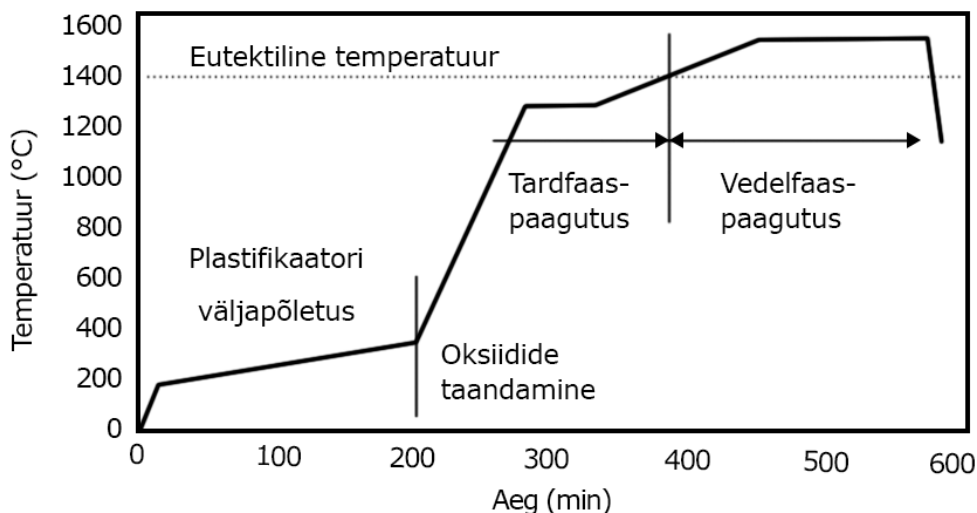
Tüüpiliseks terasuuruseks on 1-2 mikromeetrit. Viimaste aastakümnete tendents on olnud terasuuruse vähendamine, mis on avaldanud positiivset mõju kermiste omadustele. Submikroonse terasuuruse peamiseks eelisteks on suur kõvadus, kõrge tugevus, surve- ja servatugevus ning parem kulumiskindlus. Kermiste terasuuruse klassid on välja toodud tabelis 2.1 [4].

Tabel 2.1. Kermiste terasuuruse klassid [4]

Terasuurus, μm	Tähis
<0,2	Nano
0,2-0,5	Ultrapeen
0,5-0,8	Submikroonne
0,8-1,3	Peen
1,3-2,5	Keskmine
2,5-6,0	Jäme
>6,0	Väga jäme

Terakasv kõvas kulumiskindlas materjalis toimub kermiste valmistamisel paagutamise ajal, tavaliseks temperatuurivahemikuks on 1400-1500 °C. Enamlevinud terakasvu pidurdavad ühendid on tantaal-, kroom- ja vanaadiumkarbiidid ning neid kasutatakse nii eraldi kui ka erinevates kombinatsioonides, et muuta submikroonsete kermiste mikrostruktuuri ja omadusi. WC-Co tavapärane paagutamistsüklil on välja toodud joonisel 2.1. Paagutamine toimub elektriküttega ahjus vaakum- või

kaitsegaasikeskkonnas. Levinuimaks kaitsegaasiks on argoon. Kaitsvad keskkonnad võimaldavad saada parema kvaliteediga kermiseid, vähendades poorsust ja parendades materjalide ühtlust [4].



Joonis 2.1. Kermiste tavapärane paagutamistsükkel [4]

2.2 Kermiste mehaanilised omadused

Kermiste mehaanilisi omadusi mõõdetakse tavaliselt toatemperatuuril ning saadud tulemuste põhjal on võimalik materjale omavahel võrrelda. Mõõtmiste puhul on kahte tüüpi katseid: mittepurustavad ja purustavad. Mittepurustavate katsete käigus mõõdetakse materjali elastset ja plastset deformatsiooni. Kuigi katsekeha võib nende katsete käigus jäädavalt deformeeruda ja praguneda, ei toimu siiski katsekeha purunemist mitmeks tükiks. Purustavate katsete puhul toimub katsekeha purunemine kaheks või enamaks tükiks [4]. Järgnevalt on lühidalt välja toodud kermiste mehaanilised omadused.

Kõvadus: materjali võime vastu panna lokaalsele plastsele deformatsioonile. Kermiste puhul kasutatakse kõvaduse mõõtmiseks enamjaolt Vickersi või Rockwelli meetodit. WC-Co kermiste tüüpiline kõvadus on Vickersi skaalas vahemikus 700...2200 [4].

Vickersi meetodi korral surutakse indentor (teemantpüramiid tahkudevahelise nurgaga 136°) jõuga vahemikus 4,9...980 N uuritava materjali sisse. Koormuse kestus on tavaliselt 10-15 sekundit. Kermiste puhul on enamlevinud skaalaks HV30, mis tähendab 294 N suurust jõudu, mida avaldab 30 kilogrammine raskus. Kõvaduse arvutamine toimub vastavalt valemile 2.1 [6], [7].

$$HV = \frac{F}{A} \approx 1,8544 \frac{F}{d^2}, \quad (2.1)$$

kus HV – Vickersi kõvadus kgf mm^{-2} ,
 F – jõud N,
 A – jälje pindala mm^2 ,
 α – püramiidi tahkudevaheline nurk 136° ,
 d – jälje diagonaal mm.

Kulumiskindlus: defineeritud kui aktsepteeritava tööriista eluea saavutamine enne selle välja vahetamise vajaduse tekkimist. Võib pidada kermiste kõige keerulisemaks omaduseks, millel pole siiani standardset mõõtmismetoodikat. Vaatamata arvukatele teoreetilistele ja praktilistele katsetele ja uurimustele, ei ole tööriistade kulumiskindluse olemus siiani päriselt selge, sest seda mõjutavad väga mitmed faktorid (adhesioon, abrasioon, difusioon, oksüdeerumine jne) väga erinevate osakaaludega ning peamise mõjuteguri kindlaks määramine on raskendatud [4].

Survetugevus: kermiste tüüpiline survetugevus on $4\text{--}8 \text{ kN mm}^{-2}$, mis teeb nendest ühed tugevaimaid teadaolevad materjalid [4].

Paindetugevus: väiksem survetugevusest – $2,4 \text{ kN mm}^{-2}$, mõõdetakse tavaliselt paindekatsuga. On leitud, et materjalide pinna seisukorral on tugev mõju katsetulemustele (kulunud/kraabitud pind vs sile pind). Valmistamisviis omab samuti olulist rolli, kõrgeimad paindetugevused on saavutatavad, kasutades kuumisostaatvormimist [4].

Sitkus: materjali võime taluda deformeerimist ilma purunemiseta. Kermiste kontekstis tähendab suurem sitkus paremat vastupanu löökkoormusele, kildumisele, purunemisele ja vibratsioonile. Kermiste tüüpilised purunemissitkuse väärtused jäävad vahemikku $7\text{--}25 \text{ MPa m}^{-0,5}$. Võrdluseks võib siin tuua välja keraamika sitkuse, mis jääb tavaliselt vahemikku $2\text{--}8 \text{ MPa m}^{-0,5}$. Mõõtmine toimub, kasutades Vickersi meetodit, kuid saadud tulemus ei pruugi kajastada materjali käitumist reaalses olukorras, kus mõjuvad lisaks teised faktorid (temperatuur, pingeseisund, deformatsioonikiirus) [4].

Temperatuuritaluvus: kermistel on üldiselt hea temperatuuritaluvus. Väga kõrgetel temperatuuridel hakkab tugevus stabiilselt langema. Kuni ligi -200°C püsivad kermiste omadused heal tasemel, kõvadus tõuseb ligikaudu $20\text{--}30\%$ purunemissitkuse samaaegse langusega [4].

Lööktugevus: vähe uuritud ning puudub standardne test, on seoses tugevuse ja purunemissitkusega [4].

Abrasiooni- ja erosioonikindlus: väga abrasiivsetes ja erodeerivates keskkondades on kermised tänapäevani kõige vastupidavamad materjalid tänu unikaalsele kombinatsioonile tugevusest, kõvadusest ja purunemissitkusest [4].

Jäikus: kermised on teemanti järgselt jäikuse poolest kõikide materjalide seas teisel kohal. Kermiste Youngi moodul on võrreldes terastega keskmiselt kolmekordne ja võrreldes alumiiniumiga keskmiselt kuuekordne [4].

Tihedus: kõrgema WC sisaldusega kermiste tihedus võib ulatuda kuni 15000 kg m^{-3} ning madala WC ja kõrge sideaine (tavaliselt Co või kuupkarbiid- ja karbonitriidlisandid) sisalduse korral on võimalik tiheduseks saada minimaalselt $4000\text{-}5000 \text{ kg m}^{-3}$ [4].

Hõõrdetegur: kermistel on suhteliselt madal hõõrdetegur. Kermis-teras (kuiv) paari hõõrdetegur on 0,2. Võrdluseks teras-teras (kuiv) paari hõõrdetegur on 0,4 ning teras-grafiit (kuiv) paari hõõrdetegur on 0,1 [4], [8].

Serva stabiilsus ja teravus: tänu peeneteralisele mikrostruktuurile ja kõrgele tugevusele on võimalik valmistada väga teravaid ja hästi püsivaid servasid [4].

Korrosioonikindlus: mittehappelistes keskkondades on kermised väga korrosioonikindlad. Koobalt-sideainega kermised on aga ka nõrgalt happelistes keskkondades üsna vastuvõtlikud lahustumisele. Korrosioonikindlust saab tõsta, kasutades sideainena niklit [4].

Magnetilised omadused: sõltuvalt sideainest ja selle sisalduse protsendist võivad kermised olla vähesel määral ferromagnetilised ($5\text{-}30 \text{ kA m}^{-1}$). Nikkel-sideainega kermistel magnetilisus puudub [4].

2.3 Kermiste valmistamisprotsess

Pulbrite töötlemine presstoorikute valmistamiseks ja nende paagutamiseks on ülioluline osa kermiste valmistamise protsessist. Antud alapeatükis on kirjeldatud kermiste valmistamise protsessi etapid, alustades pulbrite jahvatamisega ning lõpetades paagutamisega.

2.3.1 Pulbrite valik

Pulbrite valik on kriitilise tähtsusega osa kermiste valmistamise protsessis. See määrab ära, milline on lõpptootte kvaliteet, hinnaklass ja järeltöötlemise vajadus. Pulbriosakeste suurus ja kvaliteet koos sideaine valikuga on määrava tähtsusega sobilike parameetrite saavutamiseks lõpptootes. Presstoorikute koospüsimiseks ja käsitlemise lihtsustamiseks lisatakse pulbrisegule tavaliselt parafiini või muid plastifikaatoreid [4].

Pulbrikomponentide kvaliteedi määrab nende keemiline koostis, osakeste suurus ja kuju ning pinnakeemia, mis omakorda sõltuvad toormaterjalist ja tootmisviisist. Toormaterjalide keemilise koostise põhjal arvutatakse segu kompositsioon ja süsinikisisaldus. Osakeste suuruse põhjal valitakse jahvatamise parameetrid (veskid, keskkond), mis määravad hiljem presstooriku koospüsivuse ja paagutamiskarakteristikud. Süsinikisisaldus peab kermistes olema täpselt paigas – liigne süsinikisisaldus tingib vabade süsinikuosakeste olemasolu lõpp-produktis, liigne süsiniku väljapõlemine suurendab aga poorsust ja haprust. Süsiniku väljapõlemine toimub paagutamise käigus, sest kuigi protsess toimub kaitsegaasi- või vaakumkeskkonnas, sisaldab presstoorik vähesel määral hapnikku, mis süsinikuga reageerib ning moodustab CO või CO₂. Presstooriku hapnikusisaldus sõltub tavaliselt pulbriosakeste suurusest: mida peenema pulbriga on tegemist, seda rohkem on presstoorikul pindala, mille külge hapnikumolekulid saavad kinnituda. Väljapõlemist on vajalik kompenseerida, üheks võimaluseks on lisada paagutamiskambris süsinikupulbrit [4], [9].

Pulbriosakeste esialgne suurus määrab, kas pulbrite täiendav jahvatamine on otstarbekas, kasutades olemasolevaid masinaid. Väga pikk jahvatusaeg ei ole soovitatav, sest jahvatamise efektiivsus langeb ajas võrdlemisi kiiresti ning pulbriosakesed võivad hakata omavahel uuesti ühinema. Submikroonsete osakestega pulbreid ei ole üldjuhul otstarbekas täiendavalt jahvatada ning kui seda tehakse, on protsess kordades ajakulukam [4].

Plastifikaatori ja teiste lisandite valik on oluliseks aspektiks pulbrite valmistamisel. Tüüpilisteks plastifikaatoriteks on näiteks vaha, polüetüleenglükool ja parafiin. Presstoorikute pulbritele lisatakse plastifikaatorit, et pulber oleks vormitav ning toorikud hoiaksid oma kuju, et neid oleks võimalik enne paagutamist käsitleda. Samuti on neil oluline roll, et presstoorik ja hiljem lõpptootde saavutaksid õige tiheduse. Valiku tegemisel tuleb arvestada plastifikaatori sulamis- ja keemistemperatuuriga, kindlustamaks, et need ained paagutamise ajal välja põlevad [4].

Pulbrite jahvatamine toimub üldjuhul vedelas keskkonnas ehk veskisse lisatakse jahvatamise ajaks lahustit. Vedelas keskkonnas jahvatamine muudab pulbrite peenestamise ja segunemise protsessi oluliselt efektiivsemaks. Lisaks takistab lahusti

pulbri oksüdeerumist jahvatamise käigus. Üldiselt kasutatakse mitte vee baasil lahusteid, vastasel juhul on vaja lisada oksüdatsiooni piiravaid aineid. Lisaks lahustile lisatakse veskisse ka jahvatuskuulid, mis kiirendavad pulbriosakeste peenestamist ja segunemist läbi purustamise ja hõõrdumise. Kuna kuulid kuluvad jahvatustsükli vältel, on oluline arvestada nende keemilise koostisega, et see ei avaldaks mõju pulbri koostisele [4].

2.3.2 Pulbrite valmistamine

Pulbrite ja segu koostise valikul on vaja juhendada soovitud kermise lõpptoote koostisest ja jahvatusprotsessi tüübist. Kui pulbrid on valitud ja mõõdetud, lisatakse need koos jahvatuskuulide, lahusti, plastifikaatori ja vajadusel muude lisanditega koos veskisse. Veskit käitatakse teatud aja ning vajadusel saab vahepeal protsessi peatada, et kontrollida segu omadusi. Kui segu on valmis, eemaldatakse see veskist ning kuivatatakse. Jahvatamise eesmärgiks on pulbri peenestamine ja segunemine sellisele tasemele, et sellest oleks hiljem võimalik valmistada presstoorigid ja need omakorda paagutada. Segu ühtlus on kriitilise tähtsusega ning see tagab kermiste valmistamise protsessi stabiilsuse ja korratavuse. Ebaühtlane segu võib põhjustada erinevaid defekte – poorsust, sideaine koondumist, kõrge kontsentratsiooniga sama materjali alasid jm. Plastifikaatori ebaühtlasel segunemisel võivad paagutamise ajal materjali sisse tekkida tühimikud. Pulbrite jahvatamiseks on erinevaid meetodeid, kuid levinumad nendest on kuuljahvatus ja attriitorjahvatus [4].

Kuuljahvatuse korral kasutatakse horisontaalset silindrilist veskit, mille pöörlemine ümber horisontaaltelje põhjustab pulbrite segunemist. Pulbriosakeste peenestamine toimub jahvatuskuulide abil: pöörlemise käigus liiguvad kuulid mööda seina ülespoole ning kukuvad seejärel alla, purustades nii pulbriosakesi, mis jäävad kuulide vahele. Pulbrite segunemist ja peenestamist on võimalik kontrollida, muutes kuulide suurust ja veski pöörlemissagedust [10]. Liiga madal pöörlemissagedus pikendab jahvatusprotsessi, liiga kõrge sageduse korral aga takistab tsentrifugaaljõud kuulide kukkumist, vähendades seeläbi protsessi efektiivsust. Jahvatusprotsessi mõjutavad osaliselt ka kuulide ja segu suhe ning segu viskoossus. Kui pulbri suhe jahvatuskuulidesse on liiga madal, muutub jahvatusprotsess ebaefektiivseks ja jahvatusaeg pikeneb. Seega on oluline neid parameetreid optimeerida vastavalt jahvatatavale pulbrile. Kuna jahvatuskuulid ja veski kuluvad protsessi käigus, on aeg-ajalt vajalik uurida nende kulumise taset ning neid vajadusel parandada või välja vahetada [4].

Peamised probleemid, mis jahvatamisprotsessi käigus võivad esineda, on pulbri koostise vähesel määral muutumine veski ja kuulide kulumise tõttu, pulbri hapnikuga

rikastumine pulbriosakeste suurenenud pindala tõttu, pulbri saastumine puuduliku laborihügieeni tõttu. Kuna veski ja kuulid kuluvad jahvatusprotsessi käigus, kasutatakse tihtipeale samast või sarnasest materjalist kuule ja veskit, nagu parasjagu jahvatatakse. Alternatiivsel juhul peaks pulbri keemilise koostise muutus olema piisavalt väike, et see ei mõjutaks hiljem materjali omadusi. Pulbrite peenestamisel on osakeste hapnikuga rikastumine tihtipeale möödapääsmatu. Selle vähendamiseks viiakse jahvatusprotsess enamjaolt läbi vedelas keskkonnas, kasutades lahustit. Pärast jahvatusprotsessi on oluline veski ja kuulide põhjalik puhastamine, eriti siis, kui ühes ja samas veskis jahvatatakse erineva koostisega pulbreid. Puudulik puhastamine põhjustab pulbrite saastumist ja vähendab valmistamisprotsessi korratavust [4].

Jahvatamisprotsessi tulemusel saadakse vedel pulbrisegu, millel on kermise valmistamiseks vajalik pulbriosakeste suurus ja piisav segunemine. Segu on vaja enne presstoorikute valmistamist kuivatada. Kuivatamisprotsess ei tohi muuta pulbri mehaanilisi omadusi ja ühtlust, vältida tuleb pulbrite saastumist ning minimeerida hapnikuga rikastumist. Samal ajal peab protsess olema võimalikult odav, kiire ning vähese jäägitekkega. Kuivatamisprotsessi valik sõltub pulbrite keemilisest koostisest, lisatud ainetest ja presstooriku valmistamise viisist. Kui kuivatamine ei toimu vahetult pärast jahvatamist, on oluline, et vedelat pulbrisegu ei hoiustataks staatiliselt, sest selle komponendid on erineva tihedusega ning ajapikku toimub settimine. Üheteljelise pressimise korral peavad pulbrid olema hea voolavuse ja kindla puistetihedusega, et tagada pressimisprotsessi ja presstoorikute kvaliteedi stabiilsus. Külmisostaatpressimise korral peab olema tagatud materjalide ühtlus, aga nõuded voolavusele on leebemad [4].

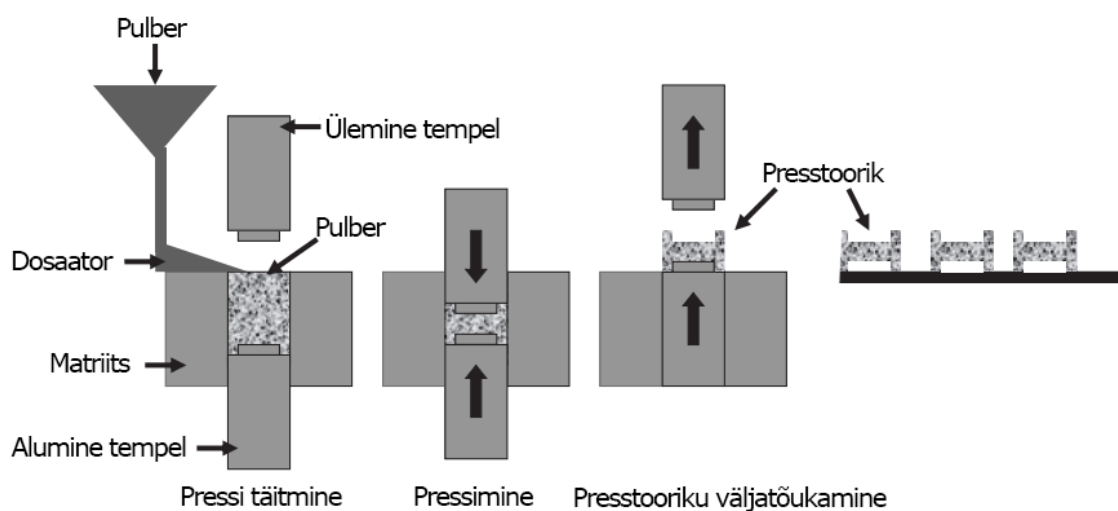
Levinumad kuivatusmeetodid on pihustuskuivatus ja vaakumkuivatus. Pihustuskuivatuse protsess on pidev, suhteliselt suure läbilaskevõimega ja kuivatatud pulbrite kvaliteet on väga stabiilne. Selle protsessi puudusteks on aga vajadus suhteliselt suure alginvesteeringu järele ja samuti vajadus infrastruktuuriks, mis võimaldab suurt vedela pulbrisega pealevoolu. Vaakumkuivatus on sisuliselt pihustuskuivatuse vastand – tegemist on tehnoloogiaga, mis sobib väikeseeriatootmisesse, sest seadmete hinnad on võrdlemisi madalad ning läbilaskevõime on samuti väiksem. Vaakumkuivatuse puuduseks on asjaolu, et pulbrid nõuavad enne pressimist täiendavat töötlemist. Kuivatamise ajal toimub pidev pulbri segamine, et vältida pulbri settimist ja tagada ühtlane kuivamine. Vaakumkuivati kasutamisel tuleb arvestada vaakumkambri ja labade kulumisega, kuna kermiste pulbrid on suhteliselt abrasiivsed. Üldiselt on vaakumkuivatatud pulbrite osakesed pihustuskuivatatud pulbrite osakestest vähem sümmeetrilised ja seetõttu on nendel ka halvem voolavus, mida on aga võimalik parandada, kasutades erinevaid granuleerimisprotsesse [4].

2.3.3 Pressimine

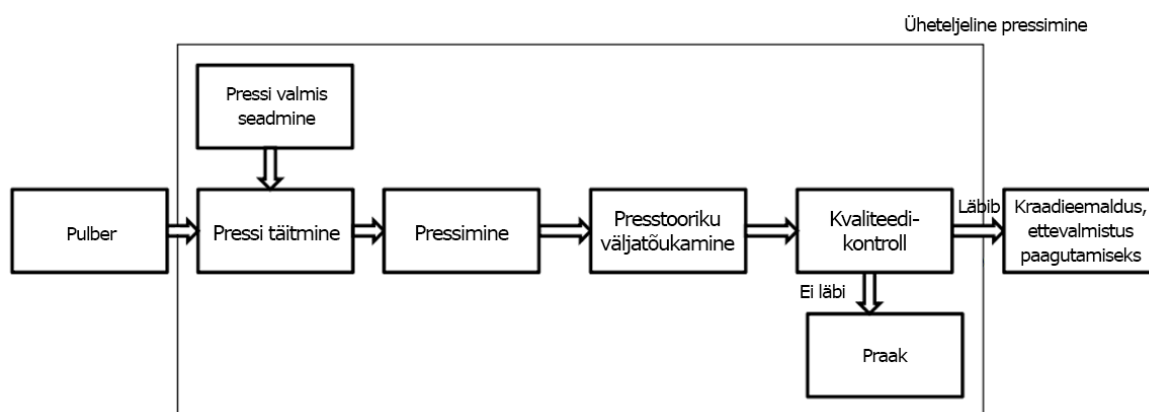
Järgmiseks sammuks kermiste valmistamise protsessis, pärast pulbrite kuivatamist, on presstoorikute valmistamine, mida saab hiljem paagutada. Kõige rohkem levinud pressimisprotsessid on üheteljeline pressimine, külmisostaatpressimine, ekstrusioon ja pulbersurvevalu. Pressimise eesmärgiks on anda presstoorikule survejõu abil vajalik kuju. Presstoorikute valmistamisel on vaja arvestada nii pulbri voolavuse, paakumisomaduste kui ka lõpptoote soovitud metallurgiliste omaduste ja mõõtmetega. Tähtsamateks metallurgilisteks omadusteks on antud juhul kermise tihedus, magnetiline saturatsioon ja sundjõud, mikrostruktuur ja kõvadus. Neil omadustel on tihe seos plastifikaatori, paagutamisprotsessi ja -ahjuga. Plastifikaator mõjutab pulbrite teralisust ja voolavust, mis omakorda muudavad paagutatud materjali tihedust ja kaalu. Presstoorikud peavad olema piisavalt tugevad, et neid oleks võimalik enne paagutamist käsitleda ilma kahjustumiseta. Presstoorikute tugevusel on olemas ka ülemine piir, nimelt peab vajadusel saama lihtsasti eemaldada pressimise käigus tekkinud kraati. Presstoorikute tugevuse moodustavad seega kokkuvõtvalt presstooriku tihedus, plastifikaator, pressimise surve ja presstooriku geomeetria. Üldiselt eemaldub plastifikaator paagutamise alguses, see on oluline õige süsinikutaseme tagamiseks ahjus. Liigne süsinikusisaldus tõstab magnetilist saturatsiooni ja jätab paagutatud toorikusse liigset süsinikku. Kui pulber on enne paagutamist puutunud pikalt kokku õhu või niiskusega, võivad selle osakesed oksüdeeruda, mis võib omakorda vähendada magnetilist saturatsiooni või soosida η -faasi. η -faas on kaksikkarbiid volframi ja sideaine metalli baasil, nt $(W,Fe)_6C$, mille tekkimine enamasti halvendab mehaanilisi omadusi. Pärast plastifikaatori väljapõlemist, tooriku edasisel kuumutamisel, hakkab metalne sideaine sulama, mis põhjustab tooriku kahanemist: mõõtmetelt 15-20%, mahult 35-50%. Kahanemine on vajalik, et toorik saavutaks oma ettenähtud tiheduse ja koos sellega soovitud omadused. Lõpptoote mõõtmed määravad ära nii presstooriku kuju kui ka kahanemisfaktor. Neid parameetreid kontrollides on võimalik lõpptoote mõõtmeid määrata 1% täpsusega [4].

Üheteljeline pressimine on tänu protsessi lihtsusele ja skaleeritavusele suhteliselt levinud meetod pulbermetallurgiliste presstoorikute valmistamiseks. Üheteljelise pressimisoperatsiooni illustratsioon on välja toodud joonisel 2.2 ja pressimise voodiagramm joonisel 2.3. Esimese sammuna seatakse valmis pressi matriits, ülemine ja alumine tempel ning lisatakse vajalik kogus pulbrit. Pulbri lisamiseks on tavaliselt kasutusel dosaator. Järgnevalt toimub templite kokkusurumine, tüüpiline survevahemik on 30-200 MPa. Pärast pressimist eemaldub ülemine tempel ja alumine tempel lükkab presstooriku matriitsi seest välja. Templite geomeetria on määrava tähtsusega õigete

mõõtmete ja kaaluga presstoorikute saamisel ning pärast paagutamist õige tiheduse ja mõõtmete saavutamisel. Templite ja matriitside põhiosa on tavaliselt valmistatud terasest ning pulbriga kokkupuutuvate pindade jaoks on eraldi vahetatavad karbiidist sisetükid, et tagada tööriistade pikem eluiga. Kui lõpptootes peab olema läbiv ava, kasutatakse selle moodustamiseks tavaliselt südamikuga pressvorme. Pressimise puhul on oluline, et matriitsi ja templi asend oleks väga täpselt paigas, sest nendevahelised tolerantsid on suhteliselt väikesed ning vale asendi korral ei pruugita saavutada ühtlast presstooriku tihedust või võib halvemal juhul toimuda pressi või matriitsi purunemine või kildumine. Nende probleemide vältimiseks viiakse läbi pressimistsükli peenhäälestamine, mis hõlmab nii asendi kui pressimise kiiruse paika panemist erinevate pressimistsükli etappide ajal [4].



Joonis 2.2. Üheteljeline pressimine [4]



Joonis 2.3. Üheteljelise pressimise voodiagramm [4]

Pressimistsükkel jaguneb kolmeks etapiks:

- 1) pulbriosakesed liiguvad paika;

- 2) pulbriosakesed purustatakse ja deformeeritakse;
- 3) pulbriosakesed tihendatakse läbi jätkuva pressimise ja deaeratsiooni.

Pressvormi seinte läheduses ja pulbriosakeste vahel on pressimise ajal peamiseks deformatsiooni tüübiks nihkumine, templite pinna läheduses aga tihendamine survejõu abil. Kuna presstoorigu kokkusurumisel deformeerub see teatud ulatuses elastselt ning seetõttu paisub vormist eemaldamisel, on oluline pressimistsükli parameeter ka toorigu vormist väljatõukamise kiirus ja surve. Presstoorigu tihedus on tavaliselt 20-30% kuni 40-60% lõpptoote tihedusest [4].

Pulbri voolavus ja puistetihedus on mõlemad määrava tähtsusega toorigu õige kaalu ja mõõtmete saavutamisel. Halb voolavus tähendab tavaliselt pikemat pressimise aega ja ebaühtlast kvaliteeditaset. Materjali puistetihedusest sõltub pressvormi kuju: liiga madal tihedus nõuab kõrgemat pressimisjõudu; liiga kõrge tihedus aga ei pruugi võimaldada pulbriosakeste piisavat nihet nende kokkusurumise ajal. Madal pressimisjõud mõjutab omakorda negatiivselt presstoorigute tihedust ja mõõtmeid ning kõrge pressimisjõud põhjustab tavaliselt pressvormi kiirendatud kulumist, liigset elastset järelmõju toorigu eemaldamisel vormist ja toorigu pragunemist. Arvjuhitud presspingid võimaldavad elastsest järelmõjust tingitud defekte vähendada tänu väga täpselt kontrollitud liikumisele [4].

Pressimisjõud mõjutab oluliselt presstoorigute kvaliteeti. Jõu kasvades vähenevad poorsus ja toorigu kahanemine paagutamise ajal. Jõu vähenedes hakkab kasvama toorigu poorsus. Seega on oluline leida sobiv pressimisjõud, mille valimisel lähtutakse tavaliselt vormi geomeetriast ja pulbrite kahanemise karakteristikutest [4].

2.3.4 Presstoorigute järeltöötlus

Enamikel juhtudel toimub pärast pressimist toorigute järeltöötlus. See võib hõlmata ainult kraatide (õhuke detailist väljaulatuv osa, mis on tekkinud kahe templipoole ühenduskohas) eemaldust aga ka suurema hulga materjali eemaldamist läbi lõiketöötlust, kui on vaja toorigule anda lõpptoote kuju. Sellised töötlusoperatsioonid viiakse läbi enne paagutamist, sest vastasel juhul oleks nende töötlemine kordades kulukam. Lõikejõud on presstoorigute töötlemisel suhteliselt madalad, et vältida toorigute lagunemist ja saada võimalikult siledad pinnad [4].

2.3.5 Keskkonna- ja terviseohutus

Kermiste pulbrite käsitlemisel on keskkonna- ja terviseohutus esmatähtis. Kõikidel materjalidel peab kaasas olema materjaliohutuse andmeleht, kus on välja toodud lubatud kokkupuuteajad ja meetmed, mida rakendada lekke korral. Töökeskkonnas

peab olema tagatud, et kokkupuude pulbritega oleks lubatud tasemel. Selle jaoks on vajalik piisav väljatõmbesüsteem ja värske õhu pealevool, töötajatelt on nõutud kaitsevahendite kandmine (respiraator, kindad, kittel). Mõningate materjalide puhul on teada, et nende submikroonsed või peenemad osakesed on pürofoorsed ja süttivad õhuga kokku puutudes spontaanselt. Sellistel juhtudel on nõutud, et pulbreid hoiustataks kaitsekihi all (neutraalne gaas, lahusti, vaha). Jahvatamisprotsessis kasutatavate lahustite aurud on tihtipeale süttimisohtlikud, mistõttu peab nende läheduses vältima selliste seadmete kasutamist, mis võivad anda sädet [4].

2.3.6 Paagutamine

Paagutamiseks nimetatakse protsessi, kus kokku surutud materjaliosakesed kuumutatakse peaaegu nende sulamistemperatuurini, mille tulemusel moodustavad nad omavahel sidemed. Alates 1900. aastatest hakati seda terminit kasutama metallipulbrite kuumutamisel tahkete kehade moodustumise kirjeldamiseks. Sel ajal oli peamiseks meetodiks plasma-aktiveeritud paagutamine. 1920. aastatel paagutati esmakordselt volframkarbiid metalletes sideainetega (Co, Fe, Ni). Materjaliosakeste paakumine leiab aset kõrgetel temperatuuridel, mis põhjustavad aatomite võnkeamplituudi suurenemist ning seeläbi tekivad kristallvõresse tühimikud, mille kaudu on võimaldatud uute sidemete teke läbi difundeerumise. Kermiste puhul algab paakumine tavaliselt alles 1000 °C ületamisel. Paakumise protsess on seda kiirem, mida väiksemad on materjaliosakesed, kuna sel juhul on osakestevahelised kaugused väiksemad. Paakumisele aitab kaasa ka materjali vedelfaas, sest vedelikes toimuvad difusiooniprotsessid 100-1000 korda kiiremini kui tahkistes [4].

Vedelfaaspaagutus on peamine meetod, mida kasutatakse kõvade materjalide segu paagutamiseks – üks segu komponent on kuumakindlam ning ei sulata (tahked osakesed), teine komponent moodustab vedeliku. Tavaliselt on vedelfaaspaagutuse korral materjalid valitud selliselt, et neist tekiks tardlahus ehk tahked osakesed saavad lahustuda vedelas faasis. Vedelfaas märgab tahkeid osakesi ning kapillaarjõu toimel tõmbuvad osakesed omavahel kokku. Kapillaarjõu suurus paagutamisprotsessi ajal on tavaliselt ligikaudu võrdne kümnekordse paagutuskeskkonna rõhuga. Paagutamise ajal leiab aset tahkete osakeste pinnakihi sulamine, mis muudab nad mõõtnetelt veidi väiksemaks ja võimaldab neil lahuses vabamalt ja kiiremini ümber paigutuda. Paagutamise tulemusena saadakse komposiitmaterjal, kus kõvad materjaliosakesed paiknevad hajutatult eelnevalt sulanud plastse materjali sees. Vedelfaaspaagutus on jagatud nelja etappi: tardfaas-kuumutamine, ümberpaigutumine, lahus-ümbersadestumine ja tahkise skelettstruktuuri moodustumine. Enne vedeliku moodustumist toimub segu struktuuris tardfaas-paakumine. Edasisel kuumutamisel

vähem kuumakindel segu komponent sulab ja hakkab tahkeid osakesi märgama, tõmmates nad kapillaarjõu toimel kokku ning segu tiheneb. Järgnevalt toimub lahustumis- ümbersadestumine – tahked materjaliosakesed lahustuvad vähesel määral vedelas materjalis, difundeeruvad ning toimuma hakkab terakasv, kus suuremad terad kasvavad väiksemate arvelt. Tahkete osakeste lahustumine toimub kuni segu küllastumiseni, mille järgselt hakkavad tahked osakesed taas välja sadestuma ning moodustub jäik kolmemõõtmeline skelettstruktuur [4].

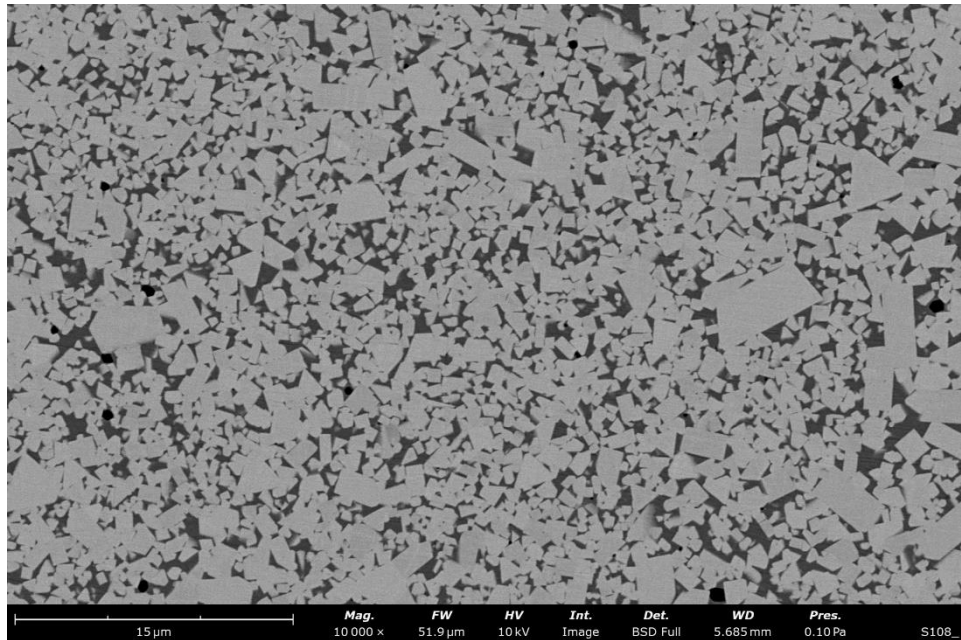
Tahke ja vedela faasi tasakaal on oluline faktor paagutamisprotsessis. Ilma vedela faasita toimub ainult tardfaaspaagutus, mis on aeganõudev ning selle edukaks toimumiseks peavad materjaliosakesed olema väga peened. Kui aga vedelat faasi on ülemäära palju, muutuvad presstoorigud vedela faasi tekkel nõrgaks ning võivad olulisel määral deformeeruda või täielikult oma kuju kaotada. Seetõttu ongi vajalikud paagutamise neli etappi ning et vedeliku osakaal jääks mahuliselt 5-15% vahemikku [4].

Vedelfaaspaagutuse tulemus sõltub nii materjaliomadustest, näiteks osakeste suurusest ja materjalide tardlahustuvusest kui ka protsessi parameetritest, näiteks maksimaalsest temperatuurist ja paagutamisaajast. Neid omadusi ja parameetreid muutes on võimalik saada sama keemilise koostise, kuid väga erineva mikrostruktuuriga kermiseid [4].

Paagutuskeskkonnast sõltub materjali keemiline koostis ja paakumise kiirus. Oksiidkeraamika paagutamine toimub tavaliselt õhus, nitriidkeraamika paagutamine lämmastikus ja karbiidide paagutamine süsinik-kontrollitud keskkonnas. Reaktiivsed metallid paagutatakse vaakumis. Ka väiksed muutused paagutuskeskkonnas võivad avaldada olulist mõju paagutatud materjali omadustele [4].

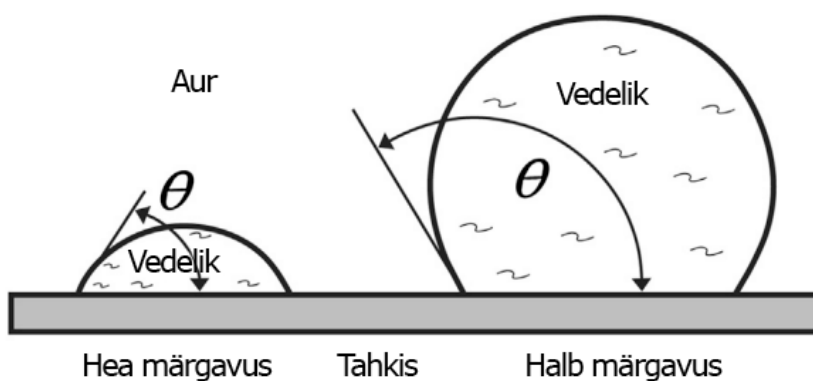
2.3.7 Mikrostruktuurid ja nende teke

Kermiste mikrostruktuurile on iseloomulik kõva ja kulumiskindla faasi terade paiknemine plastse ja pehmema sideaine sees (joonis 2.4). Mikrostruktuuri määravad ära kermise koostis ja valmistamismeetodid. Pärast esmaseid siirdeid hakkab toimuma terade kasvamine. Teoreetiliselt on kermiste lõplikuks ja täielikult tasakaalus struktuuriks üksainus suur vedela väliskihiga kaetud tera. Praktikas aga sellist seisundit ei saavutata, sest arvutuslikult võtaks taolise struktuuri tekkimine aega aastaid. Üldjuhul jääb kermiste terasuurus 1-2 mikromeetri piiridesse [4].



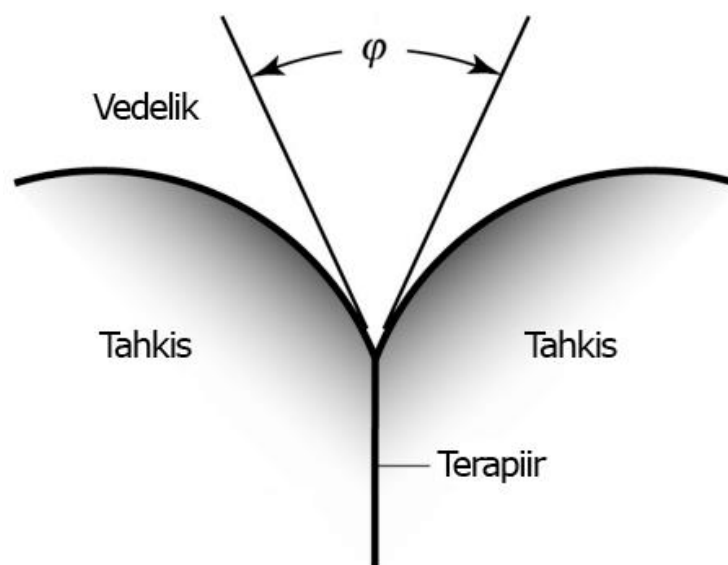
Joonis 2.4. Tüüpiline volframkarbiidi mikrostruktuur. Helehall osa on volframkarbiidi terad, tumehall osa on sideaine. [Autori pilt]

Märgamisnurgaks nimetatakse nurka tahkise ja sellega kontaktis oleva vedeliku pindade vahel ja seda tähistatakse sümboliga θ (joonis 2.5). Mida väiksem on märgamisnurk, seda paremini vedelik tahkist märgab ja vastupidi. Pareim märgamine tähendab kermiste kontekstis seda, et vedel sideaine liigub tänu kapillaarjõule vabamalt kõvade osakeste vahele ning täidab paremini väiksemaid poore ehk kermise tihedus kasvab. Halva märgamise korral on kermiste puhul tavaliselt tulemuseks sideaine väljasulamine ja suurem pooride hulk. Levinud märgamist parandavaks lisandiks on molübdeen [4].



Joonis 2.5. Märgamisnurk [4]

Lahknemisnurgaks (ϕ) nimetatakse kermiste puhul kahe terapiiri vahelist nurka, mida sideaine suudab täita (joonis 2.6). Kui lahknemisnurk läheneb nullile, eraldab sideaine terad. Suurem nurk aga hõlbustab terade ühinemist ehk terakasvu [4].



Joonis 2.6. Lahknemisnurk φ [4]

Poorid on enne paagutamist presstoorikute sees olemas tühimike kujul. Suured poorid paagutatud materjalis viitavad tavaliselt halvale presstooriku kvaliteedile ja vähendavad märgatavalt materjali tugevust. Üldiselt on paagutatud materjalis leiduvad poorid teradest väiksemad. Paagutamise ajal täituvad väiksemad poorid vedela sideainega ning seetõttu suureneb pooride keskmine suurus samal ajal kui üldine poorsus ja pooride arv väheneb. Kuna pooridele mõjub üleslükkejõud, liiguvad nad paagutamise ajal tooriku ülemisse poolde. Suuremad poorid täituvad tavaliselt piisava terakasvu korral vaakumkeskkonnas, kuid see võib võtta oluliselt kauem aega [4].

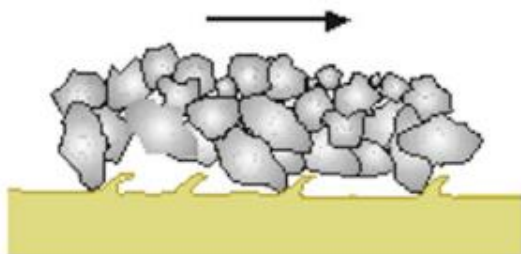
Terakuju sõltub tahke osa mahust, lahknemisnurgast ja tera pinna energia anisotroopsusest. Terade kokkupuude põhjustab nende lamenumist ning selle mõju on tugevam madalama vedelfaasi osakaalu korral. Kui lahknemisnurk tõuseb üle 30° , on vaja kõrgemat vedelikusisaldust, et terasid lahus hoida. Lahknemisnurga tõusul üle 60° , moodustab vedelfaas terade vahele isoleeritud kolded. Terade esialgne kuju ei avalda paagutatud materjali mikrostruktuurile terakasvu tõttu erilist mõju [4].

2.4 Kermiste kulumine ja kulutamiskatsete tüübid

2.4.1 Kulumise mehhanismid

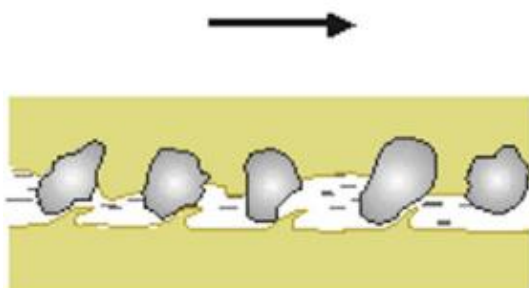
Kulumiseks nimetatakse protsessi, mis toimub pindade omavahelisel hõõrdumisel ning mille tagajärjel eraldub pindadelt materjali ja/või suureneb kuluva keha jääkdeformatsioon. Kulumise protsessi käigus on kehade mõõtmed pidevas muutumises. Sõltuvalt kasutusvaldkonnast on kermiste kulumisel mitmeid erinevaid

forme ning nende kõikide puhul mõjub kehadele kombinatsioon erinevatest mehhanismidest (joonised 2.7-2.13). Enamlevinud kulumismehhanismid kermiste puhul on abrasioon, erosioon ja adhesioon [4].



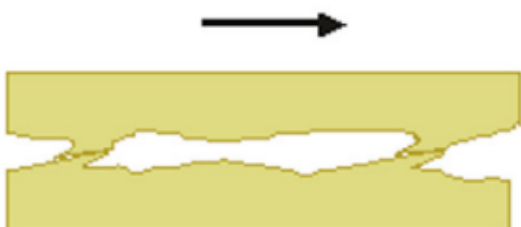
Joonis 2.7. Kahekeha-abrasiivkulumine [11]

Kahekeha-abrasiivkulumine: toimub kõvade ja teravate materjaliosakeste liikumisel mööda pinda. Sõltuvalt materjali kõvadusest võivad olla kulumisjäljed olla vähemärgatavad või sügavad vaod [11].



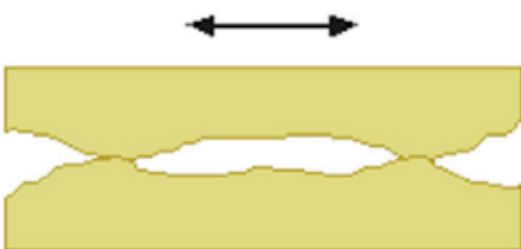
Joonis 2.8. Kolmekeha-abrasiivkulumine [11]

Kolmekeha-abrasiivkulumine: toimub liikuvate pindade vahel paiknevate kõvade ja teravate materjaliosakeste mõjul [11].



Joonis 2.9. Adhesioonkulumine [11]

Adhesioonkulumine: toimub kahe võrdlemisi sileda pinna omavahelisel hõõrdumisel, kus ühe pinna materjaliosakesed jäävad molekulaarjõudude mõjul teise pinna külge [11].



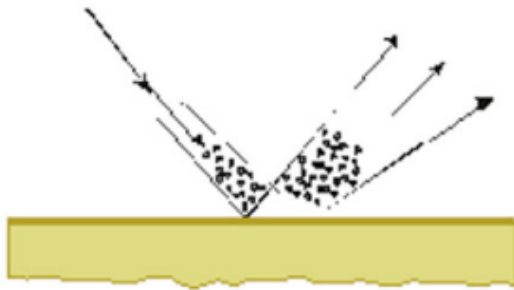
Joonis 2.10. Frettingkorrosiivkulumine [11]

Frettingkorrosiivkulumine: toimub kahe võrdlemisi sileda ja kokkupuutuva pinna vibreerimisel [11].



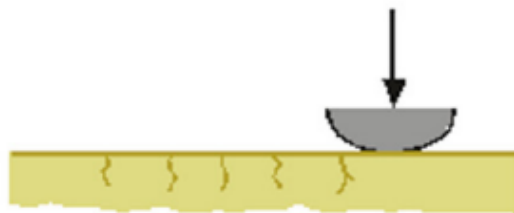
Joonis 2.11. Kavitatsioonkulumine [11]

Kavitatsioonkulumine: toimub vedelikes, kui rõhu kõikumisel tekivad ning lõhkevad materjali pinnal gaasimullid [11].



Joonis 2.12. Erosioonkulumine [11]

Erosioonkulumine: toimub vedeliku-, gaasi- või tahkete osakeste joa paiskumisel pinnale. Määravaks teguriks on abrasiivosakeste kohtumisnurk pinnaga – sitkete materjalide korral esineb suurim kulumine väikestel nurkadel (20°) ning habraste materjalide korral suurtel nurkadel (90°) [4], [11].



Joonis 2.13. Väsimuskulumine [11]

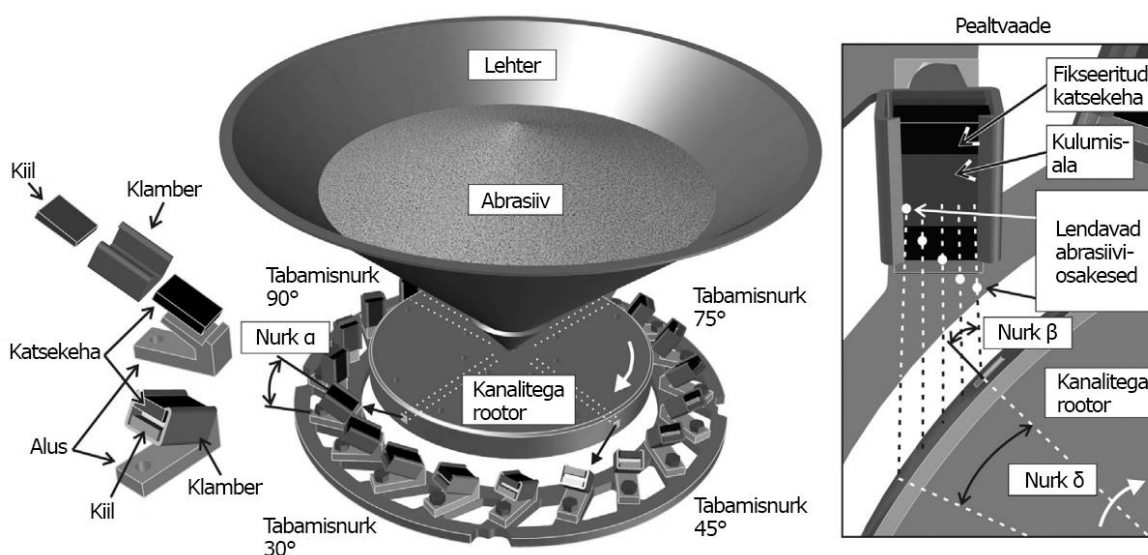
Väsimuskulumine: toimub tsüklilise kontaktkoormuse tõttu, mis vigastab pinda ning lööb sellelt välja materjaliosakesi [11].

2.4.2 Erosioonkulutamine

On teada, et **erosiooni intensiivsus** sõltub peamiselt kahest faktorist: abrasiivosakeste kiirusest ja tabamismurgast (nurk lendavate osakeste trajektoori ja tabatava pinna vahel). Olulisteks parameetriteks on lisaks veel osakeste suurus ja kuju, nende kontsentratsioon, suhe nende kõvaduse ja katsekeha kõvaduse vahel ning lisandite olemasolu. Erosioonkulutamisseadmete ajalugu ulatub 20. sajandi algusesse, kuid Tallinna Tehnikaülikoolis alustati taoliste seadmete arendamisega 1950. aastatel, mil tekkis nende järele suurem vajadus [12].

Tsentrifugaalkiirendit võib pidada üheks paremaks seadmeks erosioonkulutamise valdkonnas. Sellel puuduvad teiste kulutamisseadmete peamised negatiivsed aspektid, nagu näiteks madal tootlikkus, löögikiiruse sõltuvus osakese suurusest, kujust ja kiirendamise distantist, madal saavutatav löögikiirus, tabamismurga sõltuvus osakese kiirusest ning sellest tulenevad piirid. Tsentrifugaalkiirendi tööpõhimõte on järgnev: abrasiivosakesed kallatakse lehtrisse, kust edasi liiguvad nad pöörlevasse rootorisse,

mille sees on kanalid; tsentrifugaaljõu abil kiirendatakse osakesed vajaliku kiiruseni ning kanalitest väljudes paiskuvad nad vastu katsekehasid, mis on fikseeritud kindla nurgaga aluste külge (joonis 2.14). Rootor on otse mootori külge ühendatud ning mootori kiiruse muutmiseks on kasutusel kontrollid. Tabamisnurka on võimalik muuta, kasutades erineva kaldega (tabamisnurk α) aluseid ning muutes aluste nurka abrasiivosakeste joa suhtes (osakeste paiskumise nurk β). Esimene versioon sellisest tsentrifugaalkiirendist loodi Tallinna Tehnikaülikoolis 1957. aastal Ilmar Kleisi poolt ja kandis nime CAK-1 (*centrifugal accelerator of Kleis*). CAK erosioonkulutamisseadme peamisteks eelisteks on võimalus mitmeid katsekehi samaaegselt samadel parameetritel kulutada ja parem protsessi kontrollitavus. Seadmel põhineb standard GOST 23.201-78 „Materjalide ja katete gaasabrasiivtestimine tsentrifugaalkiirendiga“. Antud töös kasutati CAK-5 tsentrifugaalkiirendit (joonis 2.15), mis on CAK erosioonkulutamisseadme 2003. aastal valminud viies versioon ning mille parameetrid on toodud tabelis 2.2 [12].



Joonis 2.14. Tsentrifugaalkiirendi CAK-5 tööpõhimõte: α – aluse nurk, β – osakeste paiskumise nurk, δ – tabamissektori nurk [13]



Joonis 2.15. Tsentrifugaalkiirendi CAK-5: 1) abrasiiv, 2) lehter koos korpusega, 3) korpus, 4) kasutatud abrasiivi kogumiskoht [Autori foto]

Tabel 2.2. Tsentrifugaalkiirendi CAK-5 parameetrid [12]

Rootori läbimõõt, mm	Mootori võimsus, kW	Mõõtmed, m	Mass, kg	Osakeste kiirus, m s ⁻¹	Maksimaalne osakeste suurus, mm	Maksimaalne katsekehade arv
200	2,2	0,3x0,6	40	15-125	1,2	15

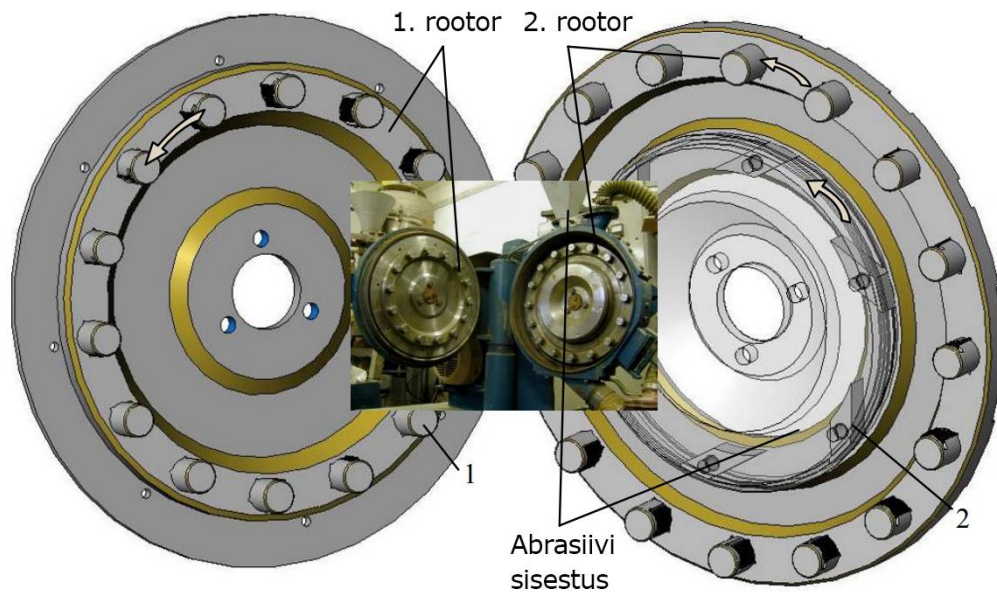
Standardi GOST 23.201-78 kohaselt on CAK-5 tsentrifugaalkiirendiga võimalik mõõta kulutamiskindlust materjalidel, mille kõvadus on vähemalt 20 HV ning mille pooride suurus ei ületa 0,02 millimeetrit. Katsekehad mõõtudega 20 mm x 15 mm x 4 mm fikseeritakse klambrit ja kiilu kasutades aluste külge ning kulutatava ala laius on $12 \pm 0,1$

millimeetrit. Etalonmaterjaliks on 0,45% süsinikusisaldusega teras kõvadusega 185-195 HV. Enne ja pärast kulutamist puhastatakse katsekehad lahustiga ning kaalutakse 0,1 milligrammi täpsusega. Abrasiivina on CAK-5 tsentrifugaalkiirendis kasutusel kvartslüü, mille osakeste suurus on vahemikus 0,5-0,9 millimeetrit ja niiskusesisaldus vähem kui 0,15%. Alused tuleb kinnitada vastavalt paiskumisnurgale $\beta = 55^\circ$. Tüüpilisteks osakeste kiirusteks on 38 ja 76 m s⁻¹. Abrasiivi kogusteks on nendel kiirustel vastavalt 30 ja 5 kilogrammi ning üle 1000 HV kõvadusega katsekehade puhul 60 ja 10 kilogrammi. Kuna rootori kanalid kuluvad katsete käigus, on neid oluline pärast iga katset kontrollida ning vajadusel välja vahetada. Katsete läbiviimisel tuleb arvestada asjaoluga, et enamike materjalide puhul ei ole kulumise määr protsessi alguses konstantne. Seetõttu on vajalik katsekehade sissetöötamine, mis toimub samadel parameetritel nagu peamised katsed [12].

2.4.3 Löökkulutamine

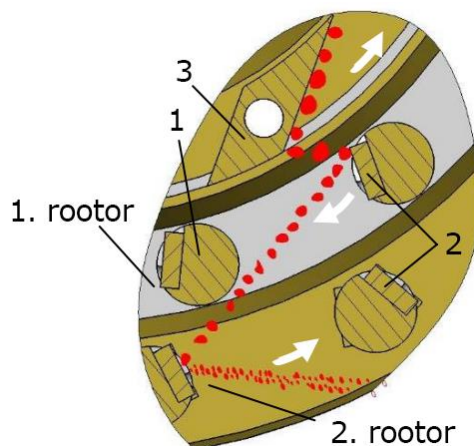
Löökkulutamine on oma olemuselt võrreldav erosioonkulutamisega. Suuremateks erinevusteks on katseseadme ehitus ning osakeste suurem fraktsioon (>2 mm) [14]. Löökkulutamise käigus võivad materjali sisse tekkida väsimuspraod, mille ühinemisel võivad materjalist eralduda suuremad tükid [4]. Löökkulutamiskatse läbiviimiseks kasutatakse desintegraatorit. Tallinna Tehnikaülikooli Materjalide Taaskasutuse Teadus- ja Katselaboratooriumis kasutusel olev DESI desintegraator ja seal läbi viidav löökkulutamiskatse on järgnevalt kirjeldatud.

DESI desintegraatoriga on võimalik uurida kahekeha löökkulumist ja abrasiivosakeste lihvitavust. Katseseade koosneb kahest vastupidises suunas pöörlevast rootorist, mis on otseühenduses elektrimootoritega ning mille külge on kinnitatud katsekehade hoidikud (joonis 2.16) [14].



Joonis 2.16. DESI desintegraator: 1) katsekeha hoidik, 2) tiivik [14]

Abrasiivosakesed viiakse katseseadme keskele lehtri abil ning kokkupuutel tiivikutega saavutavad nad tsentrifugaaljõu abil vajaliku kiiruse (joonis 2.17). Sisestuse kiirus sõltub abrasiivist, kuid on üldjuhul 3 kg min^{-1} . Pärast kokkupuudet tiivikutega paiskuvad abrasiivosakesed vastu esimese rootori katsekehade pinda. Esimesse rootorisse on võimalik kinnitada 14 ja teise rootorisse 16 katsekeha. Löökkulumist saab uurida esimesse rootorisse kinnitatud katsekehade puhul. Teise rootori kasutamine on valikuline ning sellega on võimalik uurida abrasiivosakeste lihvitavust. Esimese rootori pöörlemissagedus on kuni 5880 p min^{-1} , osakeste kiirus on seejuures $121 \pm 14 \text{ m s}^{-1}$. Standardseks abrasiiviks on DESI desintegraatoris graniitkillustik fraktsiooni suurusega kuni 7 mm ja kõvadusega ligikaudu 1000 HV . Oletuslik tabamisnurk on vahemikus $62,1-71,5^\circ$ [14].



Joonis 2.17. Abrasiivosakeste liikumine DESI desintegraatoris: 1) katsekeha hoidik, 2) katsekeha, 3) tiivik [14]

3. EKSPERIMENTAALNE OSA

Selles peatükis kirjeldatakse autori poolt valmistatud raud-kroom sideainega kermiste valmistamisprotsessi, kulutamiskatsete läbiviimist, katsekehade mikrostruktuuri ja katsetulemuste analüüsi ning tehtud järeldusi.

3.1 Katsekehade valmistamine

Antud alapeatükis on kirjeldatud käesoleva magistritöö raames valmistatud katsekehade loomise protsessi. Materjalide keemiline koostis valiti juhendajate koostööl, lähtudes juba varasemalt uuritud materjalidest. Kokku valmistati autori poolt viis erinevat materjali, tähistega S108, S109, S110, S111 ja S112, mille keemilised koostised on leitavad tabelist 3.1.

Tabel 3.1. Autori poolt valmistatud materjalide keemilised koostised

Materjalitähis	Keemiline koostis massiprotsentides
S108	WC-25(Fe26Cr)-2C
S109	TiC-40(Fe26Cr)
S110	TiC-40(Fe26Cr2Mo)
S111	TiC-40(Fe26Cr12Mo)
S112	TiC-40(Fe12Mo)

3.1.1 Pulbrite valmistamine

Kõikide töö raames valmistatud pulbrite jahvatamiseks kasutati kuuljahvatust, sest oluline oli võimalikult hea segunemine ning pulbrite valmistamise aeg ei olnud rangelt piiratud. Jahvatusprotsess ei erinenud tavapärasest kuuljahvatusest: pulbrid, jahvatuskuulid ning -vedelik (lahusti) lisati veskisse ning jahvatustsükli pikkus oli ligikaudu kolm ööpäeva ehk 72 tundi. Jahvatusvedelikuna oli kasutusel isopropüülalkohol (C_3H_8O) ning jahvatuskuulid olid volframkarbiid-koobalt kermisest. Pärast jahvatust pulbersegud kuivatati 50 °C juures keskmiselt 30 minutit ning kuulid eraldati segust. Kuna segu muutus kuivamise tulemusel tahkeks (joonis 3.1) ning oli vaja viia taas pulbrilisele kujule, viidi pärast kuivatamist läbi sõelumine 0,5 mm sõelaga. Sõelutud pulbritele lisati plastifikaator, antud töös kasutati selleks parafiini, millest oli valmistatud lakibensiiniga 6% lahus. Parafiinilahus lisati sõelutud pulbrile, segati käsitsi läbi ja kuivatati taaskord 50 °C juures ligikaudu 30 minutit, et eemaldada segust

lakibensiin. Pärast teistkordset kuivatamist ja 0,5 mm sõelaga sõelumist oli pulber valmis pressimiseks. Parafiini massiprotsent segus oli arvutuslikult 2%.



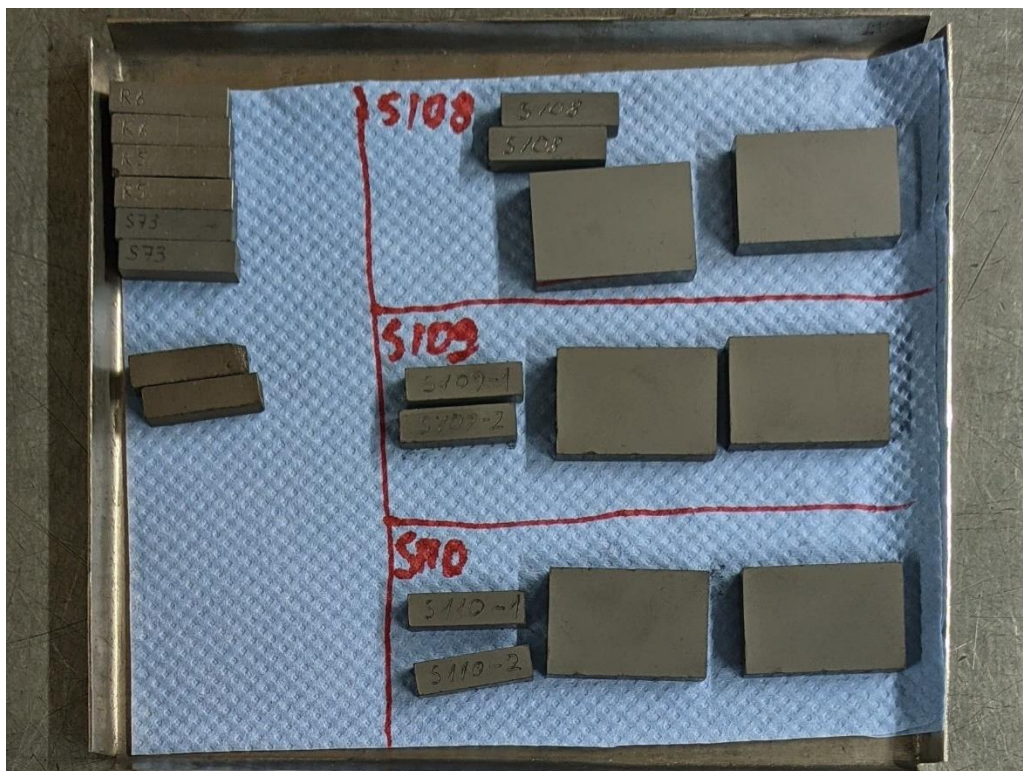
Joonis 3.1. Segu pärast esmakordset kuivatamist (vasakul), segu pärast sõelumist (paremal)
[Autori foto]

3.1.2 Katsekehade pressimine

Katsekehade pressimiseks kasutati hüdraulilist pressi. Katsekehasid valmistati kahes mõõdus: 6 mm x 6 mm x 22 mm ja 20 mm x 6 mm x 30 mm. Väiksemate katsekehade pressimisjõud oli 12 kN ning nende eesmärgiks oli mikrostruktuuri vaatlemise ja kõvaduse mõõtmise võimaldamine. Suuremate katsekehade pressimisjõud oli 55 kN ning neid kasutati hiljem erosioon- ja löökkulutamiskatsete läbiviimisel.

Pressimise protsess oli järgnev:

- 1) Pressvormi tempel ja matriits puhastati isopropüülalkoholiga;
- 2) Templi alumine pool sisestati matriitsi;
- 3) Vormi sisse kallati 0,1 g täpsusega kaalutud kindel kogus pulbrit;
- 4) Matriitsi sisestati templi ülemine pool;
- 5) Pulber tihendati haamrilöögiga;
- 6) Vorm asetati pressi ning viidi läbi ca viiesekundiline pressimine;
- 7) Presstoorik suruti vormist välja;
- 8) Presstoorikutelt eemaldati kraat ning graveeriti peale materjalitähis koos tooriku järjekorranumbriga (joonis 3.2).



Joonis 3.2. Presstoorikud [Autori foto]

3.1.3 Presstoorikute paagutamine

Pärast toorikute pressimist toimus nende paagutamine ahjus RD-G (R.D. Webb Company INC.) vaakumkeskkonnas, keskmisel rõhul 40 Pa. Kõikide katsekehade puhul oli kasutusel standardse ülesehitusega paagutamistsükkel, mille täpsemad parameetrid on toodud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Autori poolt valmistatud toorikute paagutamistsükli parameetrid

Materjalitähis	Paagutamistsükli parameetrid
S108	Plastifikaatori väljapõletus: 300 °C, 30 min Oksiidide taandamine: 300-800 °C, 10 °C min ⁻¹ ; 800-1100 °C, 5 °C min ⁻¹ Tardfaaspaagutus: 1100 °C, 60 min Vedelfaaspaagutus: 1200 °C, 30 min
S109	Plastifikaatori väljapõletus: 300 °C, 30 min
S110	Oksiidide taandamine: 300-800 °C, 10 °C min ⁻¹ ;
S111	800-1100 °C, 5 °C min ⁻¹
S112	Tardfaaspaagutus: 1100 °C, 60 min Vedelfaaspaagutus: 1500 °C, 30 min

S108 tähisega materjali esimese katsekeha paagutamine ebaõnnestus liigselt kõrge vedelfaaspaagutuse temperatuuri (1300 °C) tõttu, mille tulemusel toimus katsekeha pundumine ning hiljem, pärast katsekeha pooleks lõikamist, selgus, et katsekeha sisemus oli täis pragusid ehk toimunud oli materjalikihtide eraldumine. Järgnevad S108 katsekehad paagutati temperatuuril 1200 °C ning tulemus oli sobiv. Läbilõiked S108-1 ja S108-2 katsekehadest on näidatud joonisel 3.3. Teiste materjalide puhul ebaõnnestumisi aset ei leidnud. S108 paagutati ülejäänud materjalidest madalamal temperatuuril, sest raud sideainega volframkarbiid kermises tekib vedelfaas varem kui titaankarbiid kermises.

3.1.4 Toimingud väiksemate katsekehadega

Mõõtudelt väiksemad katsekehad olid valmistatud eesmärgiga võimaldada mikrostruktuuri vaatlemist ja kõvaduse mõõtmist. Kõvadust oleks olnud võimalik mõõta katsekeha külgedelt, kuid selleks, et veenduda struktuuri ühtsuses läbi terve katsekeha, oli vajalik nende ristpinna uurimine. Selleks lõigati katsekehad pooleks, kasutades automaatset täppislõikamismasinat IsoMet 4000 (Buehler). Protsessi käigus jahutati lõikeketast ja lõigatavat katsekeha jahutusvedelikuga, ketta pöörlemiskiirus oli 4500 p min⁻¹ ja ettenihe 2,0 mm min⁻¹. Pärast katsekehade lõikamist need kuivatati ja puhastati isopropüülalkoholiga, asetati hüdraulilisse sisestuspressi Prestopress-3 (Struers), kuhu lisati polümeeri graanulid ning kuumpressiti need litriks (joonis 3.3). Litri tagumisele poolele graveeriti katsekehade tähis ja kuupäev ning esimene pool lihviti poleerimismasinal Phoenix 3000 (Buehler) järgnevalt 40, 10, 15, 9 ja 3 mikroniliste lihvketastega, mille tulemusel saavutati ühtlane sile ja läikiv pind, millelt oli võimalik mõõta kõvadus ning vaadelda materjali mikrostruktuuri.



Joonis 3.3. Litter S108-1 ja S108-2 katsekehadega [Autori foto]

3.1.5 Kõvaduse määramine

Autor määras materjalide kõvaduse, kasutades selleks kõvaduse mõõtmise masinat 5030 KV (Indentec), millega tehti katsekehade pinnale indentori jäljed. Jälgi vaadeldi optilise mikroskoobiga kahesajakordse suurendusega, mis võimaldas mõõta indentori diagonaalide pikkusi 0,1 μm täpsusega. Igale materjalile teostati kolm mõõtmist ning arvutati välja kõvadused vastavalt valemile 2.1. Lõpliku kõvaduse moodustas kolme väärtuse keskmine. Kõvaduste mõõtemääramatus oli ± 50 HV30. Kõikide töö raames katsetatud materjalide kõvadused on leitavad Lisast 1.

3.2 Kulutamiskatsed

3.2.1 Katsetatavate materjalide valik

Kuna autori poolt valmistati antud töö raames vaid viis erinevat materjali, oli raud-kroom sideainega kermiste kulumiskindlusest põhjalikuma ülevaate saamiseks otstarbekas kaasata katsetesse ka teisi Tallinna Tehnikaülikooli Pulbermetallurgia Laboris valmistatud koostiselt sarnaseid materjale. Töö juhendajate poolt valiti välja 23

materjali, millest 9 oli valmistanud teadur Marek Tarraste, 7 valmistanud teadur Märt Kolnes ning 7 valmistanud doktorant-nooremteadur Tabeen Halawat Pampori.

Viiendal katseseerial kasutati 14 erinevast materjalist katsekeha, mis olid valitud kõigi 28 hulgast, arvestades nende keemilise koostise ja eelnevate kulutamiskatsete tulemustega. Põhjalikumaks uurimiseks valiti 14 katsekeha, sest nii mitu oli neid võimalik kinnitada desintegraatorisse. Valitud ja mitte autori poolt valmistatud katsekehade keemilised koostised on leitavad tabelist 3.3. Ülevaade kõikidest katsetatud materjalidest on leitav Lisast 1.

Tabel 3.3. Põhjalikumaks uurimiseks valitud materjalid, mis ei olnud valmistatud autori poolt

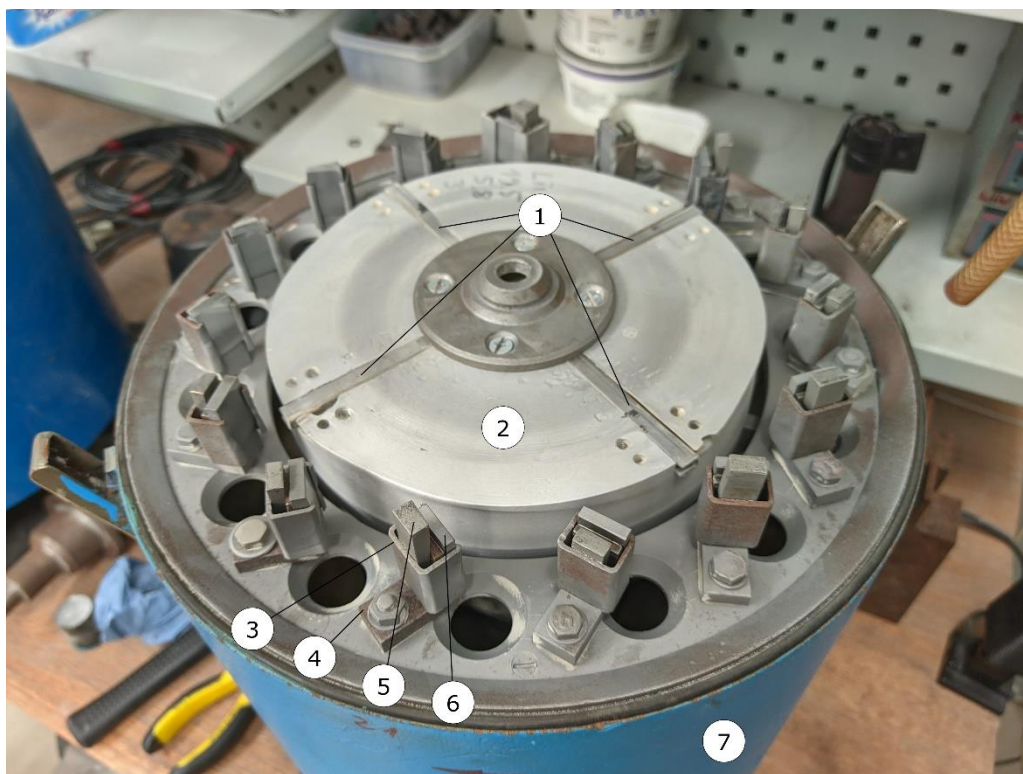
Materjalitähis	Keemiline koostis massiprotsentides
WCR1-9	WC-8Co
AV1-2	WC-15Co
V116-3	WC-15Co
S43-7	WC-30(Fe17Cr)
S72-3	WC-15FeMn-0.5C
746-X2	TiC-34(Fe24Cr12Nb)
T(1)	TiCN-40(Fe26Cr)
T(6)	TiCN-30(Fe26Cr8Mo)
T(7)	TiCN-10WC-30(Fe26Cr)

3.2.2 Katsekehade ettevalmistus

Enne kulutamiskatsete läbiviimist oli vaja teostada katsekehade ettevalmistus, mis hõlmas nende pinna lihvimist ja sissetöötamist. Kõikide katsekehade ühele pinnale teostati vesilihv poleerimisemasinal Phoenix 3000 (Buehler) 40 mikronilise lihvkettaga ning sobiliku pinnaviimistluse saamiseks käsitsi kulus ühe katsekeha kohta ketta 250-300 p min⁻¹ pöörlemiskiirusel ligikaudu 25 minutit. Seda aega oleks oluliselt olnud võimalik lühendada, kui katsekehade hoidja oleks sel ajal juba kasutusvalmis olnud. Katsekehade sissetöötamine toimus 3 kilogrammi liivaga (osakeste kiirus 80 m s⁻¹) ning selle vajalikkus tuleneb asjaolust, et kulumise määr ei ole protsessi alguses konstantne. Pärast sissetöötamist eemaldati katsekehad seadmest, puhastati suruõhu ja isopropüülalkoholiga ning mõõdeti analüütilise kaaluga nende massid täpsusega 0,1 milligrammi. Kuna kulumise arvutamise jaoks oli nõutud materjali tihedus, mõõdeti kõikide katsekehade tihedused analüütilisel kaalul, kasutades Archimedese meetodit.

3.2.3 Erosioonkulutamise katsete läbiviimine

Pärast ettevalmistust kinnitati 15 katsekeha tsentrifugaalkiirendisse CAK-5 (joonis 3.4), kontrollides eelnevalt kõikide aluste vastavust osakeste paiskumisnurgale $\beta = 55^\circ$ ning klambrite pilu laiust, mis oli nõude kohaselt $12 \pm 0,1$ millimeetrit. Kõikide katseseeriade puhul olid mõned protsessi parameetrid alati samad: viidi läbi kolm katset; etalonina oli kasutusel Hardox 400 terasest katsekeha; pärast igat katset puhastati katsekehad suruõhu ja isopropüülalkoholiga ning kaaluti 0,1 milligrammi täpsusega analüütilisel kaalul; abrasiivosakeste kiirus oli 80 m s^{-1} ; kasutati Männiku karjäärast pärinevat liiva, mis sõeluti enne kasutamist läbi 1,0 millimeetrise sõela ehk fraktsiooni suurus oli kuni 1,0 millimeetrit; liiv oli kaalutud täpsusega 10 g (v.a viies seeria); liivaterade kõvadus oli $\sim 1100 \text{ HV}_{30}$ [13]. Erosioonkulutamiskatsete tulemused on leitavad Lisast 2.



Joonis 3.4. Katsekehad tsentrifugaalkiirendis CAK-5: 1) kanalid, 2) rootor, 3) klamber, 4) alus, 5) kiil, 6) katsekeha, 7) korpus [Autori foto]

Esimese katseseeria ajal olid kasutusel alused nurgaga $\alpha = 90^\circ$ ning kõik kolm katset viidi igaüks läbi 10 kg liivaga. Pärast esimese seeria lõpetamist viidi läbi katsekehade ultrahelipuhastus, mis kestis 10 minutit ning toimus isopropüülalkoholi keskkonnas. Seejärel paigutati katsekehad elektronmikroskoopi Phenom XL G2 (ThermoFischer) ning jäädvustati pildid kõikide katsekehade vähem kulunud ja kõige intensiivsemalt kulunud aladest.

Teise katseseeria puhul olid kasutusel $\alpha = 30^\circ$ nurgaga alused ning liiva kogust vähendati kümnelt kilogrammilt kuuele (ühe katse kohta) kanalite liigse kulumise tõttu. Katsekehad olid samad, mis esimeses seerias. 1. ja 2. katseseeria mõju katsekehale on nähtav joonisel 3.5.



Joonis 3.5. S108 katsekeha pind (vasakult paremale) enne kulutamist ja pärast järjestikuseid kulutamiskatseid (tegemist on keskmisest vähem kulunud materjaliga) [Autori foto]

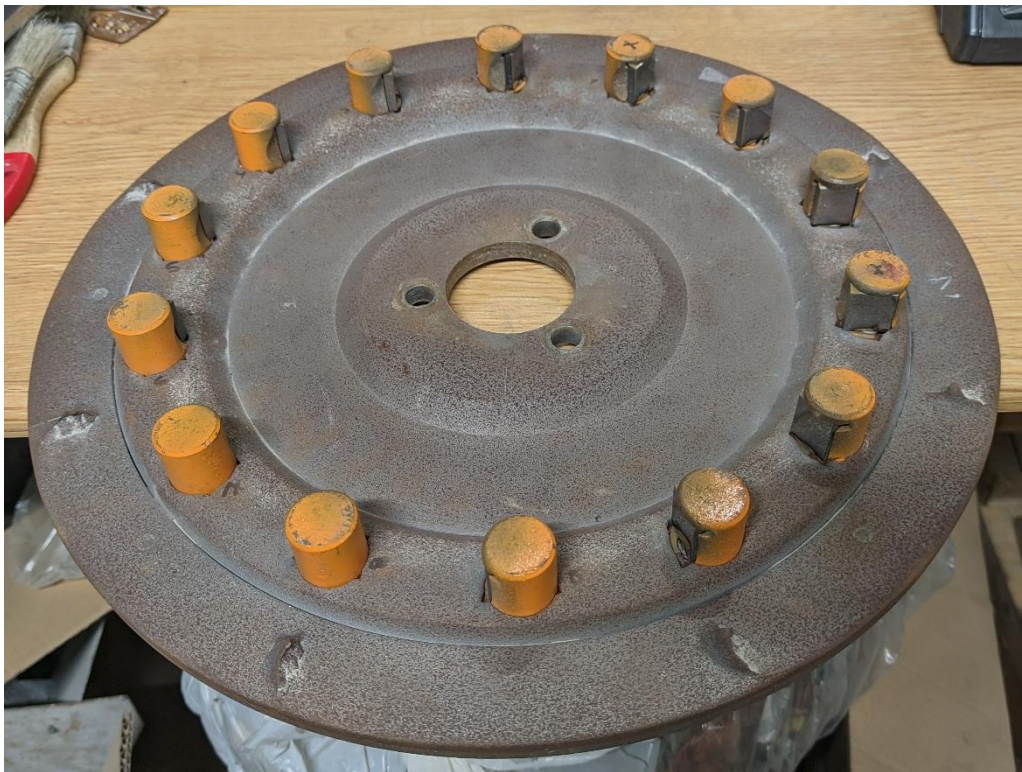
Kolmas katseseeria toimus $\alpha = 30^\circ$ nurgaga alustega ja 6 kilogrammi liivaga. Seekord olid kasutusel järgmised 14 erineva materjaliga katsekeha ning sama etalon nagu 1. ja 2. seeria puhul.

Neljas katseseeria toimus $\alpha = 90^\circ$ nurgaga alustega ja 6 kilogrammi liivaga. Katsekehad olid samad, mis 3. seerias. Pärast neljandat seeriat viidi sarnaselt esimesele seeriale läbi katsekehade ultrahelipuhastus ja vaatlus elektronmikroskoobiga.

Viienda katseseeria parameetrid ja eesmärk erinesid varasematest. Seekord toimus vaid üks katse kiirusel 80 m s^{-1} , aluste nurk oli $\alpha = 90^\circ$, liiva koguseks oli 20 grammi, mis kaaluti 0,1 g täpsusega. Enne katse läbiviimist lihviti kõikide katsekehade katsetatav pind 10 mikromeetrise kettaga ning seejärel poleeriti 3 mikromeetrise poleervahendi ja kettaga. Liiv sõeluti kõigepealt 1,0 millimeetrise ja seejärel 0,5 millimeetrise sõelaga, et eemaldada peenemad liivaosakesed. Katse läbiviimiseks kasutati teisel sõelumisel sõela pinnale jäänud liivaosakesi ehk fraktsiooni suuruseks oli 0,5-1,0 millimeetrit. Katse eesmärk oli vaadelda üksikute liivaosakeste poolt tekitatud deformatsioone katsekeha siledal pinnal, et täpsemini hinnata kulumise mehhanismi.

3.2.4 Löökkulutamise katsete läbiviimine

Löökkulutamise katsed viis läbi vanemteadur Dmitri Goljandin Tallinna Tehnikaülikooli Materjalide Taaskasutuse Teadus- ja Katselaboratooriumis. Enne katseid lõigati traaterosioonlõikepingis katsekehade üks ots 75° nurga alla, et need oleks võimalik kinnitada desintegraatori hoidikutesse (joonised 3.6 ja 3.7). Löökkulutamiskatsetel oli osakeste kiirus 80 m s^{-1} , osakeste materjal graniit, osakeste kõvadus $\sim 1000 \text{ HV}$, fraktsiooni suurus 3,0-5,6 mm, abrasiivi kogus 15 kg. Pärast igat katset katsekehad kaaluti ning kokku viidi läbi kolm katset. Katsete tulemused on leitavad Lisast 3.



Joonis 3.6. Katsekehad DESI desintegraatori hoidikutes [Autori foto]



Joonis 3.7. Katsekehad DESI desintegraatori hoidikutes [Dmitri Goljandin foto]

3.3 Mikrostruktuuri ja katsetulemuste analüüs

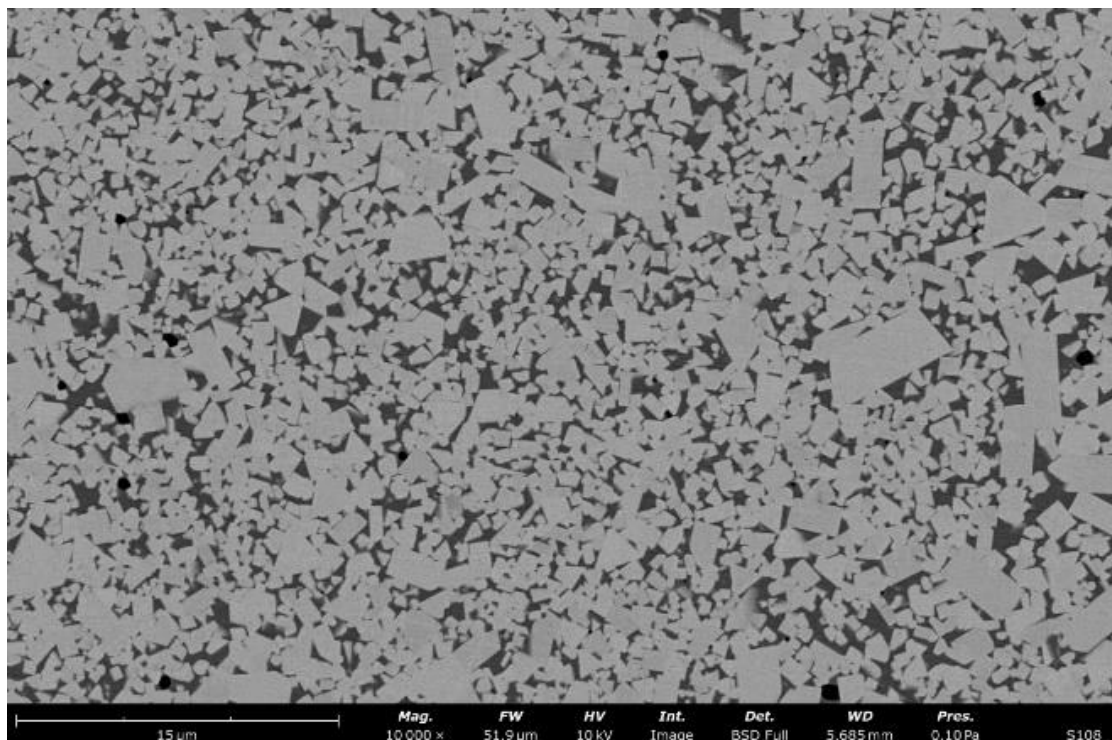
3.3.1 Metoodika

Skaneeriva elektronmikroskoobi (SEM) töö põhineb fokuseeritud suure energiaga elektronide kiire suunamisel läbi elektronläätsede, et saada uurimisobjekti kohta infot (pinnatekstuur, keemiline koostis, kristallstruktuur). Tüüpiliselt kasutatakse SEM piltide tegemiseks suurendusvahemikku 20 kuni 30000 korda, kuid maksimaalne võimalik suurendus võib ulatuda olenevalt seadmest kuni miljonikordseks. SEM pildid on halltoonides, kuid erinevate pildiosade paremaks eristamiseks lisatakse neile tihtipeale värv hiljem juurde. Skaneeriv elektronmikroskoopia toimub vakumeeritud keskkonnas, et vältida elektronikiire hajumist gaasimolekulidega kokkupõrkel [15], [16].

Antud töö raames kasutati Phenom XL G2 (ThermoFischer) ja JSM 840A (JEOL Ltd.) elektronmikroskoobe. Pärast kulutamiskatset ja enne SEM piltide tegemist viidi läbi katsekehade ultrahelipuhastus isopropüülalkoholis, et eemaldada pinna sisse tunginud abrasiivosakesed.

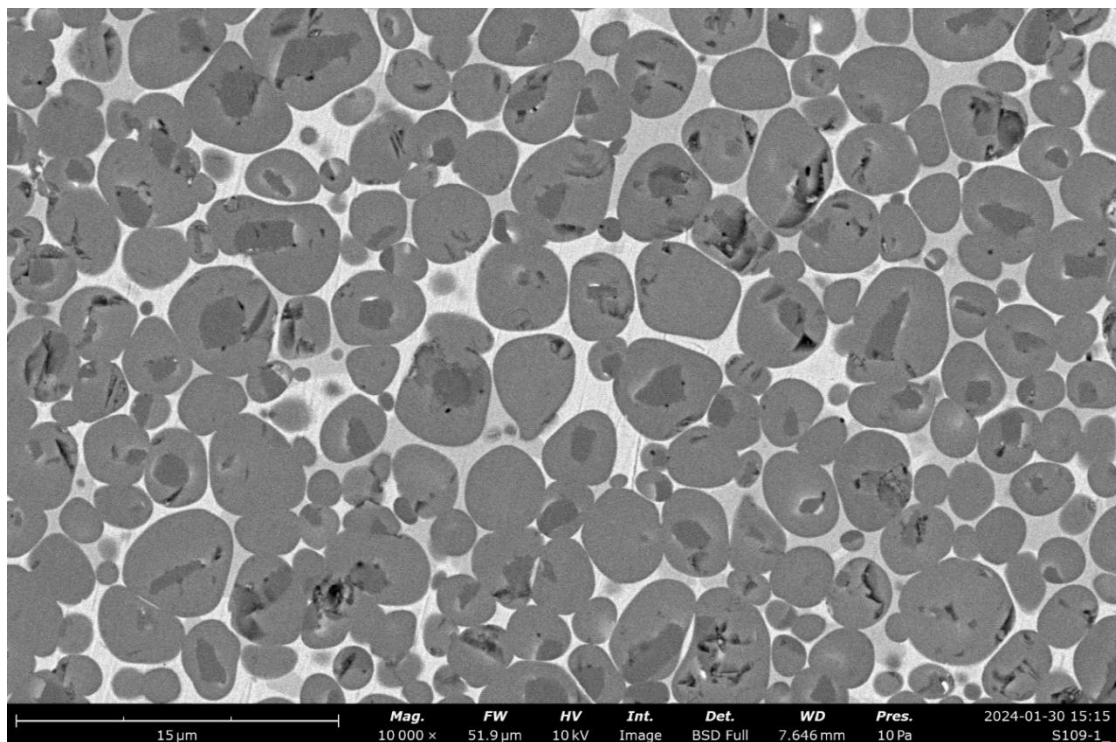
3.3.2 Mikrostruktuuri analüüs

S108 tähistusega materjal on tüüpilise volframkarbiid kermise mikrostruktuuriga. Joonisel 3.7 on selgesti eristatavad nurgelised volframkarbiidi terad (helehallid), mida ümbritseb Fe-Cr sideaine (tumehall). S108 mikrostruktuur on üldjoontes peeneteraline, kuid esineb ka submikroonse ja keskmise suurusega terasid. Poorsust esineb väga vähesel määral ning poorid (mustad alad) on enamikest teradest väiksemad.



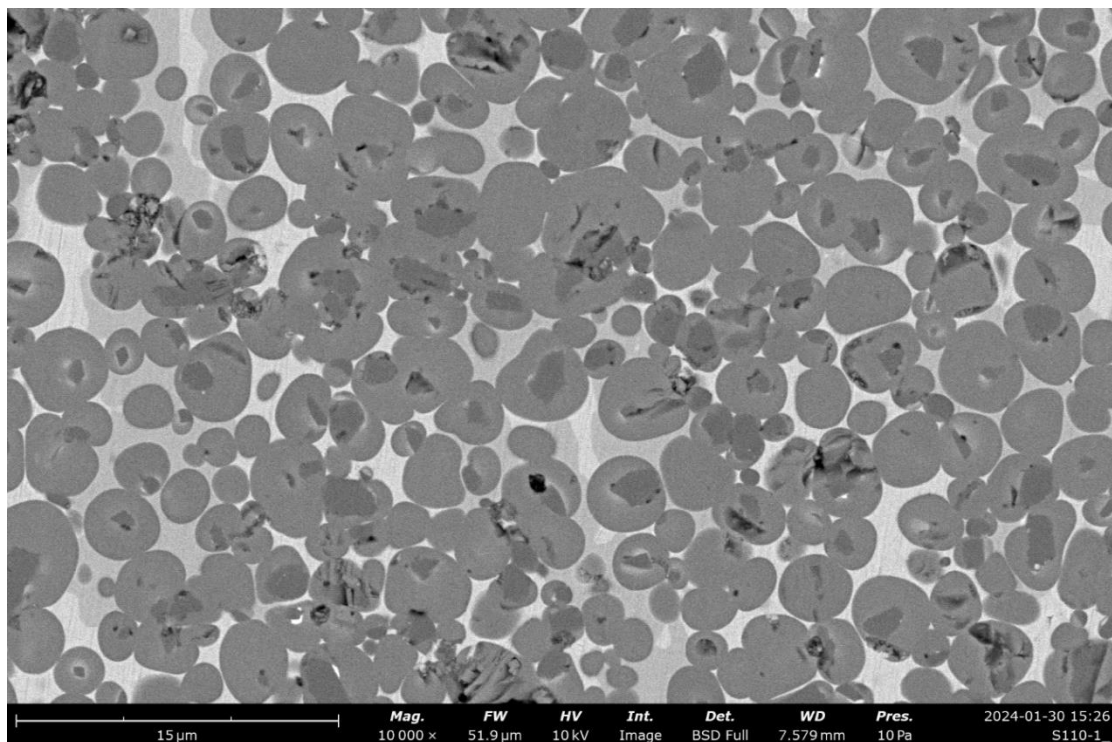
Joonis 3.7. Materjali S108 mikrostruktuur [Autori pilt]

S109 tähistusega materjal on tüüpilise titaankarbiid kermise mikrostruktuuriga. Joonisel 3.8 on nähtav titaankarbiidi terade (tumehallid) paiknemine Fe-Cr sideainemaatriksis (helehall). S109 terasuurus on jäme, esineb vähesel määral keskmisi terasid. Poorsust sisuliselt ei esine. Kuna antud materjali ei ole lisatud märgamist soodustavat molübdeeni, on teradevaheline lahknemisnurk suurem ning nähtav on terade kokkupuutumine. Terade sees paiknevad säbrulised alad ei ole seotud materjali keemilise koostise erinevusega, vaid need on põhjustatud terade kildumisest katsekeha pinna lihvimisel. Sama tähelepanek kehtib ka järgnevatel joonistel kuni jooniseni 3.11 k.a. Veidi tumedam ala terade sees on karbiid, mis ei lahustunud paagutuse ajal vedelfaasis ning natuke heledam väline võru moodustus vedelfaasist välja kristalliseerumise teel.



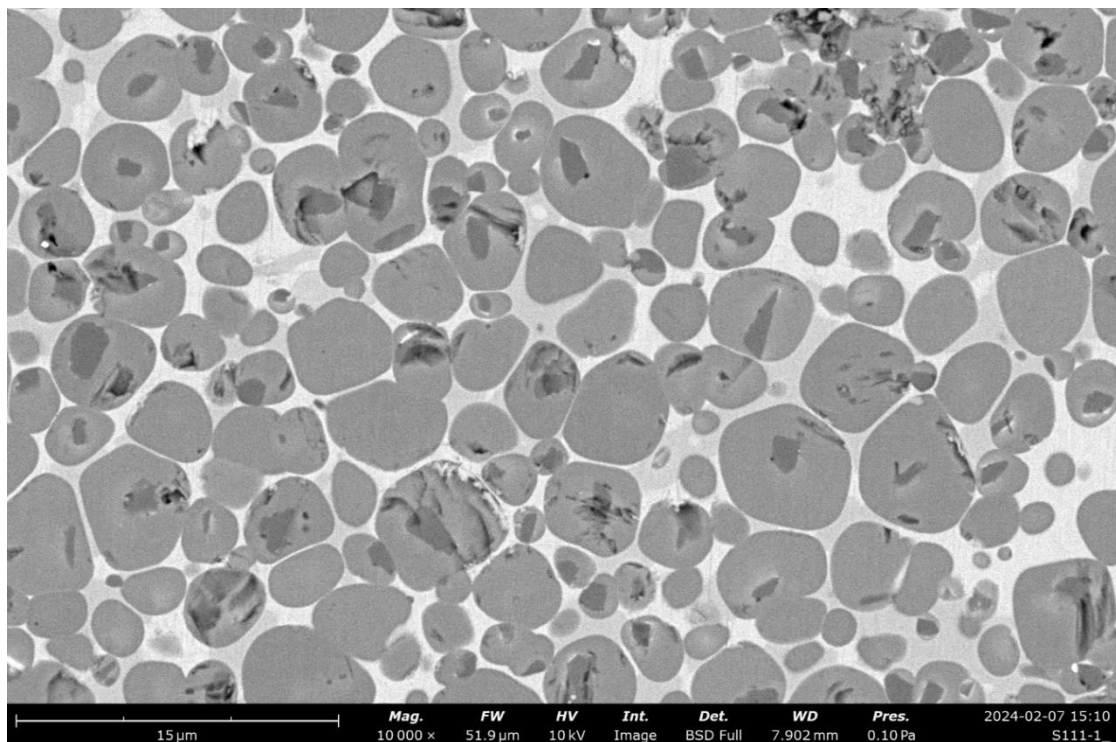
Joonis 3.8. Materjali S109 mikrostruktuur

S110 on samuti titaankarbiidile iseloomuliku mikrostruktuuriga, kuid terasuurus on võrreldes S109-ga väiksem, mikrostruktuur on keskmine-jäme. Nii S109 kui S110 paagutamispärametrid olid identsed ning viimase väiksem terasuurus on seletatav molübdeeni lisamisega, mis on terakasvu inhibiitor. Kuna lisatud oli suhteliselt vähe molübdeeni, ei ole lahknemisnurk võrreldes S109-ga praktiliselt üldse muutunud. Poorsust sisuliselt ei esine. Sideaines nähtav veidi tumedam ala on kroomkarbiid.



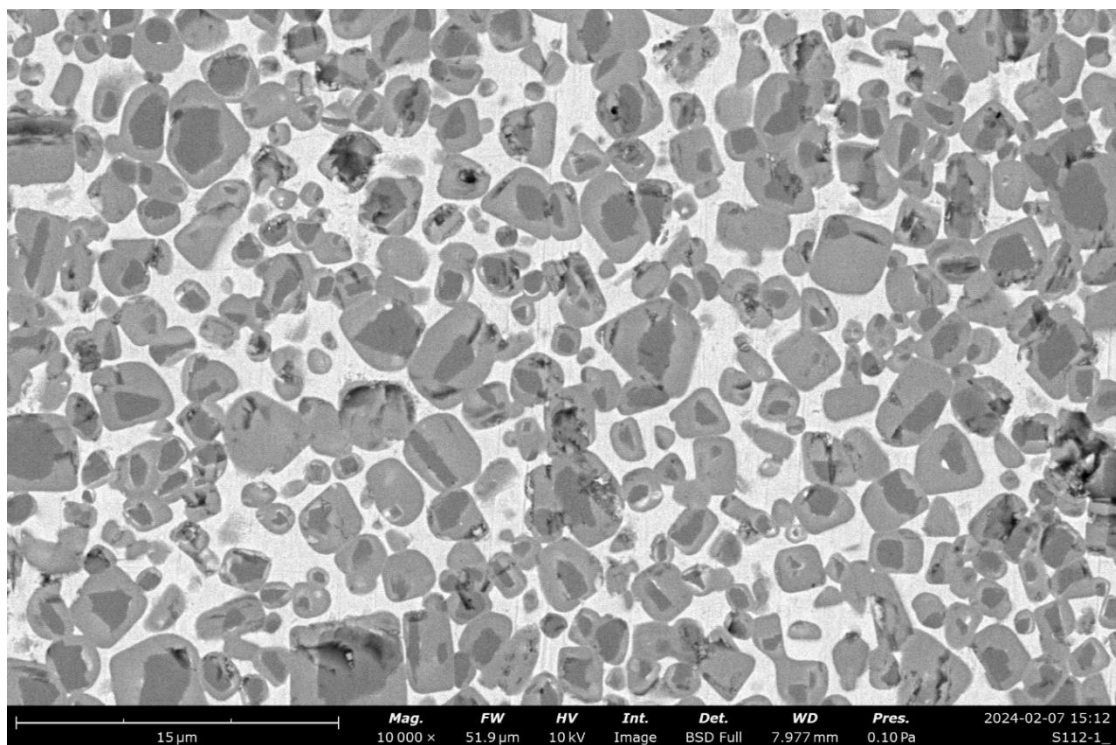
Joonis 3.9. Materjali S110 mikrostruktuur

S111 on keemiliselt koostiselt võrreldav S110-ga, erandiks on suurem molübdeenisisaldus. Terasuurus on üldjoontes keskmine-jäme, sest kuigi tavaliselt toimib molübdeen terakasvu inhibiitorina, siis mingist hetkest hakkab see avaldama vastupidist mõju. Poorsust sisuliselt ei esine. Terade piirid on kohati sirged ja terad on üksteisest sideainega eraldatud – lahknemisnurk on väiksem ehk märgamine on tänu suuremale molübdeenisisaldusele parem.



Joonis 3.10. Materjali S111 mikrostruktuur

S112 puhul on täheldatav titaankarbiiditerade veidi vähem ümar kuju võrreldes eelmiste materjalidega, mis on tõenäoliselt tingitud kroomi puudumisest sideaines. Terasuurus on peen-keskmise. Poorsust sisuliselt ei esine.



Joonis 3.11. Materjali S112 mikrostruktuur

3.3.3 Erosioonkulumise analüüs

Järgnevalt on välja toodud erosioonkulumiskatsete järgsed kõige intensiivsemalt kulunud aladest tehtud elektronmikroskoobipildid (topograafiline pilt vasakul ning tagasipeegeldunud elektronide detektori (BSD) pilt paremal) ning nende analüüs. Koostatud on graafikud illustreerimaks kulumise sõltuvust kõvadusest.

WCR1-9 (A1, A2) pind on kulunud ühtlaselt. Suuremad kraatrid puuduvad ehk materjal on olnud piisavalt ühtlane ja kulumisele hästi vastu pidanud tänu suhteliselt suurele kõvadusele ja peeneteralisele struktuurile. Topograafilisel pildil nähtav sile ala, mis paistab tagasipeegeldunud elektronide pildil tumedama laiguna, on materjali pinnale paiskunud liiv.

AV1-2 ja V116-3 (B1, B2 ja C1, C2) pind on kulunud ühtlaselt ja suuremad kraatrid puuduvad. Keskmise suurusega WC terad on jäänud terveks või sideaine seest välja löödud. Jämedad WC terad on murdunud pooleks ning neil teradel, mis on siiani sideaine sees, esineb pragunemist, mis viitab nende haprale purunemisele.

S108 (D1, D2) pind on kulunud ühtlaselt. Üldjoontes on WC terade pragunemist näha vaid keskmise suurusega teradel, väiksematel pragunemist näha ei ole. Kulumiskindluselt on tegemist ühe parema materjaliga siin võrdluses, olles kulunud vähem isegi WC-Co kermistest.

S43-7 (E1, E2) pinnal on näha, et submikroonse mikrostruktuuriga osa materjalist on kulunud suhteliselt ühtlaselt. Väga jämedad WC terad näivad aga olevat kildunud ning seal on kulumine vähem ettearvatav.

S72-3 (F1, F2) mikrostruktuuris on näha väga jämedate WC terade pragunemist ning poolitumist. Väiksematel teradel esineb pragunemist vähesemal määral, kõige väiksematel teradel ei ole pragunemist märgata.

S109 (G1, G2) puhul on näha nii terade pragunemist kui ka pooldumist. Lisaks on G1 vasakul keskel näha terve TiC tera eemaldumist pinnalt, mida iseloomustab võrreldes muu piirkonnaga suhteliselt terav piirjoon materjali sees. Sideaine paistab võrreldes WC-baasil materjalidega pildil rohkem säbrulisena ehk see on rohkem plastselt deformeerunud ning TiC terade vahelt osaliselt ka välja pressitud.

S110 (H1, H2) on oma kulumise iseloomult sarnane S109-le, näha on veidi rohkem TiC terade pragunemist ja pooldumist kildumise tulemusel.

S111 (I1, I2) materjalis on TiC terad pragunenud S109 ja S110-ga võrreldes vähem, peamine terade kahjustus on pooldumine kildumise tulemusel. I1 keskel on näha samasugust terava piirjoonega ala nagu G1-l, kust TiC tera on tervenisti välja löödud.

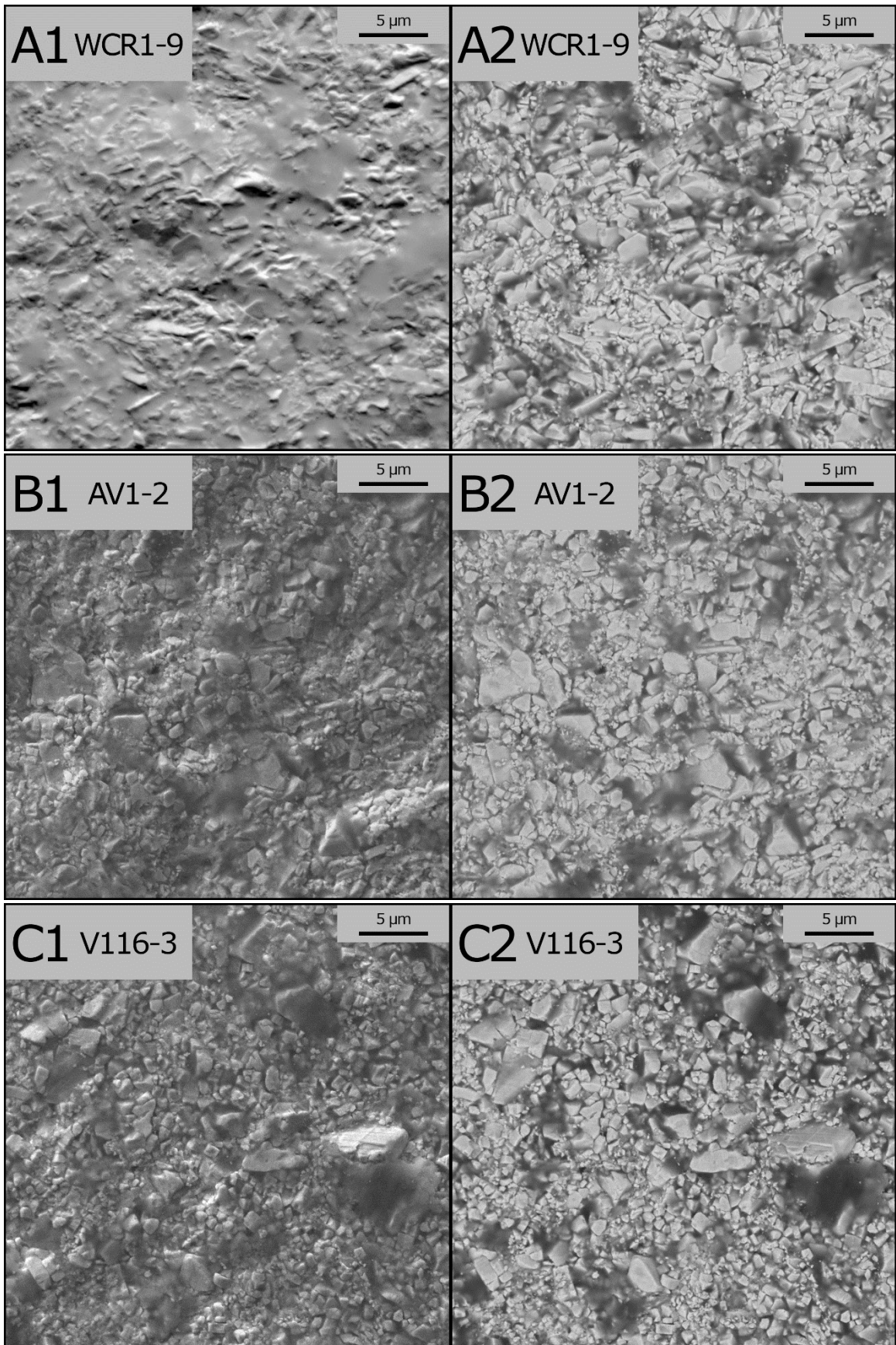
S112 (J1, J2) pinnal on võrreldes eelmiste TiC baasil materjalidega näha sügavamaid kulumise jälgi, mis on kooskõlas selle materjali väiksema kõvaduse ja suurema mahulise kulumisega.

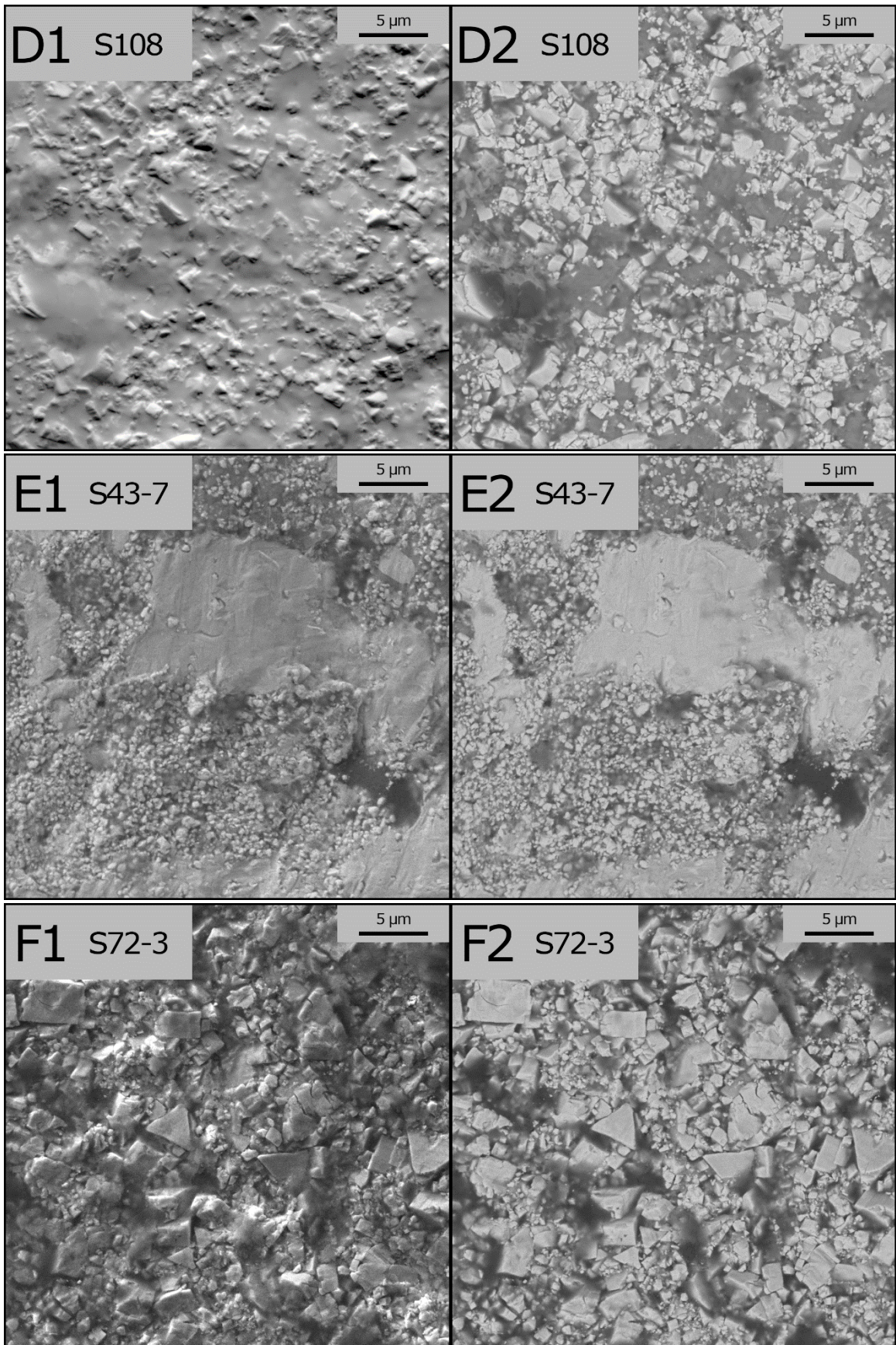
746-X2 (K1, K2) pinnal on samuti näha sügavamaid kulumise jälgi ning täheldatav on sideaine sulamine, mida iseloomustavad väikesed sideaine „pallikesed“ kulumisjälgede pinnal.

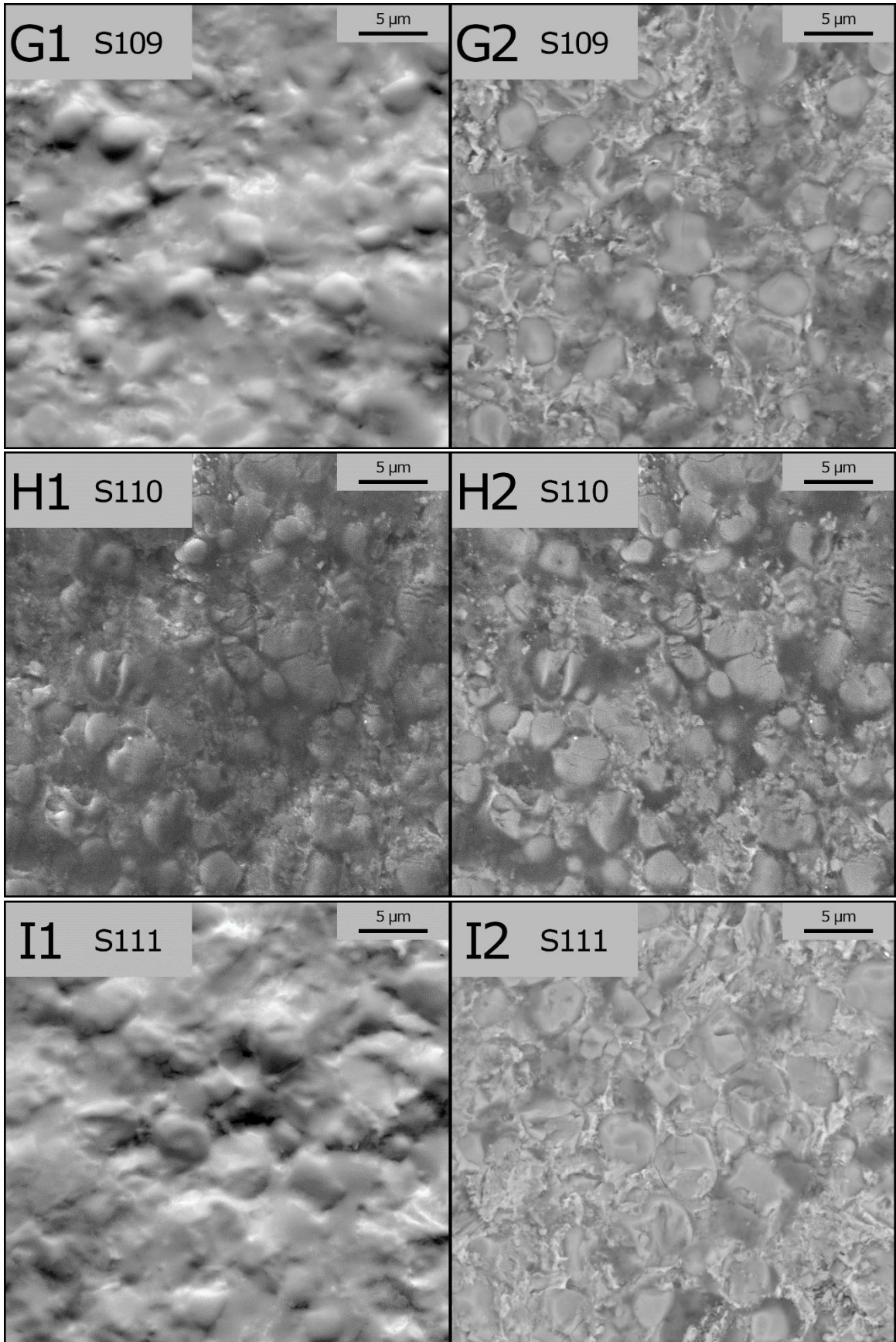
T(1) (L1, L2) on hea näide, miks kõvasulamites on eelistatud väiksem terasuurus: materjali pinnal asuvad väga jämedad TiC terad on kõik pragunenud ning pooldunud. Tegemist on siin välja toodud materjalidest kõige enam mahuliselt kulunuga.

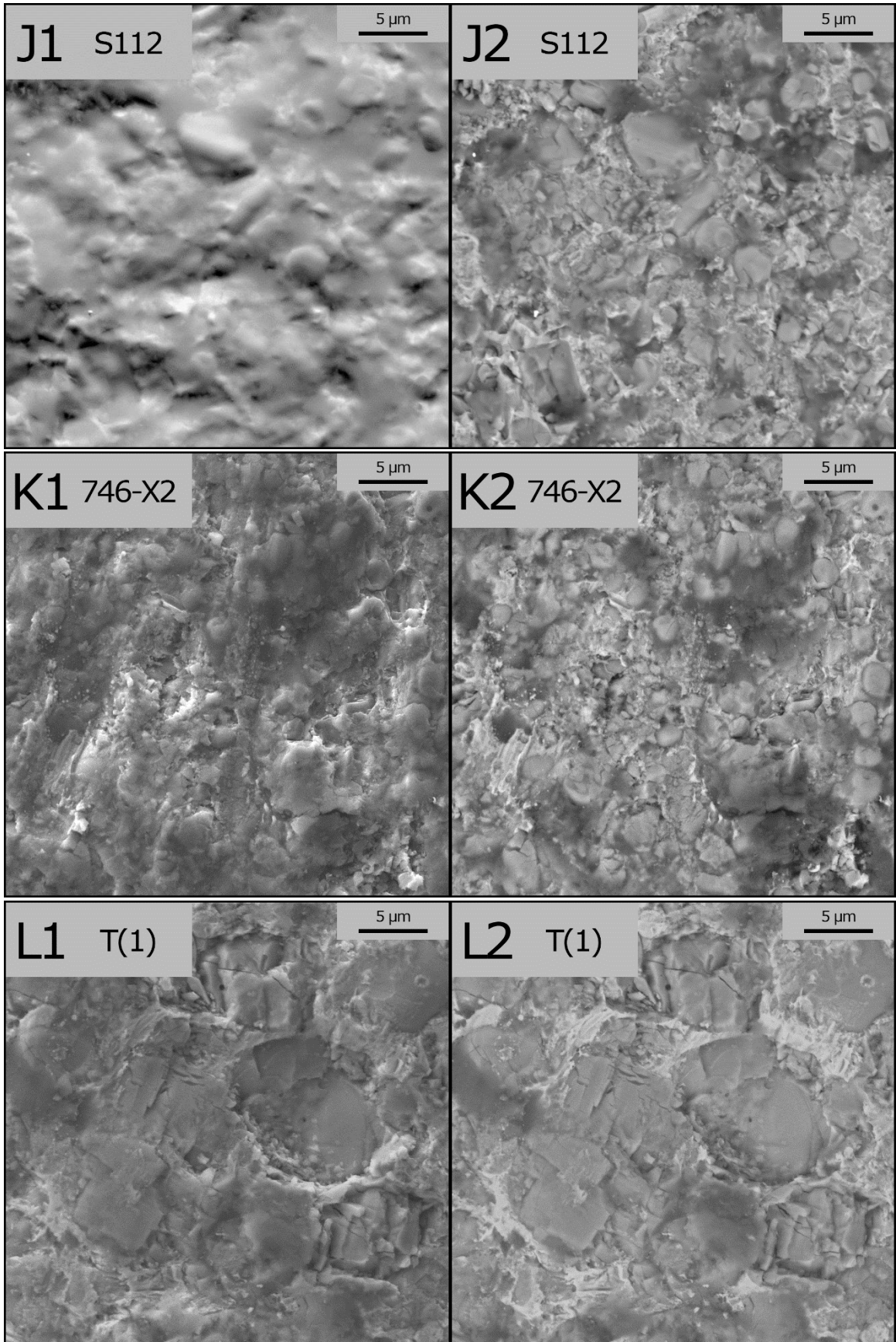
T(6) (M1, M2) puhul on taaskord näha suuremate TiC terade purunemist ja pragunemist, veidi väiksemad terad on üldjoontes tervemad.

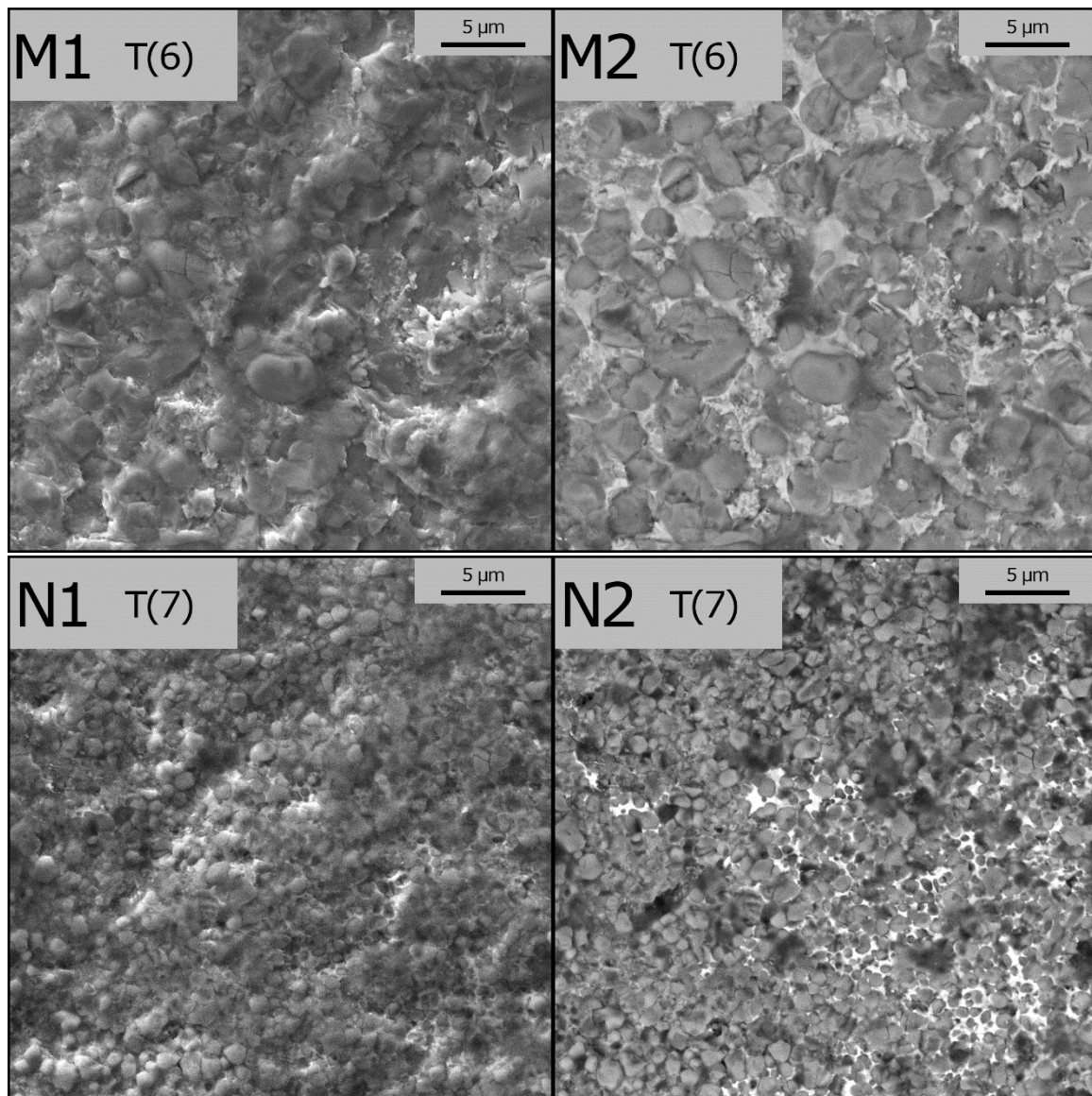
T(7) (N1, N2) näol on tegu kõige vähem mahuliselt kulunud materjaliga töö raames. Ühtlasi on tegu kõige peenema struktuuri ning suurema kõvadusega materjaliga. Heledamatel sideaine aladel tundub kulumine olevat olnud intensiivsem ning sealt tunduvad terad olevat tervenisti sideainest välja löödud.







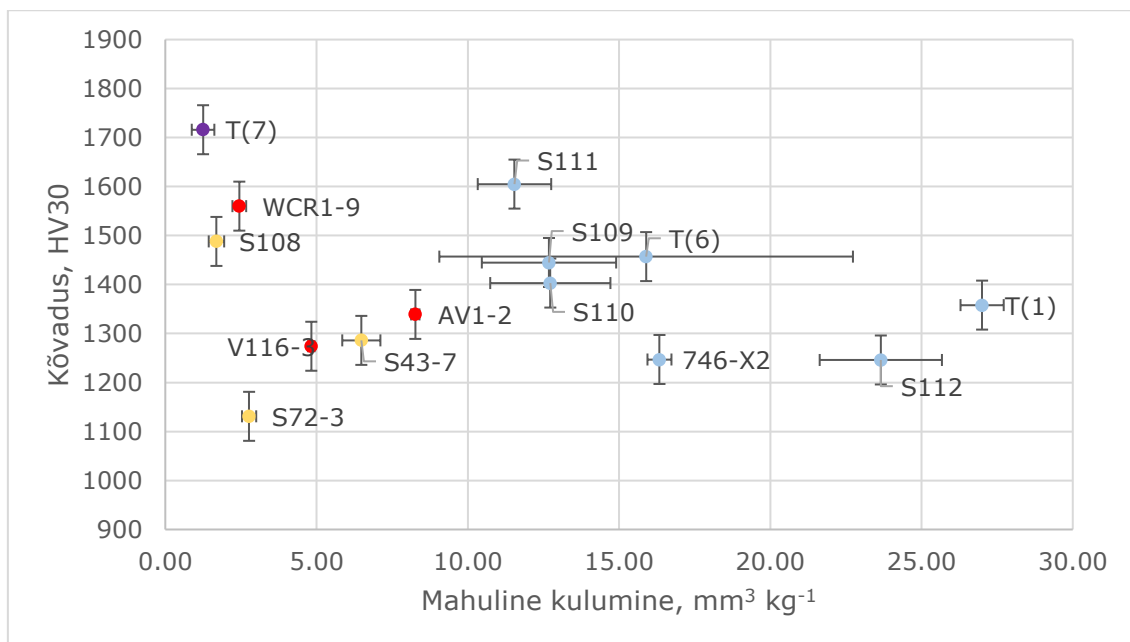




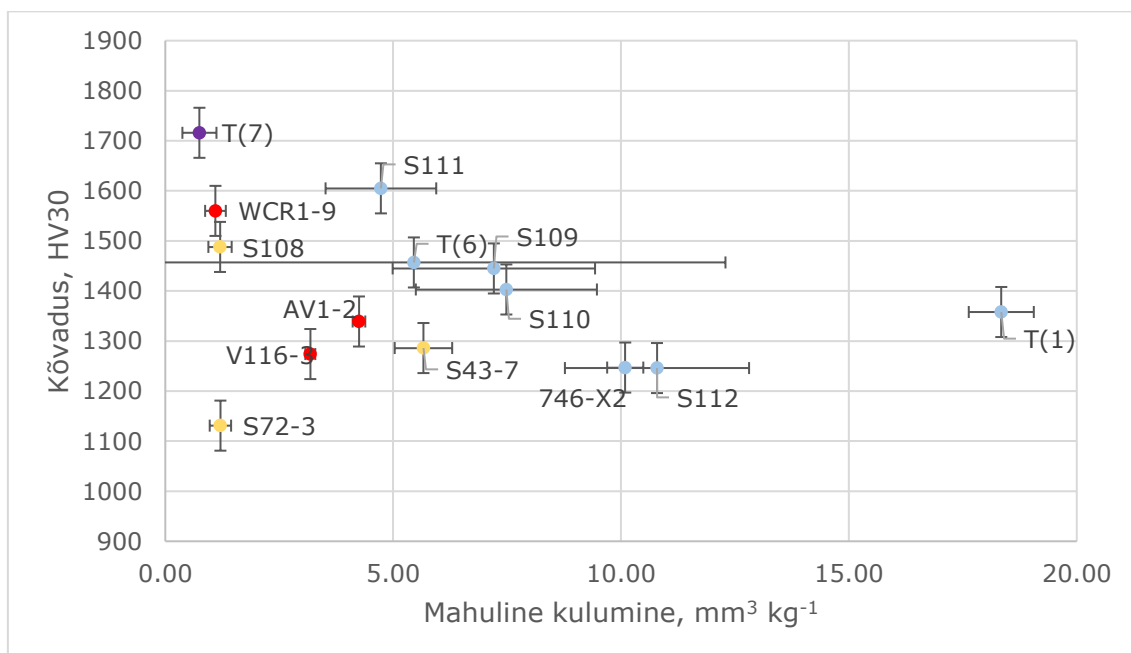
Joonis 3.12. Materjalide pind 90° erosioonkulutamise järel [Autori pilt] [Mart Viljus pilt]

Graafikutel 3.1 ja 3.2 on välja toodud keskmise mahulise kulumise sõltuvus materjali kõvadusest vastavalt 90° ja 30° alustega katsetamisel. WC-Co materjalid on tähistatud punaselt, TiC/TiCN baasil materjalid siniselt, WC-FeCr materjalid kollaselt ning TiCN-WC materjal lillalt. Graafikutelt on näha, et mõlema nurga korral kehtib sama seos: kõvaduse kasvades mahuline kulumine väheneb ja vastupidi. Kõige vähem on kulunud eksperimentaalne materjal tähisega T(7), mille kõva faas on segu volframkarbiidist ja titaankarbonitriidist. Sellel materjalil on ühtlasi kõige suurem kõvadus. Väga head kulumiskindlust näitab S108 ehk volframkarbiid kermis 25 massiprotsendilise raudkroom sideainesisaldusega, olles kulunud vähem kõikidest võrdluses kasutatud WC-Co kermistest. S108 puhul on täheldatav ka see, et ta on kulunud vähem ka temast veidi kõvemast WC-Co kermisest. TiC ja TiCN baasil kermised jäävad kõik kulumiselt alla WC baasil kermistele, sõltumata nende kõvadusest ja sideainest. Märkatav vahe kulumises

on aga materjalidel S109 ja T(1), mis on keemiliselt koostiselt väga sarnased, erinevus on nitriidi olemasolu T(1) materjalis. S109 on küll veidi kõvem (>100 HV), kuid kulunud ligi kaks korda vähem, suure tõenäosusega on põhjus T(1) väga jämedates terades. T(6) materjali kulumise suurem mõõtemääramatus on tingitud katsekeha serva kildumisest selle eemaldamisel katseseadmest pärast viimast kulutamiskatset.



Graafik 3.1. Mahulise kulumise sõltuvus kõvadusest erosioonkulutamise tulemusel (tabamisnurk $\alpha = 90^\circ$)



Graafik 3.2. Mahulise kulumise sõltuvus kõvadusest erosioonkulutamise tulemusel (tabamisnurk $\alpha = 30^\circ$)

3.3.4 Kulumismehhanismi uurimine

Kulumise mehhanismi täpsemaks hindamiseks viidi autori poolt läbi viies erosioonkulutamise katseseeria, mille tulemusel oli võimalik vaadelda üksikute liivaosakeste poolt tekitatud deformatsioone katsekehade siledal pinnal. Järgnevalt on esitatud katsetatud materjalide elektronmikroskoobipildid (topograafiline pilt vasakul ning tagasipeegeldunud elektronide detektori (BSD) pilt paremal) ning nende iseloomustused. Piltidel on noolega näidatud materjalipinda tabanud liivaosakeste liikumissuund.

WCR1-9 (A1, A2) pinnal on väga kerged kulumisjäljed. Pinna purunemine on olnud eelkõige habras, sest abrasiivosakeste tabamisjäljel puuduvad vaod. Kahjustuse mehhanism on kooskõlas materjali kõrge kõvadusega. WC terades purunemisjälgi märgata ei ole.

AV1-2 (B1, B2) pinnal on samuti väga kerged kulumisjäljed. Tabamisjälgede ümbruses on näha õrnad vaod materjalis abrasiivi liikumise suunas ning võrreldes WCR1-9 on kõvadus madalam. WC terades purunemisjälgi märgata ei ole.

V116-3 (C1, C2) puhul on märgata suuremaid ja sügavamaid kulumisjälgi, mis antud katsetuste raames liigituvad keskmisteks. Materjalil on jällegi väiksem kõvadus eelneva kahega võrreldes ehk abrasiivosakesed on tunginud sügavamale materjali sisse. C2 pildil on tabamisjälje sees märgata sulanud sideaine „pallikesi“ ja „niresid“. WC terades purunemisjälgi pigem ei ole, küll aga on nähtavad praod sideaines C2 pildi keskosas.

S108 (D1, D2) pinnal on kerged kulumisjäljed. Tabamisjälgede ümbruses vagusid näha pole ehk purunemist võib pidada eelkõige hapraks. WC terades purunemisjälgi märgata ei ole, terad on sideainest lihtsalt välja löödud.

S43-7 (E1, E2) on kulunud keskmiselt. Näha on suurema tabamuse saanud ala, kus abrasiivosake on lõiganud materjali pinda suurema vao. Materjali submikroonsetel teradel purunemise märke näha ei ole. Jämedatel teradel on aga selgelt näha pragusid (E2), mis levivad osaliselt ka sideainesse. Lisaks on toimunud nii sideaine kui ka jämedate terade sulamine.

S72-3 (F1, F2) kulumine on keskmine ning võrreldav V116-3 materjaliga. Kuigi tegemist on V116-3 väiksema kõvadusega materjaliga, on tabamisjäljed veidi vähem sügavad. WC terades esineb pragusid.

S109 (G1, G2) on kulunud raskelt, kuigi selle kõvadus on võrreldav vähe kulunud S108 materjaliga. Tabamuse saanud piirkonnas (G2 all vasakul) on kõva faasi terad pooleks murdunud ja pragunenud, kuid praod ei ole levinud sideaine sisse. Sideaine on pressitud TiC terade vahelt välja ning ühtlasi sulanud.

S110 (H1, H2) on raskelt kulunud. Materjalist on löödud välja suurem tükk, millele viitavad sileda pinnaga TiC terad (H1 ja H2 all keskel). Samaaegselt on toimunud terade pragunemine ja sideaine välja pressimine ja sulamine.

S111 (I1, I2) on võrreldav S110 materjaliga, kuid suurema tüki korraga eemaldumist ei ole toimunud. Võrreldes S110 on S111 kõvadus suurem 200 HV võrra.

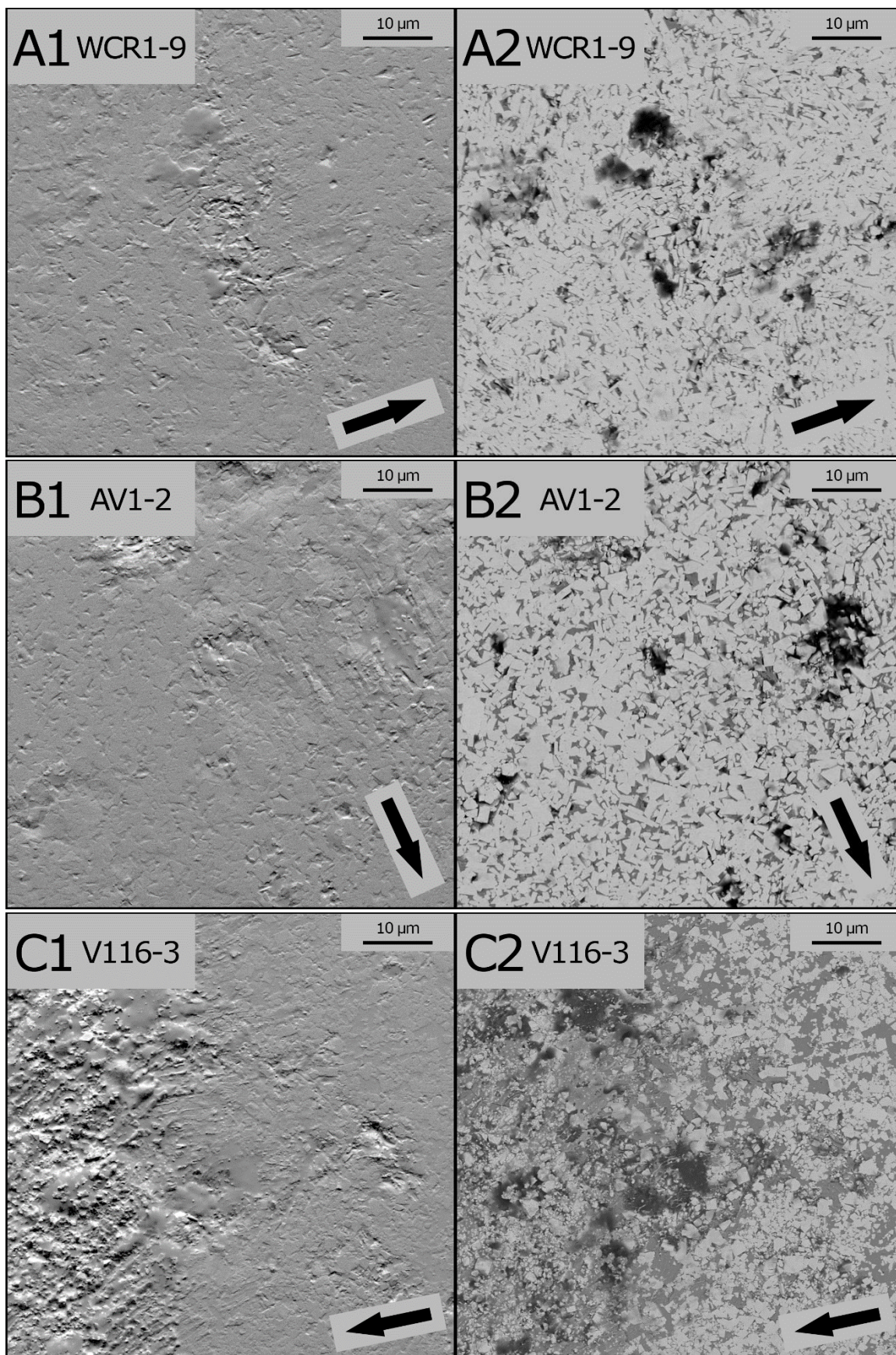
S112 (J1, J2) on raskelt kulunud. TiC terad on pragunenud ja pooleks murdunud, praod näivad kohati levivat sideaine sisse, mis on tabamise piirkonnas sulanud.

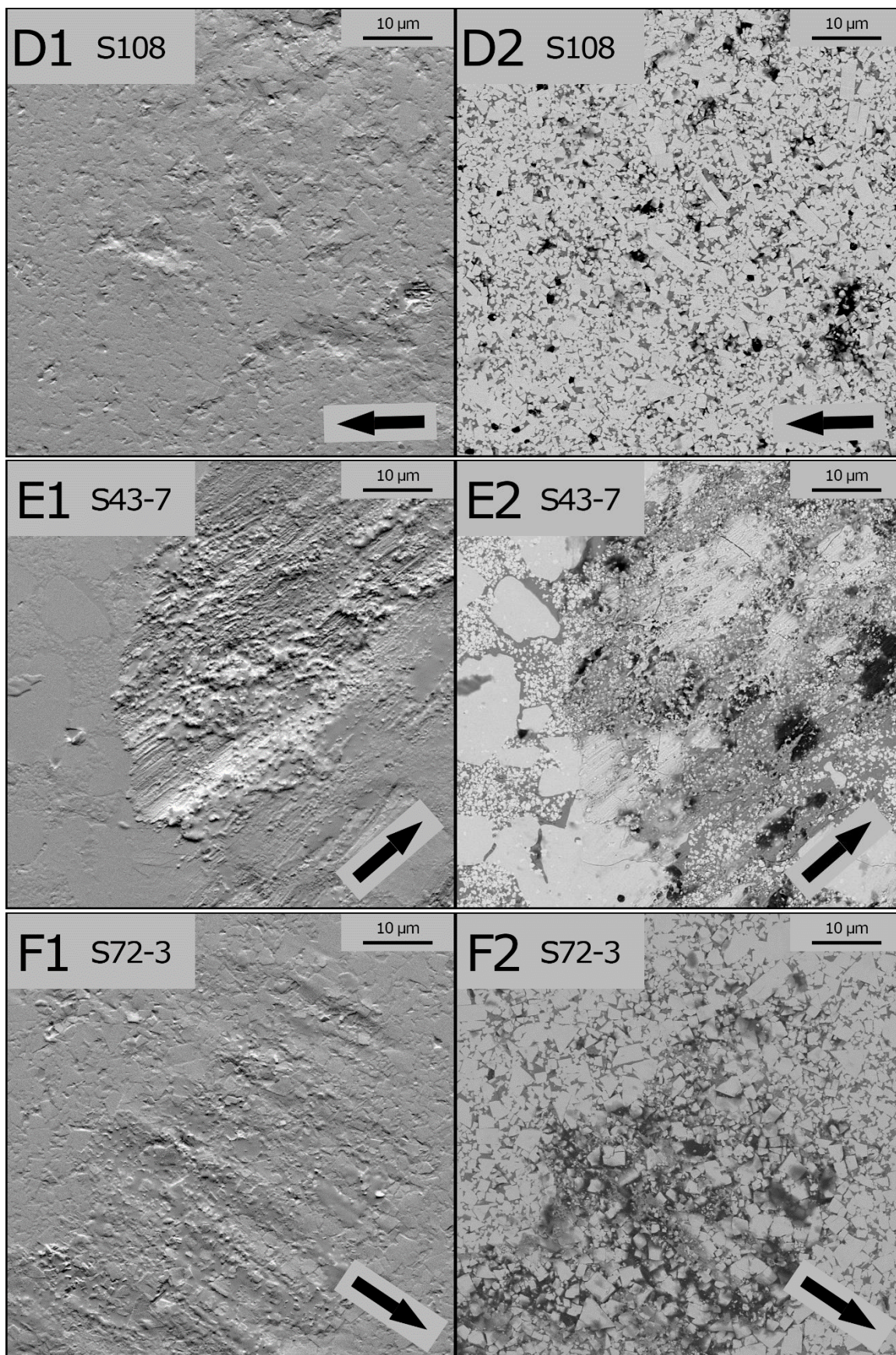
746-X2 (K1, K2) on raskelt kulunud. Kulumine ja kõvadus on väga sarnased S112, TiC terades on praod, mis levivad kohati läbi mitme tera. Sideaine on sulanud.

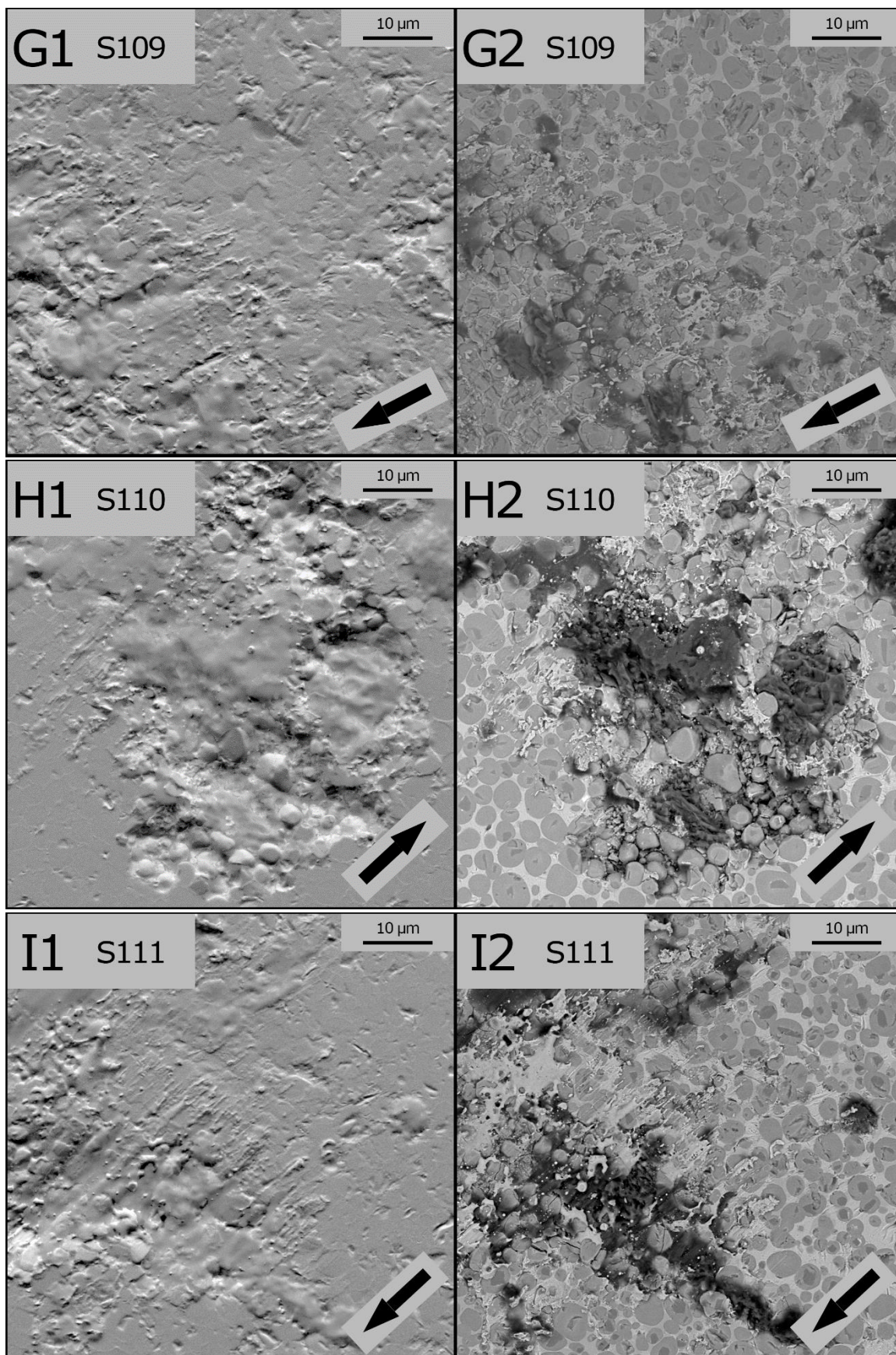
T(1) (L1, L2) on raskelt kulunud, millele on suuresti kaasa aidanud väga jäme terasuurus. Üksikud terad on tabamisjälje keskel täielikult pragunenud ning sideaine on nende vahelt välja pressitud.

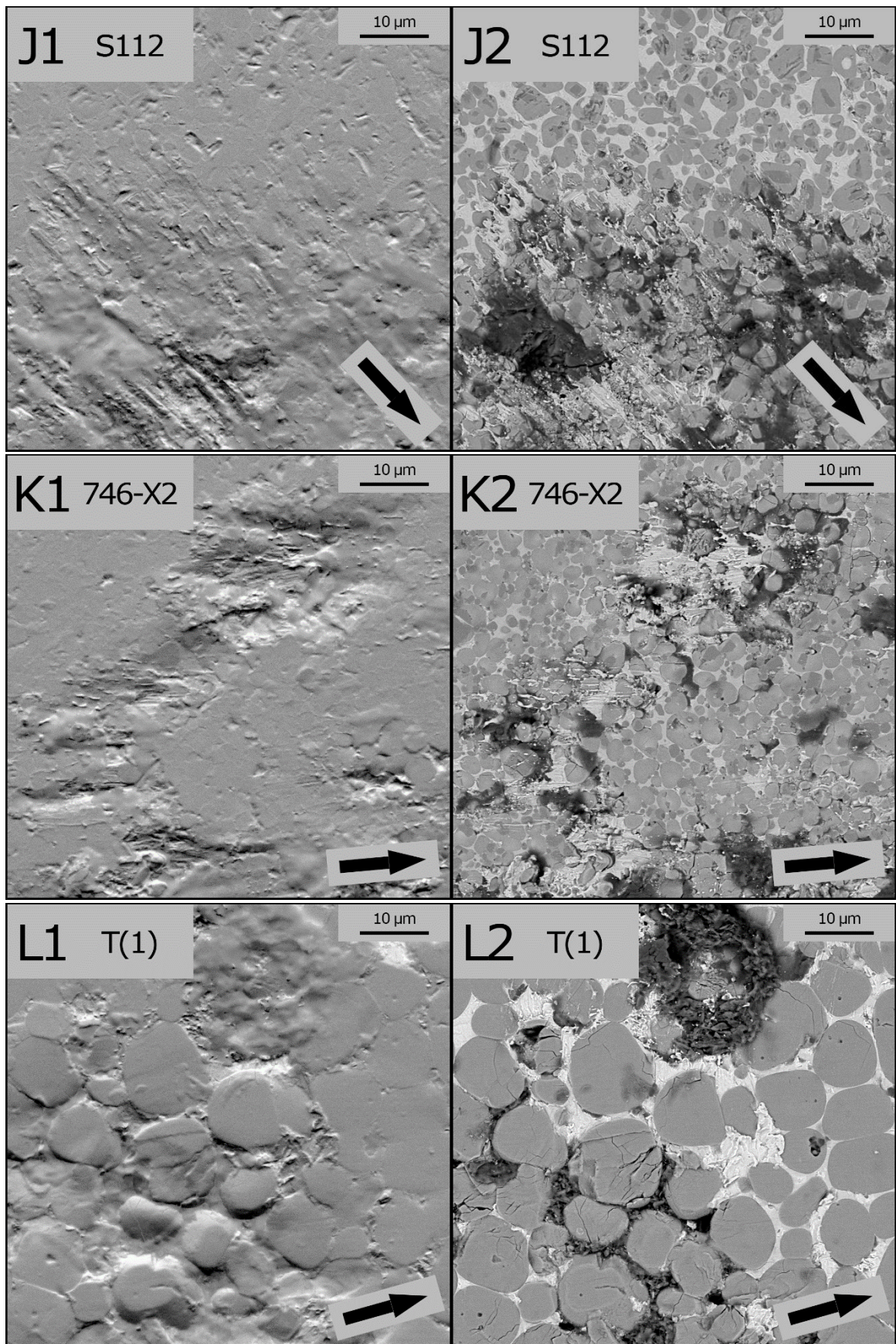
T(6) (M1, M2) on raskelt kulunud. Tabamisjälje sees on näha, kuidas suurem tükk materjalist on välja löödud, kusjuures näib, et kohati on eraldunud TiC terad tervelt ja kohati murdunud pooleks. Praod on nähtavad kogu jälje ulatuses ning läbivad kohati sideainet.

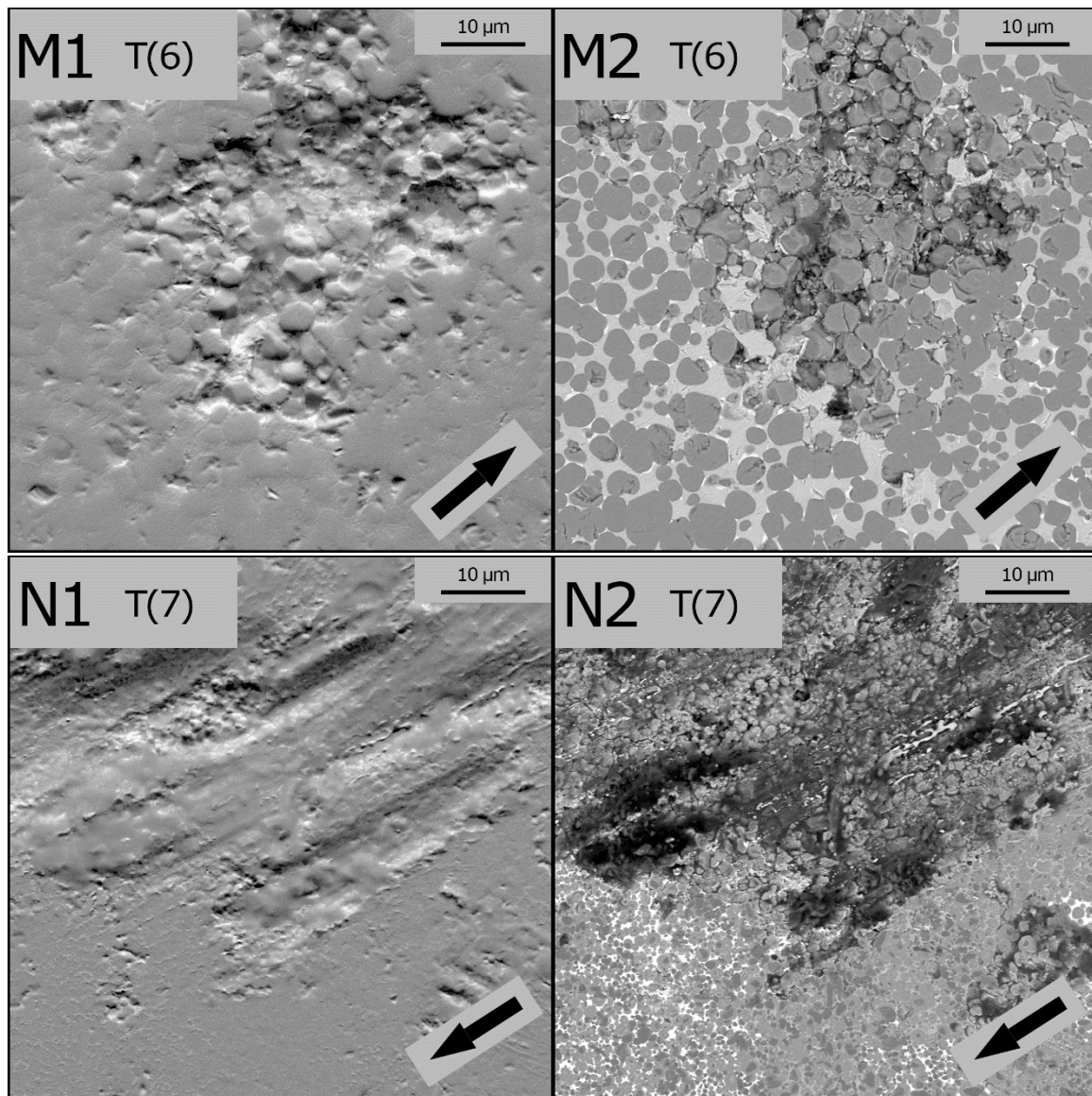
T(7) (N1, N2) on kulunud raskelt, vaatamata kõrgele kõvadusele (1716 HV). Tabamisjäljes on näha vagusid abrasiivi liikumise suunas ning sideaine sulamist. Peentes terades on jälje ümbruses näha pragusid, mis levivad edasi sideainesse ja liiguvad submikroonsete terade vahelt läbi.











Joonis 3.13. Kulumisjäljed katsetatud materjalide pindadel [Autori pilt]

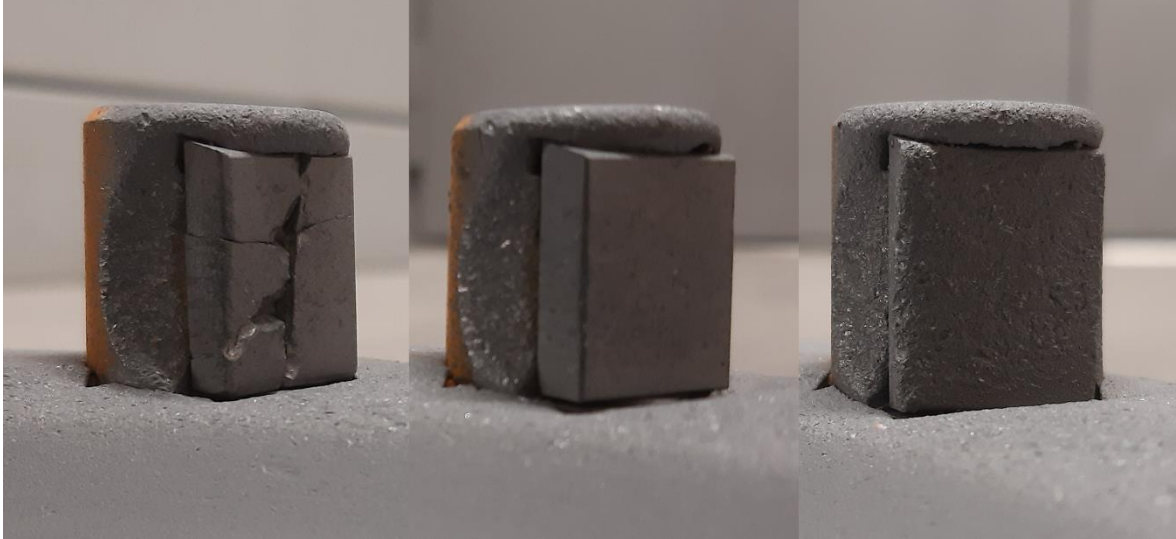
3.3.5 Löökkulumise analüüs

Löökkulutamiskatsete tulemusel purunesid kokku neli katsekeha. Esimese katse käigus purunesid S109 ja T(6) ning teisel katsel S110 ja S43-7. Kolmandal katsel ühtegi täielikku purunemist ei toimunud. Väga konkreetset ühist nimetajat purunenud materjalide puhul ei esine, v.a jämedate terade olemasolu mikrostruktuuris. Samas ei saa seda kindlalt pidada purunemise põhjuseks, sest ülejäänud viis materjali, mille mikrostruktuuris esines jämedaid terasid (AV1-2, S72-3, S111, 746-X2, T(1)), ei purunenud katsete käigus. T(6) katsekeha purunemisele võis kaasa aidata asjaolu, et see katsekeha oli teistest ligikaudu poole õhem.

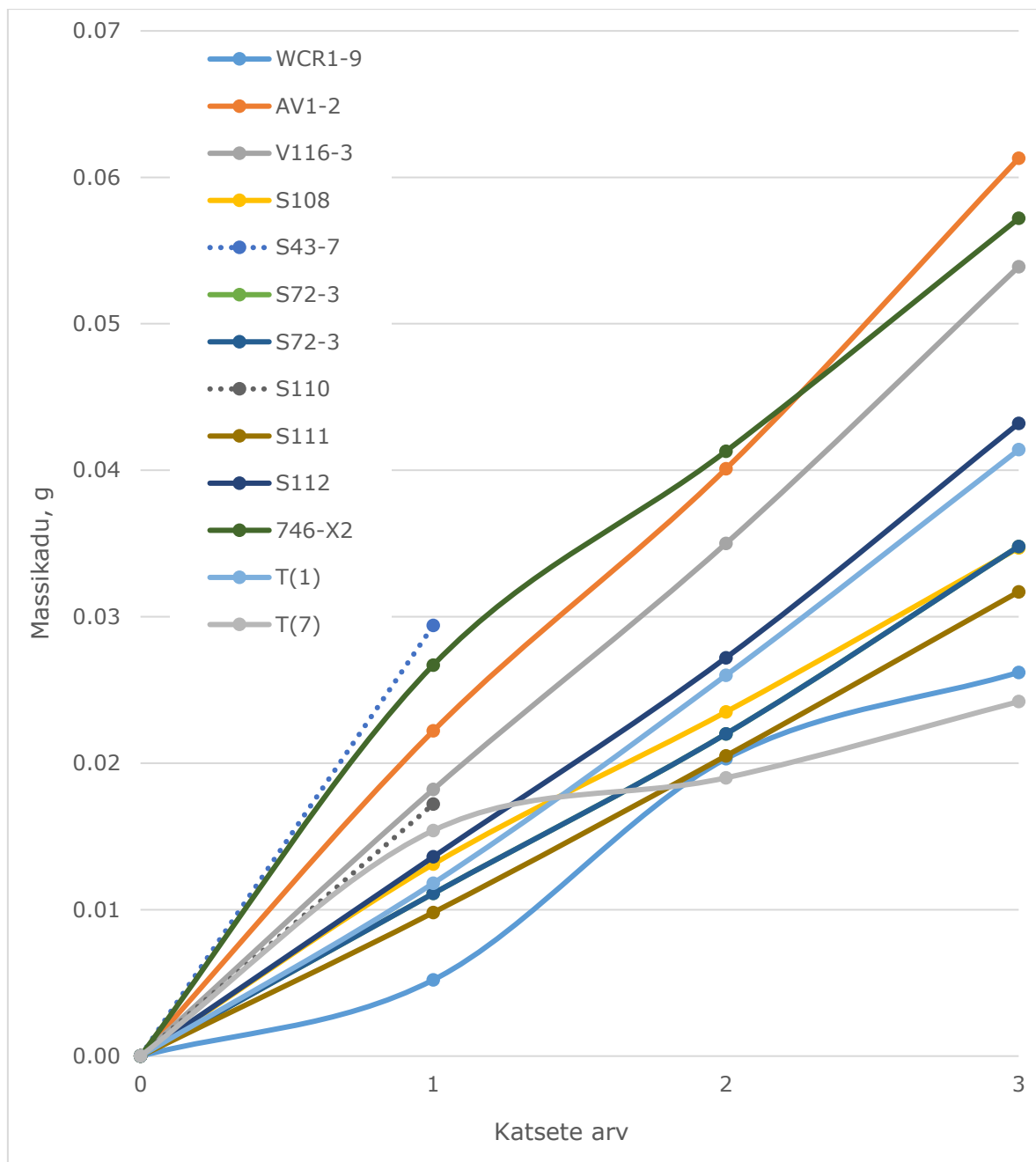
Katsete vältel terveks jäänud katsekehade puhul on täheldatav, et seos massikao ja katsete arvu vahel on sisuliselt kõikide materjalide puhul lineaarne (graafik 3.3).

Eranditeks on WCR1-9, mille kulumine oli esimesel katsel teistest materjalidest märgatavalt väiksem, kuid pärast seda normaliseerus, ja T(7), mis kulus esimesel katsel teistega võrreldes keskmiselt, kuid kolme katse arvestuses kõige vähem.

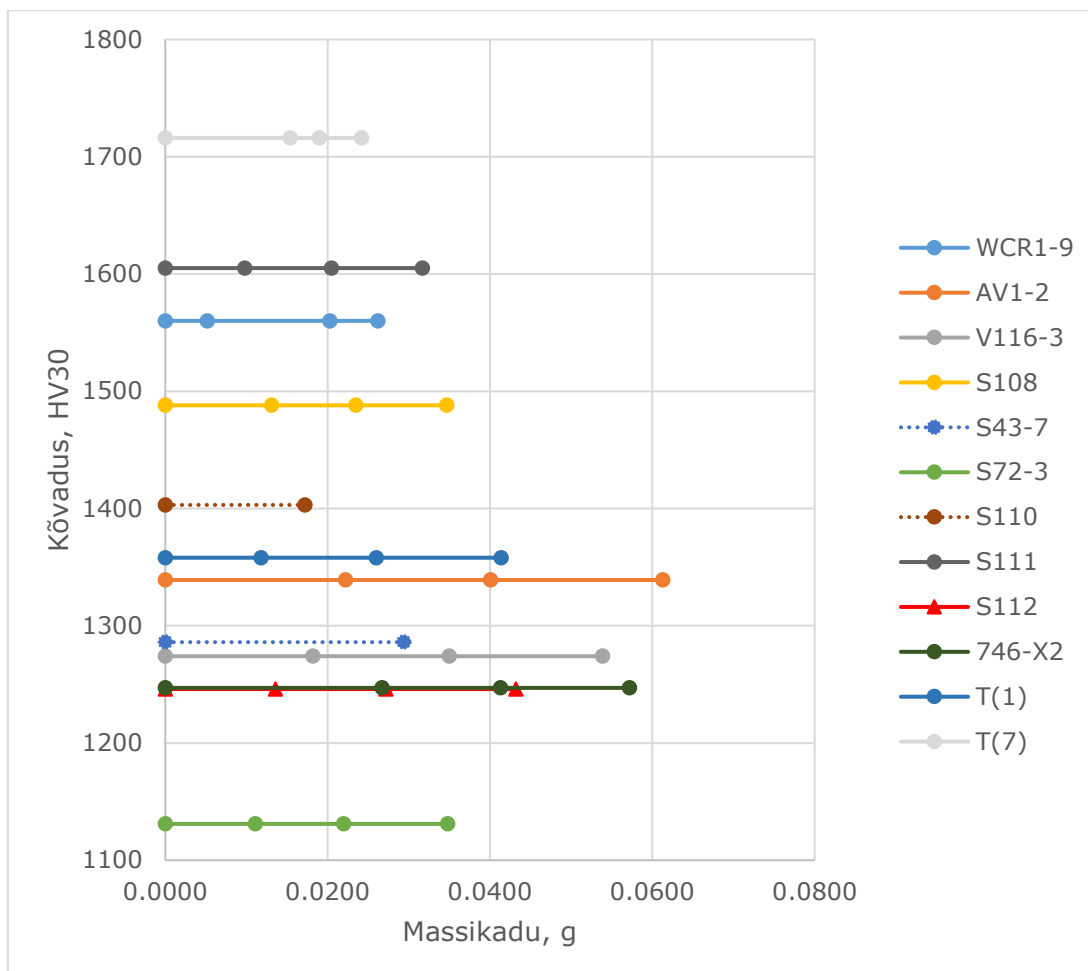
Kui vaadelda katsekehade massikadu seoses materjalide kõvadusega (graafik 3.4), on näha, et suurim massikadu on materjalidel, mille kõvadus on 1300 ± 100 HV30.



Joonis 3.14. Erinevate katsekehade pind pärast teist löökkulutamiskatset [Dmitri Goljandin foto]



Graafik 3.3. Massikadu löökkulutamise tulemusel



Graafik 3.4. Massikadu seoses materjali kõvadusega. Punktide joontel on massikaod pärast erinevaid katsetusi.

3.4 Järeldused

Erosioonkulumiskatsete käigus näitasid suuremat kulumiskindlust materjalid, milles oli kõva faasina kasutusel volframkarbiid ning neil materjalidel esinesid kulumismehhanismi uurimisel väikseimad kahjustused. 90° alustega katsetes jäi WC sisaldavate kermiste mahuline kulumine kilogrammi abrasiivi kohta vahemikku 1,25-8,26 mm³ kg⁻¹ ning TiC ja TiCN sisaldavatel kermistel vahemikku 11,54-27,0 mm³ kg⁻¹. 30° alustega katsetes olid vahemikud vastavalt 0,75-5,66 mm³ kg⁻¹ ja 4,73-18,34 mm³ kg⁻¹. Kulutamise tulemused vastavad teooriale, mille kohaselt kuluvad kõvemad materjalid intensiivsemalt just 90° tabamisnurga puhul. Antud töö raames katsetatud materjalide puhul kehtib üldjoontes ka seos, et suurema kõvadusega materjalid on kulumiskindlamad, kuid oluline on märkida, et sellise seose loomisel on vaadeldud materjale klasside kaupa (graafikutel 3.1 ja 3.2: WC-Co – punane, TiC/TiCN – sinine, WC-FeCr – kollane, TiCN-WC – lilla).

Raud-kroom sideainega kermiste kulumiskindlus varieerus märgatavalt, sõltudes enamjaolt kõva faasi materjalist. Suurima kulumiskindlusega raud-kroom sideainega materjal oli S108, olles kulunud vähem ka kõikidest võrdluses kasutatud WC-Co kermistest, s.h suurema kõvadusega WC-Co kermisest WCR1-9. Seega oleks järgnevalt mõttekas uurida S108 sarnaste valmistamisparameetrite ja keemilise koostisega raud-kroom sideainega kermiseid. Samuti tasuks edaspidi uurida WC ja TiCN kombineeritud kõvade faasidega materjale, kuna antud töö raames näitas just selline materjal (T(7)) suurimat kulumiskindlust. TiC baasil materjalidest oli suurim kulumiskindlus materjalil S111, mis oli selles materjalide klassis ühtlasi suurima kõvadusega.

Sideaine kogus näib antud töö raames katsetatud materjalidest mõjutavat eelkõige WC-FeCr kermiseid (T(7), S108, S43-7): sideaine hulga vähenedes kulumiskindlus kasvas. Ülejäänud kermised erinesid liialt keemiliselt koostiselt, et sideaine koguse mõju kulumiskindlusele hinnata.

Terasuuruse ja kulumiskindluse vahel tugevat seost antud töö raames ei tekkinud ning selleks tuleks kaasata katsetesse suuremal hulgal erinevate terasuurustega materjale. Negatiivset mõju võib avaldada väga jäme terasuurus ($\geq 10 \mu\text{m}$), mis on täheldatav T(1) materjali puhul.

Kulumismehhanismi uurides selgus, et enamikel materjalidel põhjustab abrasiivosakese tabamus materjali sulamist, mida on dokumenteeritud ka varasemates erosioonkulumise uuringutes [17]. Lisaks oli kulumismehhanismi uurides võimalik tuvastada, et kõva faasi terad pragunevad tõenäolisemalt üle keskmise ($> 1,3 \mu\text{m}$) terasuuruse korral. Väiksemate terasuuruste korral oli kohati märgata pragude levimist sideaines terade vahel. Kulumismehhanismi uuringu kohaselt oli vähe kulunud materjalide ühine nimetaja WC kõva faas, keskmiselt kulunud materjalide ühine nimetaja WC kõva faas ja kõvadus $\sim 1300 \text{ HV}_{30}$ ning raskelt kulunud materjalide ühine nimetaja oli TiC kõva faas.

Löökkulutamise tulemusel purunesid esimesel ja teisel katsel kokku neli materjali, mille mikrostruktuur sisaldas jämedaid terasid. Küll aga ei saa seda kindlalt pidada purunemise põhjuseks, sest ülejäänud viis materjali, mille mikrostruktuuris esines jämedaid terasid, ei purunenud katsete käigus. Antud töö raames teostatud kolme löökkulutamiskatse põhjal võib väita, et kermiste löökkulumisel on seos massikao ja katsete arvu vahel enamikel juhtudel lineaarne. Samuti selgus antud töös, et suurim massikadu löökkulutamisel esines kermistel, mille kõvadus on $1300 \pm 100 \text{ HV}_{30}$.

4. KATSEKEHADE HOIDJA PROJEKTEERIMINE

Selles peatükis käsitletakse katsekehade hoidja (edaspidi ka rakis) projekteerimist magnetplaadiga tasalihvpingile manuaalse lihvimismasina FSM 480 (Knuth) näitel. Välja tuuakse rakisele seatud nõuded ning põhimõtted, millest projekteerimisel lähtuti. Kirjeldatud on rakise testimine ning välja toodud sellele antud hinnang Pulbermetallurgia Labori juhataja teadur Marek Tarraste poolt.

4.1 Probleemi kirjeldus ja aktuaalsus

Enne 2024. aastat toimus Tallinna Tehnikaülikooli Pulbermetallurgia Laboris katsekehade ettevalmistav lihvimine käsitsi, käia abil. Sellel meetodil on aga mitmed puudused. Kuna töötlemine toimub tunnetuslikult, ei ole tulemused konstantsed, vaid varieeruvad, sõltudes näiteks jõust, millega katsekeha lihvketta vastu suruti. Samuti ei ole käsitsi töötlemisel tagatud katsekeha ja lihvketta paralleelsus, mistõttu võib katsekeha kuluda ebaühtlaselt. Katsekehade mõõtmed on reeglina vahemikus 21 mm x 13 mm x 4 mm kuni 27 mm x 18 mm x 5 mm ning nende töötlemisel ei kasutata tavaliselt tange või muid abivahendeid, vaid neid hoitakse kinni sõrmedega. Seega on spetsiaalse rakise loomine oluline ka töötlemise läbiviija seisukohalt, et tagatud oleks maksimaalne võimalik ohutus.

Pulbermetallurgia Laboris seati 2024. aasta alguses üles manuaalne lihvimismasin FSM 480 (Knuth) (joonis 4.1). Masina tööala suurus on 210 mm x 450 mm x 450 mm. Lihvketta ja töölauda asendit saab muuta käsitsi, pöörates kolme erinevat reguleerimisratast. Lihvimise paralleelsus on 0,005 mm / 300 mm. Töödeldavat detaili on võimalik jahutada jahutusvedelikuga ning lihvimistolmu eemaldamiseks on olemas väljatõmbesüsteem. Detaili tööpinki kinnitamiseks on töölauale paigaldatud magnetiline kinnitusplaat mõõtmetega 125 mm x 300 mm (joonis 4.2) [18].

Kuna Tallinna Tehnikaülikooli Pulbermetallurgia Laboris enamkatsetatavad katsekehad ei ole magnetilised, on nende kinnitamiseks lihvimismasinasse vaja projekteerida ning valmistada spetsiaalne rakis, mis kinnitub magnetilise kinnitusplaadi külge.



Joonis 4.1. Manuaalne lihvimismasin FSM 480 (Knuth) [18]



Joonis 4.2. Knuth FSM 480 lihvimismasina magnetiline kinnitusplaat [18]

4.2 Rakise projekteerimine

Enne projekteerimise alustamist määrati kindlaks üldised kriteeriumid, mille järgi rakise konstruktsioon kujundada:

- Magnetilise kinnitusplaadi suurus – 125 mm x 300 mm
- Toorik suurusega 120 mm x 270 mm x 19 mm – vältimaks suuremat ajalist ning rahalist kulu, kasutati olemasolevat toormaterjali (S355 teras)
- Võimalik valmistada täielikult Tallinna Tehnikaülikooli siseselt, vältida keerukat geometriat

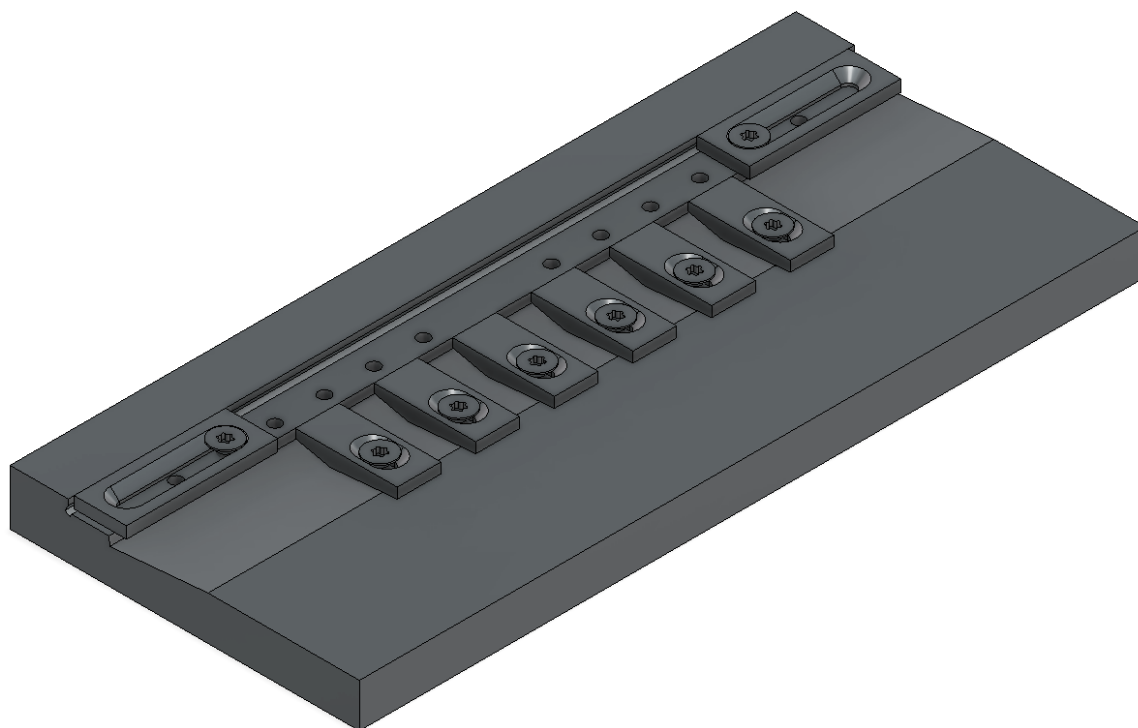
- Projekteerida rakis tootmismeetodipõhiselt ehk arvestada geomeetria kujundamisel valmistamismeetodiga (CNC freespink)
- Robustsus – võimalikult vähe liikuvaid osi ning peendetaile, sest töökeskkonnast ei toimu väga põhjalikku materjalitolmu eemaldamist
- Puuduvad väljaulatuvad osad – kõrgeimaks punktiks on katsekehade pealispind, põhjuseks kõrgem ohutus nii tööpingi kui operaatori suhtes
- Universaalsus mingi piirini – kuna katsekehade mõõtmed võivad sõltuvalt erinevate materjalide erinevast kahanemisest muutuda, siis suurim rakisesse kinnitav katsekeha on eelduslikult laiusena 18 mm ning väikseim 13 mm
- Katsekehade ebakorrapärane kuju – tihtipeale ei ole katsekehad pärast paagutamist enam korrapärase kujuga, nende pindadel võib esineda nõgusust
- Katsekehadele avaldatav jõud lihvimisketta poolt – katsekehad peavad püsima kogu protsessi vältel liikumatult paigal

Alustuseks mõtles autor, kuidas oleks kõige otstarbekam katsekehi rakisesse kinnitada. Esimene lahendus sarnanes oma olemuselt kruustangidele: katsekeha üks külg on toetatud rakise liikumatu osa poolt ning vastasküljel asub liikuv plaat, millele on võimalik avaldada jõudu, pingutades selle küljega risti asetsevat kruvi. Antud lahendus jäi aga kõrvale, sest oleks nõudnud keerukamat geomeetriat, mille peenemad osad oleks tõenäoliselt kiiresti materjalitolmuga täitunud ja seeläbi kasutamist raskendanud.

Teine idee oli jätta kruvid üldsegi välja ning lahendada katsekehade kinnitamine magnetplaadi poolt avaldatava jõuga. Autor mõtles kasutada kaldpindu, et muuta magneti poolt avaldatav vertikaalne jõud katsekehade suunal mõjuvaks horisontaaljõuks. Selline konstruktsioon oleks vähendanud liikuvate kehade arvu ning ühtlasi lihtsustanud ja kiirendanud rakise kasutamist, kuna kruvide pingutamine ei oleks enam olnud vajalik nende puudumise tõttu. Otsustavateks faktoriteks selle lahenduse puhul said asjaolud, et kaldpinnad oleks vajanud väga head pinnakvaliteeti, et tagada nende minimaalne hõõrdetakistus ning sellist tüüpi rakise valmistamine oleks olnud keerukam. Lisaks ei olnud autor kindel, kas magnetplaat suudab avaldada piisavalt suurt jõudu katsekehade adekvaatseks kinnitamiseks. Vastuse sellele küsimusele oleks andnud simulatsioon, kuid arvestades, et sellist rakist antud töö raames mõistlik valmistada ei oleks olnud, ei pidanud autor selle läbiviimist otstarbekaks.

Lõplik lahendus on hübriid kahest esimesest ideest, hõlmates nii kaldpindu kui ka kruve (joonis 4.3), vastates samal ajal püstitatud nõuetele. Katsekehad on otstest fikseeritud liigutatavate klambritega, mis kinnituvad ISO 10642 M5 12 mm kruvide abil alusplaadi külge ning millel on piisav liikumisvaru, et arvestada tavalisest pikemate või

lühemate katsekehadega. Samuti on võimalik valida, palju katsekehi korraga rakisesse kinnitada: minimaalselt üks ja tulenevalt konkreetse rakise suuruselt (määratud magnetplaadi suurusega), maksimaalselt 6. Iga katsekeha on omakorda fikseeritud eraldi klambriga (joonis 4.4), mis saab liikuda mööda kaldpinda ning mille pingutamiseks on kasutusel vertikaalsuunalised kruvid sama standardi ja mõõtmetega nagu otsaklambrite puhul. Kruvide pingutamisel hakkab klamber mööda kaldpinda allapoole liikuma ning see pressitakse vastu katsekeha. Klambrite külgsprofiil on suhteliselt lihtne ning klambrite valmistamisel saab töödelda selle profiiliga lati ning lõigata sellest klambrite pikkused tükid. Rakise alusplaat on sarnaselt lihtne profiil ning selle pikkust on võimalik kohandada vastavalt magnetplaadi suurusle. Klambrite pikkuse valikul arvestas autor sellega, et neid oleks fikseerimise ajal mugav kinni hoida ning vajadusel saaks neid hõlpsasti haamri abil katsekehade vastu koputada, kui kruvi poolt avaldatavast jõust ei peaks piisama. Katsekehade alune horisontaalpinna on laius 12,5 millimeetrit, mis tagab, et rakisesse on võimalik kinnitada ka kõige väiksema mõõduga katsekehi. Katsekehade ebakorrapärase kujuga arvestamiseks on nende aluse horisontaalpinna ning külje vastas oleva vertikaalpinna ristumiskohas süvend. Süvendi projekteerimisel arvestas autor, et see oleks tehtav üheainsa sirge freesimisoperatsiooniga. Sama põhimõtte on rakendatud ka alusplaadi kaldpinna ning katsekehadealuse serva puhul, kus autor vältis teravnurga tekkimist. Lihvimismasina ning operaatori ohutuse tagamiseks projekteeris autor rakise nii, et kõrgeim punkt asuks katsekehade pinnal. Katsekehade alusest on rakise pealispind 4 millimeetrit kõrgem ning kuna katsekehade nominaalne paksus on 5 millimeetrit ja lihvimise tasapinnalisus 0,005 mm / 300 mm, peaks varu 1 mm olema piisav, et vältida lihvketta ja rakise kokkupuudet. Tulenevalt katsekehade väikestest mõõtmetest ei ole selle varu projekteerimisel kuigi suurt mänguruumi, kuid vajadusel oleks võimalik seda suurendada, muutes veidi rakise alusplaadi ning klambrite geomeetriat. Arvestama peab seejuures, et tagatud oleks piisav kinnitusjõud. Katsekehade hoidja tehnilised joonised on leitavad Lisast 4.



Joonis 4.3. Lõpliku katsekehade hoidja esimene versioon [Autori kuvatõmmis]



Joonis 4.4. Hoidjasse kinnitatud katsekehad pärast lihvimist [Autori foto]

4.3 Rakise katsetamine

Rakis valmistati Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanika ja tööstustehnika instituudis Vadim Kokurini poolt ning selle katsetamine viidi autori poolt läbi Pulbermetallurgia Laboris. Katse jaoks kinnitati hoidjasse kaks nominaalsete mõõtmetega katsekeha (joonis 4.5) ning katsekehade klambrid pingutati momentvõtmega 3 Nm jõuga. Kinnitamise ajal koputati katsekehasid õrnalt vaskhaamriga, et need paigast ei nihkuks. Samuti koputati katsekehade klambreid vaskhaamriga katsekehade suunas. Otsaklambreid katsel ei kasutatud, sest need ei olnud veel valmis. Lihvimine toimus teemantkettaga ning korraga eemaldati katsekehalt ligikaudu 0,02 mm paksune pinnakiht.

Katse läbiti edukalt: katsekehad ja klambrid püsisid lihvimise käigus paigal ning sobiva pinnaviimistluse saamiseks kulus ühe katsekeha kohta vähem kui 10 minutit, mis on võrreldes käsitsi lihvimisega enam kui poole võrra lühem aeg. Katsekehade pindade paralleelsus jäi erinevatest punktist mõõtes 0,07 mm piiridesse, mis on hinnanguliselt kordades parem kui käsitsi lihvides (käsitsi lihvitud katsekehade paralleelsust ei ole mõõdetud). Kuna katsetamise ajal ei olnud rakis veel täielikult valmis ning puudus süvend katsekehadealuse horisontaalpinna ning külje vastas oleva vertikaalpinna ristumiskohas, ei saavutatud tõenäoliselt maksimaalset võimalikku paralleelsust.

Katsekehade klambrite poolt avaldatavat jõudu katsel ei mõõdetud, küll aga on see kruvide 3 Nm jõuga pingutades ja vaskhaamriga koputades suurem kui magnetplaadi poolt avaldatav jõud katsekehade hoidja alusele (käega lükates kinnitatud katsekehad ei liikunud, kuid hoidjat on võimalik magnetplaadi peal liigutada.) Magnetplaadi kinnitusjõud ei ole teada, sest tehniline dokumentatsioon puudub.



Joonis 4.5. Katsekehade hoidja lihvimismasinas FSM 480 (Knuth) [Autori foto]

4.4 Labori juhataja hinnang rakisele

Magistritöö raames projekteeriti katsekehade hoidja (rakis), et hõlbustada katsekehade ettevalmistamist erosioonkulumiskatsete jaoks. Erinevatest ajalistest ja muudest piirangutest tingituna ei valminud rakis selleks ajaks, kui oli vaja antud töös uuritud materjalidest katsekehasid valmistada. Töö esitamise ajaks oli rakis valmis ning esimesed katsetused erinevate kermiste lihvimisel kinnitasid, et rakis on töökindel ja kasutajasõbraliku geomeetriaga. Rakis on kasutatav ka tuleviku projektides, eriti olukorras, kus on vaja korraga ette valmistada rohkem kui 2-3 katsekeha. Seega, rakist kasutades tõuseb katsekehade lihvimise tootlikkus ja lisaks on täidetud paralleelsuse tingimus, mis on peamine nõue näiteks kõvaduse määramisel.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida raud-kroom sideainega kermiste kulumist, sest kuigi kermistes enim kasutatavad metallid volfram ja koobalt moodustavad väga heade omadustega komposiidi, on need siiski looduses suhteliselt haruldased ning nende saadavus on piiratud. Lisaks on nende kaevandamine ja töötlemine tervise- ja keskkonnaohtlik. Teadaolevalt on koobalt asendatav raud-kroomiga ning õigete valmistamisparameetrite korral on sellistel kermistel kõrged mehaanilised omadused, seni on aga raud-kroom sideainega kermiste kulumiskindlust uuritud vähesel määral. Töö alaeesmärkideks oli anda lühiülevaade kermiste valmistamise protsessist, valmistada raud-kroom sideainega materjalid, valmistada nendest materjalidest katsekehad, viia katsekehadele läbi kahte erinevat tüüpi kulutamiskatsed ning hinnata nende tulemusi ja projekteerida pulbermetallurgiliste katsekehade hoidja, mida saab kasutada magnetplaadiga tasalihvpinkides. Antud töös projekteeriti katsekehade hoidja lihvimismasina FSM 480 (Knuth) näitel.

Töö koosneb kolmest suuremast osast. Esimeses osas, kirjanduse ülevaates, tutvustati lühidalt kermiseid, nende valmistamisprotsessi, mehaanilisi omadusi ja kahte kulutamiskatse tüüpi (erosioon- ja löökkulutamist), mida eksperimentaalses osas rakendati. Teises, eksperimentaalses, osas valmistas autor viis erinevat raud-kroom sideainega kermist ning viis nii neile kui ka valimikule varem Tallinna Tehnikaülikoolis valmistatud sarnase keemilise koostisega kermistele läbi kulutamiskatsed, uuris nende materjalide mikrostruktuuri ning analüüsis tulemusi. Katsete põhjal tegi autor järeldused, et raud-kroom sideainega kermised võivad omada samaväärseid või paremaid kulumisomadusi koobalt sideainega kermistele ning suurimaks mõjutajaks on üldjuhul kõva faasi materjal (WC või TiC). Katsetes näitas suurimat kulumiskindlust kahte erinevat kõva faasi sisaldav kermis (WC ja TiCN). Üht suuremat kulumiskindlust näitas autori poolt valmistatud materjal S108 ehk 25 massiprotsendilise raud-kroom sideaine sisaldusega volframkarbiid kermis. Kolmandas osas on kirjeldatud pulbermetallurgiliste katsekehade hoidja projekteerimine manuaalsele lihvimismasinalle FSM 480 (Knuth). Hoidja projekteerimisel lähtus autor muu seas robustsusest, tootmismeetodipõhisusest ja tööpingi operaatori ohutusest. Hoidja valmistati Tallinna Tehnikaülikoolis Mehaanika ja tööstustehnika instituudis ning testiti autori poolt Pulbermetallurgia Laboris. Materjaliks valiti teras, et hoidja oleks kinnitatav lihvimismasina magnetplaadi külge. Nii autori kui juhendajate hinnangul vastas katsekehade hoidja püstitatud nõuetele. Autor oleks soovinud põhjalikumalt katsekehade hoidjat testida, kuid kahjuks valmis see liialt hilja autorist mitteolenevatel põhjustel.

Autor soovib tulevikus põhjalikumalt uurida raud-kroom sideainega kermiseid, mis on sarnaste valmistamisparameetrite ja keemilise koostisega nagu antud töös valmistatud materjal S108. Samuti võiks edaspidi uurida WC ja TiCN kombineeritud kõvade faasidega materjale, kuna antud töö raames näitas just selline materjal (T(7)) suurimat kulumiskindlust.

Autori hinnangul tuleks katsekehade hoidjale kindlasti freesida alapeatükis 4.3 mainitud süvend, mis tõenäoliselt parandaks veelgi rakises lihvitud katsekehade pindade paralleelsust. Samuti võiks katsekehade klambrid olla pikemad, et pingutamine oleks lihtsam.

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to investigate the wear of cermets with iron-chromium binder. While the most widely used metals in cermets, tungsten and cobalt, form a composite material with excellent mechanical properties, they are relatively rare in nature and their availability is limited. Furthermore, the mining and processing of both tungsten and cobalt is considered a health and environmental hazard. It is known that cobalt is replaceable by iron-chromium and with the right manufacturing parameters, such cermets can exhibit high mechanical properties. So far, the wear of cermets with iron-chromium binder has been studied to a limited extent. The subobjectives of the thesis were to give a short overview of manufacturing process of cermets, produce materials with an iron-chromium binder and make specimens of those materials, test the specimens for erosive and impact wear, evaluate the results and formulate conclusions, and design a holder of powder metallurgical specimens to be used in a surface-grinding machine with a magnetic clamping plate. In this thesis, the holder was designed to fit the manual surface-grinding machine FSM 480 (Knuth).

The thesis is comprised of three larger parts. First, in the literary review, a short overview of cermets, their manufacturing process, mechanical properties and two types of wear tests (erosion and impact) were given. In the second, experimental, part the author produced five different cermets with iron-chromium binder. Erosive and impact wear tests for those materials as well as a selection of materials with a similar chemical composition previously produced in Tallinn University of Technology were conducted. The author studied the microstructure and test results of the materials and concluded, that cermets with an iron-chromium binder may possess equivalent or superior wear resistant properties than those with cobalt binder. The most important factor influencing wear resistance was found to be the hard phase material (WC or TiC). In the tests, the highest wear resistance was shown by a cermet containing two different hard phases (WC and TiCN). S108, a tungsten carbide cermet with 25 mass percentage of iron-chromium binder that was manufactured by the author, also showed higher than average wear resistance. The third part focuses on the design of a holder of powder metallurgic specimens that is to be used in a manual grinding machine FSM 480 (Knuth). The author followed the principles of robustness, design for manufacturing and operator safety as well as many others. The holder was manufactured in Tallinn University of Technology Department of Mechanical and Industrial engineering and was made of steel as to be compatible with the magnetic clamping plate of the grinding machine. It was tested in Tallinn University of Technology Powder Metallurgy Laboratory by the author. Overall, the author and supervisors of the thesis found that the finished holder met the criteria established earlier. The author wishes, however, that the holder could have been

tested more thoroughly which was made impossible by the manufacturing delay unrelated to the author.

The author recommends to further study cermets with an iron-chromium binder that have similar manufacturing properties and chemical composition to the material S108 manufactured in this thesis. Furthermore, cermets with multiple combined hard phases (WC and TiCN) should be studied, as one of such materials (T(7)) exhibited the highest wear resistance in the tests conducted in this thesis.

The author insists that the finished version of the specimen holder must include a groove at the intersection between the vertical and horizontal surface against which the specimens are pressed, to further enhance the parallelism of the surfaces of the specimens. The specimen clamps should also be lengthened to simplify the attachment of the specimens to the holder.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. 2020. Vaadatud: 5. märts 2024. [Online]. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474>
- [2] A. A. Jensen ja F. Tüchsen, „Cobalt exposure and cancer risk“, Crit. Rev. Toxicol., kd 20, nr 6, lk 427–437, 1990, doi: 10.3109/10408449009029330.
- [3] J. Kübarsepp ja K. Juhani, „Cermets with Fe-alloy binder: A review“, Int. J. Refract. Met. Hard Mater., kd 92, lk 105290, nov 2020, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105290.
- [4] V. K. Sarin, D. Mari, ja L. Llanes, Toim, Comprehensive hard materials. Volume 1: Hardmetals. Amsterdam [etc.]: Elsevier, 2014.
- [5] H. Suzuki, Y. Fuke, ja K. Hayashi, „Grain Size of WC in Sintered WC-VC-Co Alloys“, J. Jpn. Soc. Powder Powder Metall., kd 19, nr 3, lk 106–112, 1972, doi: 10.2497/jjspm.19.106.
- [6] J. Kübarsepp, R. Veinthal, P. Kulu, A. Laansoo, ja T. Eikholm, Toim, Materjalitehnika: õpik kõrgkoolidele. I: Tehnomaterjalid. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2015.
- [7] „Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials“. Vaadatud: 28. aprill 2024. [Online]. Available at: <https://www.astm.org/e0384-10e02.html>
- [8] „Coefficient of Friction“, eMachineShop. Vaadatud: 8. märts 2024. [Online]. Available at: <https://www.emachineshop.com/coefficient-of-friction/>
- [9] R. M. German, Powder metallurgy science. Princeton, N.J: Metal Powder Industries Federation, 1984.
- [10] G. S. Upadhyaya, Cemented Tungsten Carbides: Production, Properties and Testing. William Andrew, 1998.
- [11] M. G. Gee ja M. J. Neale, „General approach and procedures for unlubricated sliding wear tests.“ Vaadatud: 14. mai 2024. [Online]. Available at: <https://eprintspublications.npl.co.uk/2546/>
- [12] I. Kleis ja P. Kulu, Solid particle erosion: occurrence, prediction and control. London: Springer, 2008.
- [13] M. Antonov, J. Pirso, A. Vallikivi, D. Goljandin, ja I. Hussainova, „The effect of fine erodent retained on the surface during erosion of metals, ceramics, plastic, rubber and hardmetal“, Wear, kd 354–355, lk 53–68, mai 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.02.018.
- [14] R. Tarbe, Abrasive impact wear: tester, wear and grindability studies =: Abrasiivlöökkulumine: seade, kulumise ja jahvatatavuse uuringud. Theses of Tallinn University of Technology. E, Thesis on mechanical and instrumental engineering = [Tallinna Tehnikaülikooli väitekirjad]. E, Masina- ja aparaadiehitus, no. 47. Tallinn: Tallinn University of Technology Press, 2009.
- [15] A. Mohammed ja A. Abdullah, „SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM): A REVIEW“.
- [16] „Scanning Electron Microscopy (SEM)“, Techniques. Vaadatud: 14. aprill 2024. [Online]. Available at: https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html
- [17] G. W. Stachowiak ja A. W. Batchelor, Toim, „11 Abrasive, Erosive and Cavitation Wear“, Tribology Series, kd 24, Engineering TriBology, vol. 24. , Elsevier, 1993, lk 557–612. doi: 10.1016/S0167-8922(08)70585-6.
- [18] „FSM 480 - Conventional Surface Grinders - KNUTH“. Vaadatud: 19. veebruar 2024. [Online]. Available at: <https://www.knuth.com/en/fsm-480-122802>

LISAD

Lisa 1 Töö raames katsetatud materjalide tabel

Kõva faas	Sideaine	Tähistus	Keemiline koostis (massi %)	Sideaine kogus (mahu %)	Lähtematerjalid (pulbrid)	Valmistustehnoloogia	Kõvadus (HV30)	Tihedus (g/cm3)	Mikrostruktuuri kirjeldus
WC	Co	WCR1-9	WC-8Co	13.2	W, C, Co	Reaktsioonpaagutus	1560	14.559	Peene-keskmiseteraline
		B25SN-1	WC-9.5Co	15.5	WC, Co	Tavatehnoloogia	1045	14.508	
		B40R-5	WC-10Co	16.3	WC, Co, W, C	Tavatehnoloogia	1180	14.255	Jämedateraline
		90WC-Co	WC-10Co-0.2C	16.3	WC, Co, C	Reaktsioonpaagutus	1238	14.4	
		B40	WC-15Co	23.6	WC, Co	Tavatehnoloogia	1050	13.877	
		V100-2	WC-15Co	23.6	W, C, Co	Reaktsioonpaagutus		13.9	
		AV1-2	WC-15Co	23.6	W, C, Co	Reaktsioonpaagutus	1339	13.9	Keskmise-jämedateraline
		V116-3	WC-15Co	23.6	WC, Co	Tavatehnoloogia	1274	13.9	Keskmiseteraline
	FeCr	S108	WC-25(Fe26Cr)-2C	40	WC, Fe, Cr, C	Tavatehnoloogia	1488	12.115	Peeneteraline
		S43-7	WC-30(Fe17Cr)	46.2	WC, Fe-Cr teras AISI430L	Tavatehnoloogia	1286	12	Submikroonne-väga jämedateraline
	FeMn	S72-3	WC-15FeMn-0.5C	26.1	WC, Fe, Mn, C	Tavatehnoloogia	1131	13.5	Väga jämedateraline
		S74-1	WC-15FeMn-0.5C	26.1	WC, Fe, Mn, C	Tavatehnoloogia	1449	13.5	
TiC	FeCr	S109	TiC-40(Fe26Cr)	29.7	TiC, Fe, Cr	Tavatehnoloogia	1445	5.476	Jämedateraline
		719-X7	TiC-30(Fe24Cr)	29.7	TiC, Fe-Cr teras AISI446			5.523	
		T(2)	TiC-30(Fe26Cr)	29.7	TiC, Fe, Cr		1529	5.425	
	FeCrMo	S110	TiC-40(Fe26Cr2Mo)	29.5	TiC, Fe, Cr, Mo	Tavatehnoloogia	1403	5.513	Keskmise-jämedateraline
		S111	TiC-40(Fe26Cr12Mo)	29.1	TiC, Fe, Cr, Mo	Tavatehnoloogia	1605	5.647	Keskmise-jämedateraline
	FeMo	S112	TiC-40(Fe12Mo)	29.1	TiC, Fe, Mo	Tavatehnoloogia	1246	5.805	Peene-keskmiseteraline
	FeCrNb(Mo,Si)	746-X2	TiC-34(Fe24Cr12Nb)	24.4	TiC, Fe-Cr teras AISI446, Nb		1247	5.647	Jämedateraline
		750-X1	TiC-36(Fe24Cr18Nb)	25.9	TiC, Fe-Cr teras AISI446, Nb			5.646	
		754-X1	TiC-36(Fe24Cr18Nb1Si)	26.4	TiC, Fe-Cr teras AISI446, Nb, Si			5.627	
		759-X1	TiC-36(Fe24Cr9Nb9Mo1Si)	26.2	TiC, Fe-Cr teras AISI446, Nb, Mo, Si			5.655	
TiCN	FeCr	T(3)	TiCN-30(Fe26Cr)	27	TiCN, Fe, Cr	Tavatehnoloogia, 1500 kraadi, N2	1414	5.656	
		T(4)	TiCN-30(Fe26Cr)	27	TiCN, Fe, Cr	Tavatehnoloogia, 1550 kraadi, N2	1465	5.695	
		T(5)	TiCN-30(Fe26Cr)	27	TiCN, Fe, Cr	Tavatehnoloogia, 1500 kraadi, vaakum	1455	5.618	
		T(1)	TiCN-40(Fe26Cr)	36.5	TiCN, Fe, Cr	Tavatehnoloogia, 1500 kraadi, N2	1358	5.793	Väga jämedateraline
	FeCrMo	T(6)	TiCN-30(Fe26Cr8Mo)	26.6	TiCN, Fe, Cr, Mo	Tavatehnoloogia, 1500 kraadi, N2	1457	5.714	Jämedateraline
TiCN WC +	FeCr	T(7)	TiCN-10WC-30(Fe26Cr)	33.5	TiCN, WC, Fe, Cr	Tavatehnoloogia, 1500 kraadi, vaakum	1716	5.945	Submikroonne-peeneteraline

Lisa 2 Erosioonkulutamise tulemused

L2.1. Esimene seeria, $\alpha = 90^\circ$

Nr.	Materjal	Tähis	Tihedus, g/cm ³	Pilu, mm	Liiva koef.	Liiv, kg	m ₀ , g	m ₁ , g	d ₁ , mg	K ₁ , mg/kg	V ₁ , mm ³ /kg	m ₂ , g	d ₂ , mg	K ₂ , mg/kg	V ₂ , mm ³ /kg	m ₃ , g	d ₃ , mg	K ₃ , mg/kg	V ₃ , mm ³ /kg	V _{avg} , mm ³ /kg	V _{dev} , mm ³ /kg
1	WC-25(Fe26Cr)-2C	S108	12.115	12	0.0187	10	22.9688	22.9642	4.6	24.58	2.03	22.961	3.2	17.10	1.41	22.9573	3.7	19.77	1.63	1.69	0.26
2	TiC-40 (Fe26Cr)	S109	5.476	12	0.0187	10	8.1548	8.1387	16.1	86.02	15.71	8.1265	12.2	65.18	11.90	8.1158	10.7	57.17	10.44	12.68	2.22
3	TiC-40(Fe26Cr2Mo)	S110	5.513	12	0.0187	10	8.3161	8.3002	15.9	84.95	15.41	8.2877	12.5	66.79	12.11	8.2767	11	58.77	10.66	12.73	1.99
4	TiC-40(Fe26Cr12Mo)	S111	5.647	12	0.0187	10	8.9811	8.9672	13.9	74.27	13.15	8.9553	11.9	63.58	11.26	8.9445	10.8	57.70	10.22	11.54	1.21
5	TiC-40(Fe12Mo)	S112	5.805	12	0.0187	10	10.0285	9.9997	28.8	153.87	26.51	9.9757	24	128.23	22.09	9.9514	24.3	129.83	22.37	23.65	2.02
6		Hardox	7.794	12	0.0187	10	12.9845	12.9441	40.4	215.85	27.69	12.9048	39.3	209.97	26.94	12.8665	38.3	204.63	26.25	26.96	0.59
7	WC-10Co	B40R-1	14.255	12	0.0187	10	17.3268	17.3158	11	58.77	4.12	17.3044	11.4	60.91	4.27	17.2929	11.5	61.44	4.31	4.24	0.08
8	WC-8Co	WCR1-9	14.559	12	0.0187	10	22.0696	22.0626	7	37.40	2.57	22.0554	7.2	38.47	2.64	22.0496	5.8	30.99	2.13	2.45	0.23
9	WC-9.5Co	B25SN-1	14.508	12	0.0187	10	27.4612	27.3958	65.4	349.42	24.08	27.3334	62.4	333.39	22.98	27.2747	58.7	313.62	21.62	22.89	1.01
10	WC-15Co	B40	13.877	12	0.0187	10	22.0277	21.9642	63.5	339.27	24.45	21.9003	63.9	341.41	24.60	21.8413	59	315.23	22.72	23.92	0.86
11	TiC-30(Fe24Cr)	719	5.523	12	0.0187	10	10.7568	10.7319	24.9	133.04	24.09	10.7061	25.8	137.85	24.96	10.6813	24.8	132.50	23.99	24.35	0.44
12	TiC-34(Fe24Cr12Nb)	746	5.647	12	0.0187	10	10.4786	10.4619	16.7	89.23	15.80	10.4442	17.7	94.57	16.75	10.4268	17.4	92.97	16.46	16.34	0.40
13	TiC-36(Fe24Cr18Nb)	750	5.646	12	0.0187	10	10.5292	10.5137	15.5	82.81	14.67	10.4976	16.1	86.02	15.24	10.4808	16.8	89.76	15.90	15.27	0.50
14	TiC-36(Fe24Cr18Nb1Si)	754	5.627	12	0.0187	10	10.2061	10.197	9.1	48.62	8.64	10.1871	9.9	52.89	9.40	10.1771	10	53.43	9.49	9.18	0.38
15	TiC-36(Fe24Cr9Nb9Mo1Si)	759	5.655	12	0.0187	10	9.2441	9.2325	11.6	61.98	10.96	9.2188	13.7	73.20	12.94	9.2053	13.5	72.13	12.75	12.22	0.89

L2.2. Teine seeria, $\alpha = 30^\circ$

Nr.	Materjal	Tähis	Tihedus, g/cm ³	Pilu, mm	Liiva koef.	Liiv, kg	m ₀ , g	m ₁ , g	d ₁ , mg	K ₁ , mg/kg	V ₁ , mm ³ /kg	m ₂ , g	d ₂ , mg	K ₂ , mg/kg	V ₂ , mm ³ /kg	m ₃ , g	d ₃ , mg	K ₃ , mg/kg	V ₃ , mm ³ /kg	V _{avg} , mm ³ /kg	V _{dev} , mm ³ /kg
1	WC-25(Fe26Cr)-2C	S108	12.115	12	0.0187	6	22.9573	22.9552	2.1	18.70	1.54	22.9539	1.3	11.58	0.96	22.9524	1.5	13.36	1.10	1.20	0.25
2	TiC-40 (Fe26Cr)	S109	5.476	12	0.0187	6	8.1158	8.111	4.8	42.74	7.81	8.107	4	35.62	6.50	8.1025	4.5	40.07	7.32	7.21	0.54
3	TiC-40(Fe26Cr2Mo)	S110	5.513	12	0.0187	6	8.2767	8.2706	6.1	54.32	9.85	8.2667	3.9	34.73	6.30	8.2628	3.9	34.73	6.30	7.48	1.68
4	TiC-40(Fe26Cr12Mo)	S111	5.647	12	0.0187	6	8.9445	8.9413	3.2	28.50	5.05	8.9383	3	26.71	4.73	8.9355	2.8	24.93	4.42	4.73	0.26
5	TiC-40(Fe12Mo)	S112	5.805	12	0.0187	6	9.9514	9.9431	8.3	73.91	12.73	9.9368	6.3	56.10	9.66	9.9303	6.5	57.88	9.97	10.79	1.38
6		Hardox	7.794	12	0.0187	6	12.8665	12.8268	39.7	353.52	45.36	12.7885	38.3	341.05	43.76	12.7493	39.2	349.07	44.79	44.63	0.66
7	WC-10Co	B40R-1	14.255	12	0.0187	6	17.2929	17.2899	3	26.71	1.87	17.2868	3.1	27.60	1.94	17.2838	3	26.71	1.87	1.89	0.03
8	WC-8Co	WCR1-9	14.559	12	0.0187	6	22.0496	22.0472	2.4	21.37	1.47	22.0461	1.1	9.80	0.67	22.0442	1.9	16.92	1.16	1.10	0.33
9	WC-9.5Co	B25SN-1	14.508	12	0.0187	6	27.2747	27.2569	17.8	158.50	10.93	27.2432	13.7	121.99	8.41	27.2296	13.6	121.10	8.35	9.23	1.20
10	WC-15Co	B40	13.877	12	0.0187	6	21.8413	21.8258	15.5	138.02	9.95	21.8127	13.1	116.65	8.41	21.7998	12.9	114.87	8.28	8.88	0.76
11	TiC-30(Fe24Cr)	719	5.523	12	0.0187	6	10.6813	10.6742	7.1	63.22	11.45	10.6673	6.9	61.44	11.12	10.6598	7.5	66.79	12.09	11.55	0.40
12	TiC-34(Fe24Cr12Nb)	746	5.647	12	0.0187	6	10.4268	10.4187	8.1	72.13	12.77	10.413	5.7	50.76	8.99	10.4076	5.4	48.09	8.52	10.09	1.91
13	TiC-36(Fe24Cr18Nb)	750	5.646	12	0.0187	6	10.4808	10.4742	6.6	58.77	10.41	10.4683	5.9	52.54	9.31	10.4624	5.9	52.54	9.31	9.67	0.52
14	TiC-36(Fe24Cr18Nb1Si)	754	5.627	12	0.0187	6	10.1771	10.1711	6	53.43	9.49	10.1656	5.5	48.98	8.70	10.1616	4	35.62	6.33	8.18	1.34
15	TiC-36(Fe24Cr9Nb9Mo1Si)	759	5.655	12	0.0187	6	9.2053	9.2008	4.5	40.07	7.09	9.1966	4.2	37.40	6.61	9.1926	4	35.62	6.30	6.67	0.32

L2.3. Kolmas seeria, $\alpha = 30^\circ$

Nr.	Materjal	Tähis	Tihedus, g/cm ³	Pilu, mm	Liiva koef.	Liiv, kg	m ₀ , g	m ₁ , g	d ₁ , mg	K ₁ , mg/kg	V ₁ , mm ³ /kg	m ₂ , g	d ₂ , mg	K ₂ , mg/kg	V ₂ , mm ³ /kg	m ₃ , g	d ₃ , mg	K ₃ , mg/kg	V ₃ , mm ³ /kg	V _{avg} , mm ³ /kg	V _{dev} , mm ³ /kg
1	TiCN-40(Fe26Cr)	T(1)	5.793	12	0.0187	6	9.2564	9.2448	11.6	103.29	17.83	9.2329	11.9	105.97	18.29	9.2206	12.3	109.53	18.91	18.34	0.44
2	TiC-30(Fe26Cr)	T(2)	5.425	12	0.0187	6	7.0821	7.0794	2.7	24.04	4.43	7.0756	3.8	33.84	6.24	7.0722	3.4	30.28	5.58	5.42	0.75
3	TiCN-30(Fe26Cr)	T(3)	5.656	12	0.0187	6	11.6676	11.662	5.6	49.87	8.82	11.6563	5.7	50.76	8.97	11.6514	4.9	43.63	7.71	8.50	0.56
4	TiCN-30(Fe26Cr)	T(4)	5.695	12	0.0187	6	11.4878	11.4812	6.6	58.77	10.32	11.4747	6.5	57.88	10.16	11.4688	5.9	52.54	9.23	9.90	0.48
5	TiCN-30(Fe26Cr)	T(5)	5.618	12	0.0187	6	7.7951	7.7936	1.5	13.36	2.38	7.7923	1.3	11.58	2.06	7.7905	1.8	16.03	2.85	2.43	0.33
6	TiCN-30(Fe26Cr8Mo)	T(6)	5.714	12	0.0187	6	6.0927	6.0892	3.5	31.17	5.45	6.0854	3.8	33.84	4.34	6.0822	3.2	28.50	3.66	4.48	0.74
7	TiCN-10WC-30(Fe26Cr)	T(7)	5.945	12	0.0187	6	8.2564	8.256	0.4	3.56	0.60	8.2551	0.9	8.01	1.35	8.2549	0.2	1.78	0.30	0.75	0.44
8	WC-15FeMn-0.5C	S72-3	13.5	12	0.0187	6	20.8723	20.8701	2.2	19.59	1.45	20.8685	1.6	14.25	1.06	20.8668	1.7	15.14	1.12	1.21	0.17
9	WC-15FeMn-0.5C	S74-1	13.5	12	0.0187	6	20.4336	20.4323	1.3	11.58	0.86	20.4304	1.9	16.92	1.25	20.4287	1.7	15.14	1.12	1.08	0.16
10	WC-30(Fe17Cr)	S43-7	12	12	0.0187	6	18.4194	18.4125	6.9	61.44	5.12	18.4033	9.2	81.92	6.83	18.3965	6.8	60.55	5.05	5.66	0.82
11	WC-10Co-0.2C	90WC-Co	14.4	12	0.0187	6	22.4687	22.4666	2.1	18.70	1.30	22.4654	1.2	10.69	0.74	22.4638	1.6	14.25	0.99	1.01	0.23
12	WC-15Co	V100-2	13.9	11	0.0172	6	17.0547	17.0486	6.1	59.26	4.26	17.0425	6.1	59.26	4.26	17.0362	6.3	61.20	4.40	4.31	0.07
13	WC-15Co	AV1-2	13.9	12	0.0187	6	17.3157	17.3091	6.6	58.77	4.23	17.3018	7.3	65.00	4.68	17.2958	6	53.43	3.84	4.25	0.34
14	WC-15Co	V116-3	13.9	12	0.0187	6	22.8895	22.8848	4.7	41.85	3.01	22.88	4.8	42.74	3.08	22.8746	5.4	48.09	3.46	3.18	0.20
15		Hardox	7.794	12	0.0187	6	12.7303	12.6932	37.1	330.37	42.39	12.6547	38.5	342.83	43.99	12.6172	37.5	333.93	42.84	43.07	0.67

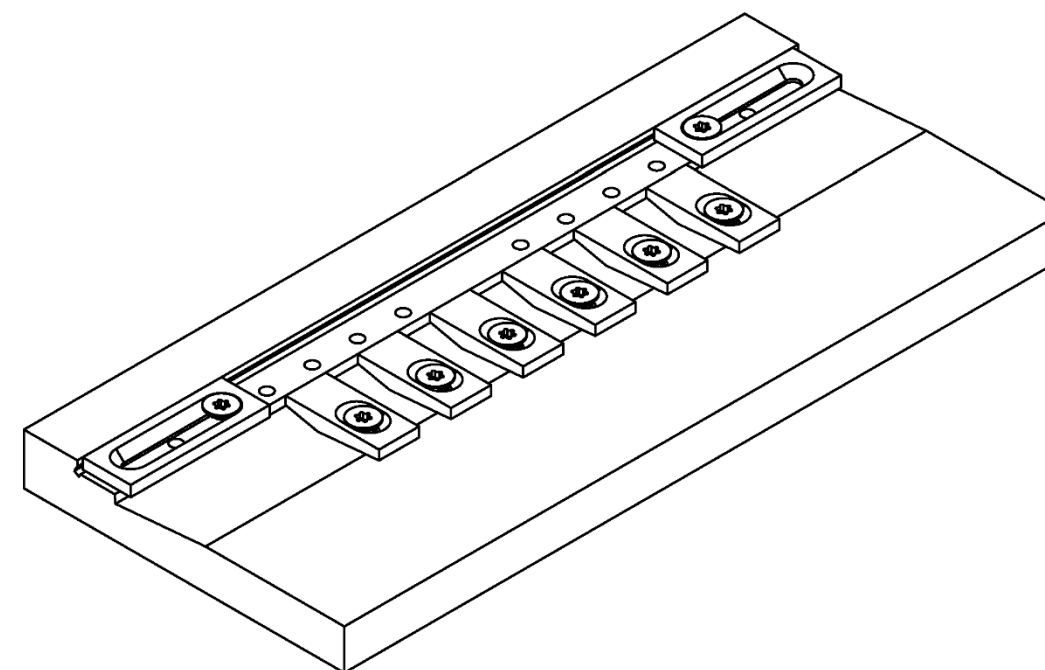
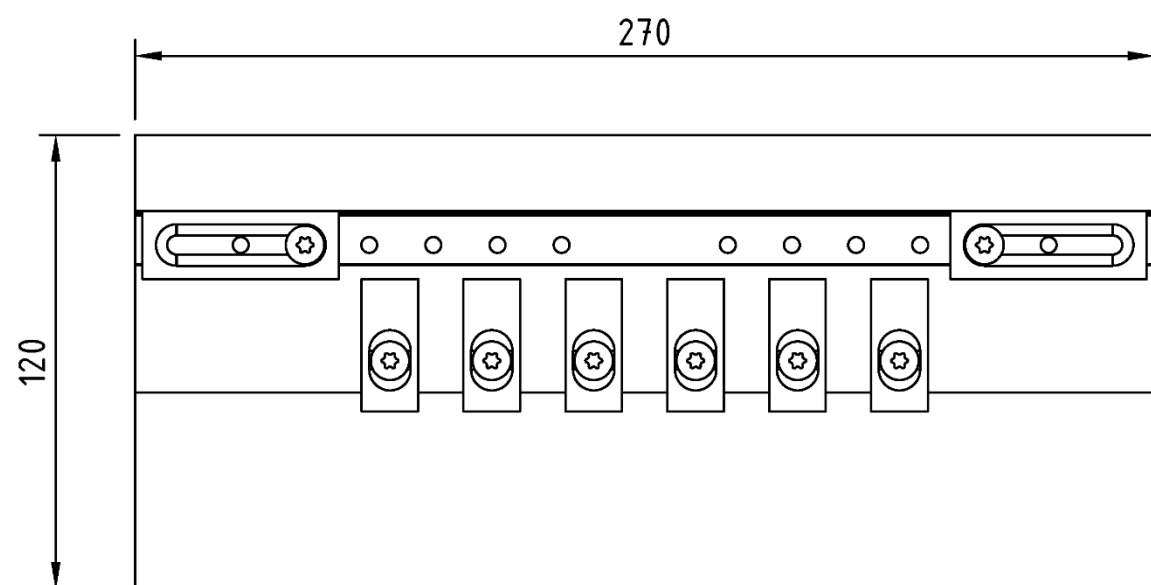
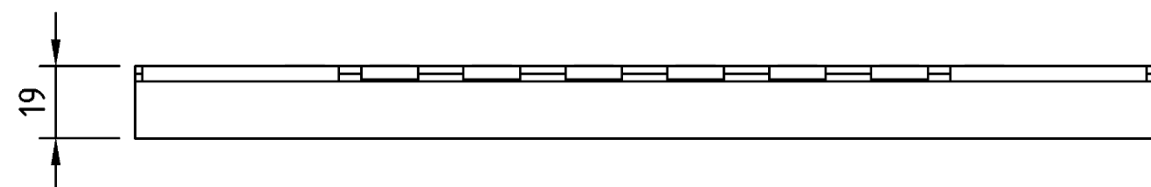
L2.4. Neljas seeria, $\alpha = 90^\circ$

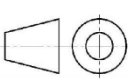
Nr.	Materjal	Tähis	Tihedus, g/cm ³	Pilu, mm	Liiva koef.	Liiv, kg	m ₀ , g	m ₁ , g	d ₁ , mg	K ₁ , mg/kg	V ₁ , mm ³ /kg	m ₂ , g	d ₂ , mg	K ₂ , mg/kg	V ₂ , mm ³ /kg	m ₃ , g	d ₃ , mg	K ₃ , mg/kg	V ₃ , mm ³ /kg	V _{avg} , mm ³ /kg	V _{dev} , mm ³ /kg
1	TiCN-40(Fe26Cr)	T(1)	5.793	12	0.0187	6	9.2206	9.2024	18.2	162.07	27.98	9.185	17.4	154.94	26.75	9.1679	17.1	152.27	26.29	27.00	0.71
2	TiC-30(Fe26Cr)	T(2)	5.425	12	0.0187	6	7.0722	7.0661	6.1	54.32	10.01	7.0599	6.2	55.21	10.18	7.0547	5.2	46.30	8.54	9.57	0.74
3	TiCN-30(Fe26Cr)	T(3)	5.656	12	0.0187	6	11.6514	11.6442	7.2	64.11	11.34	11.6372	7	62.33	11.02	11.6293	7.9	70.35	12.44	11.60	0.61
4	TiCN-30(Fe26Cr)	T(4)	5.695	12	0.0187	6	11.4688	11.4587	10.1	89.94	15.79	11.4495	9.2	81.92	14.39	11.439	10.5	93.50	16.42	15.53	0.85
5	TiCN-30(Fe26Cr)	T(5)	5.618	12	0.0187	6	7.7905	7.7883	2.2	19.59	3.49	7.7855	2.8	24.93	4.44	7.7831	2.4	21.37	3.80	3.91	0.40
6	TiCN-30(Fe26Cr8Mo)	T(6)	5.714	12	0.0187	6	6.0822	6.0749	7.3	65.00	11.38	6.068	6.9	61.44	7.88	6.0516	16.4	146.04	18.74	12.67	4.52
7	TiCN-10WC-30(Fe26Cr)	T(7)	5.945	12	0.0187	6	8.2549	8.2538	1.1	9.80	1.65	8.2529	0.9	8.01	1.35	8.2524	0.5	4.45	0.75	1.25	0.37
8	WC-15FeMn-0.5C	S72-3	13.5	12	0.0187	6	20.8668	20.8624	4.4	39.18	2.90	20.8587	3.7	32.95	2.44	20.8542	4.5	40.07	2.97	2.77	0.23
9	WC-15FeMn-0.5C	S74-1	13.5	12	0.0187	6	20.4287	20.4261	2.6	23.15	1.71	20.4233	2.8	24.93	1.85	20.4209	2.4	21.37	1.58	1.71	0.11
10	WC-30(Fe17Cr)	S43-7	12	12	0.0187	6	18.3965	18.3866	9.9	88.16	7.35	18.3787	7.9	70.35	5.86	18.3703	8.4	74.80	6.23	6.48	0.63
11	WC-10Co-0.2C	90WC-Co	14.4	12	0.0187	6	22.4638	22.4612	2.6	23.15	1.61	22.4585	2.7	24.04	1.67	22.4555	3	26.71	1.86	1.71	0.11
12	WC-15Co	V100-2	13.9	11	0.0172	6	17.0362	17.0249	11.3	109.77	7.90	17.0129	12	116.57	8.39	17.0008	12.1	117.54	8.46	8.25	0.25
13	WC-15Co	AV1-2	13.9	12	0.0187	6	17.2958	17.2828	13	115.76	8.33	17.2697	13.1	116.65	8.39	17.2571	12.6	112.20	8.07	8.26	0.14
14	WC-15Co	V116-3	13.9	12	0.0187	6	22.8746	22.867	7.6	67.68	4.87	22.8593	7.7	68.57	4.93	22.852	7.3	65.00	4.68	4.83	0.11
15		Hardox	7.794	12	0.0187	6	12.6172	12.5953	21.9	195.01	25.02	12.5717	23.6	210.15	15.12	12.5485	23.2	206.59	26.51	22.22	5.05

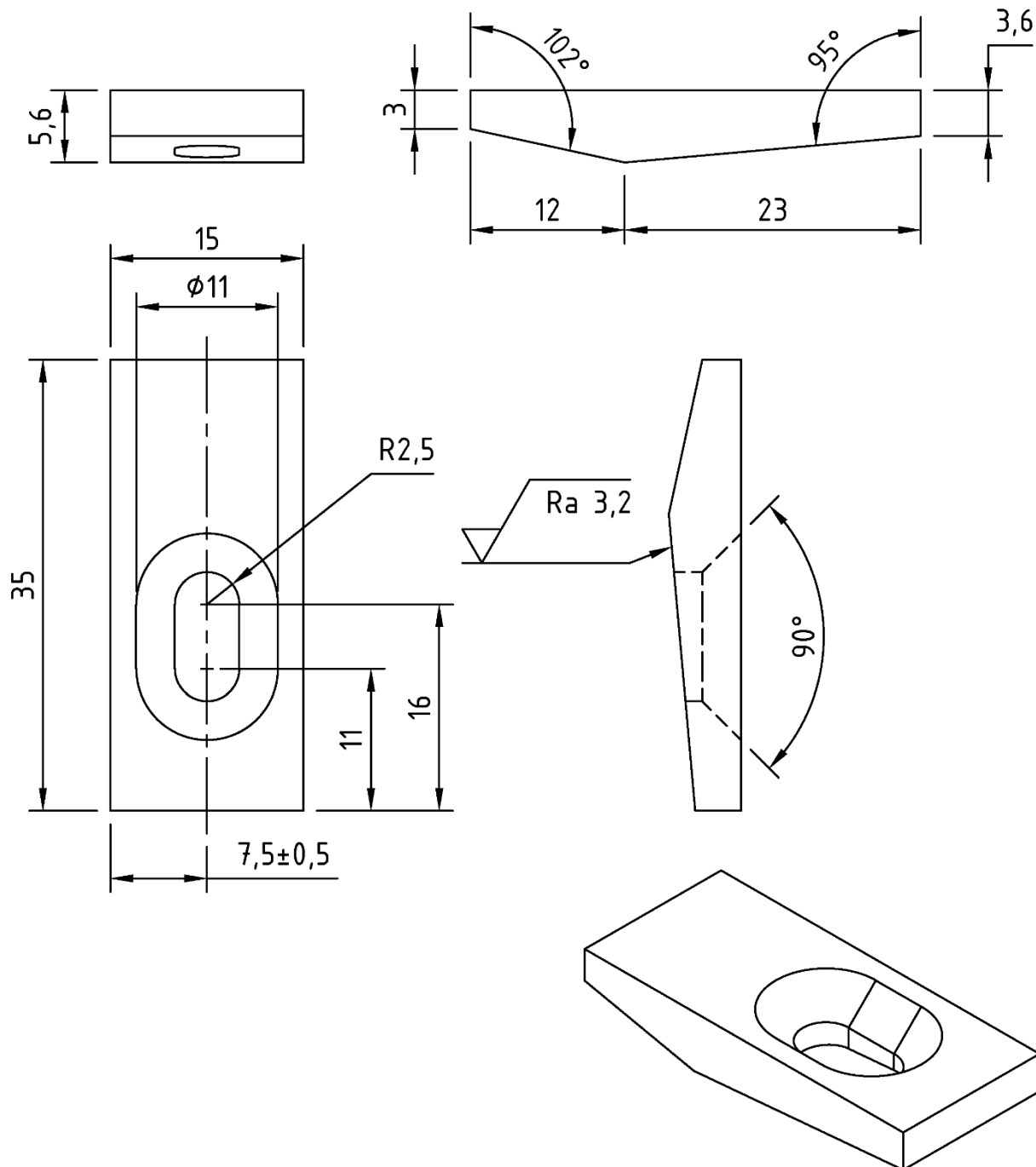
Lisa 3 Löökkulutamiskatse tulemused

Tähis	m₀, g	m₁, g	d₁, g	m₂, g	d₂, g	m₃, g	d₃, g
WCR1-9	17.8237	17.8185	0.0052	17.8034	0.0203	17.7975	0.0262
AV1-2	14.6333	14.6111	0.0222	14.5932	0.0401	14.5720	0.0613
V116-3	18.3387	18.3205	0.0182	18.3037	0.0350	18.2848	0.0539
S108	18.6795	18.6664	0.0131	18.6560	0.0235	18.6448	0.0347
S43-7	14.3654	14.3360	0.0294	purunes	purunes	-	-
S72-3	16.6296	16.6185	0.0111	16.6076	0.0220	16.5948	0.0348
S109	6.7542	purunes	purunes	-	-	-	-
S110	6.8703	6.8531	0.0172	purunes	purunes	-	-
S111	7.2881	7.2783	0.0098	7.2676	0.0205	7.2564	0.0317
S112	7.7766	7.7630	0.0136	7.7494	0.0272	7.7334	0.0432
746-X2	8.4263	8.3996	0.0267	8.3850	0.0413	8.3691	0.0572
T(1)	7.6853	7.6735	0.0118	7.6593	0.0260	7.6439	0.0414
T(6)	4.9382	purunes	purunes	-	-	-	-
T(7)	6.9432	6.9278	0.0154	6.9242	0.0190	6.9190	0.0242

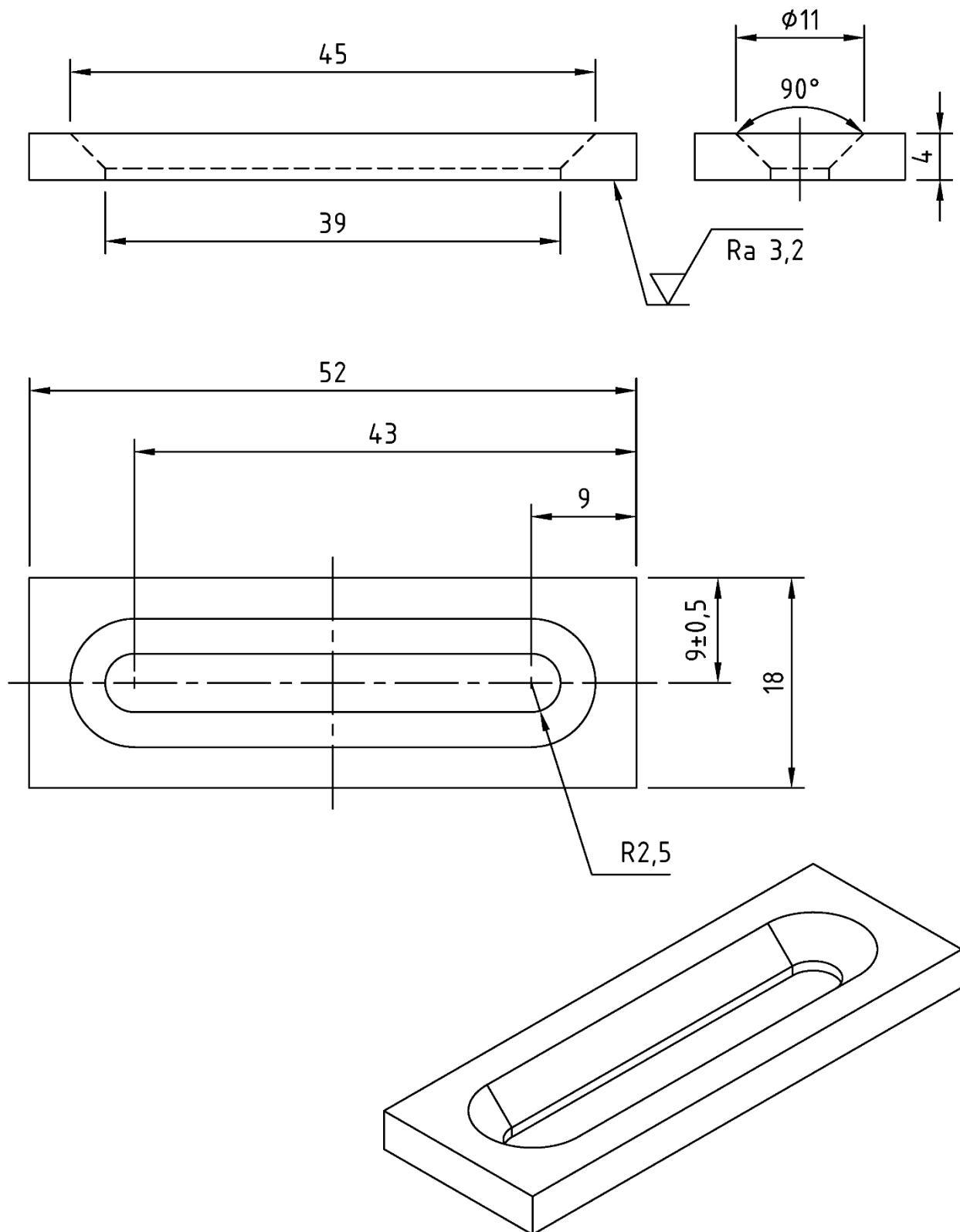
Lisa 4 Katsekehade hoidja joonised



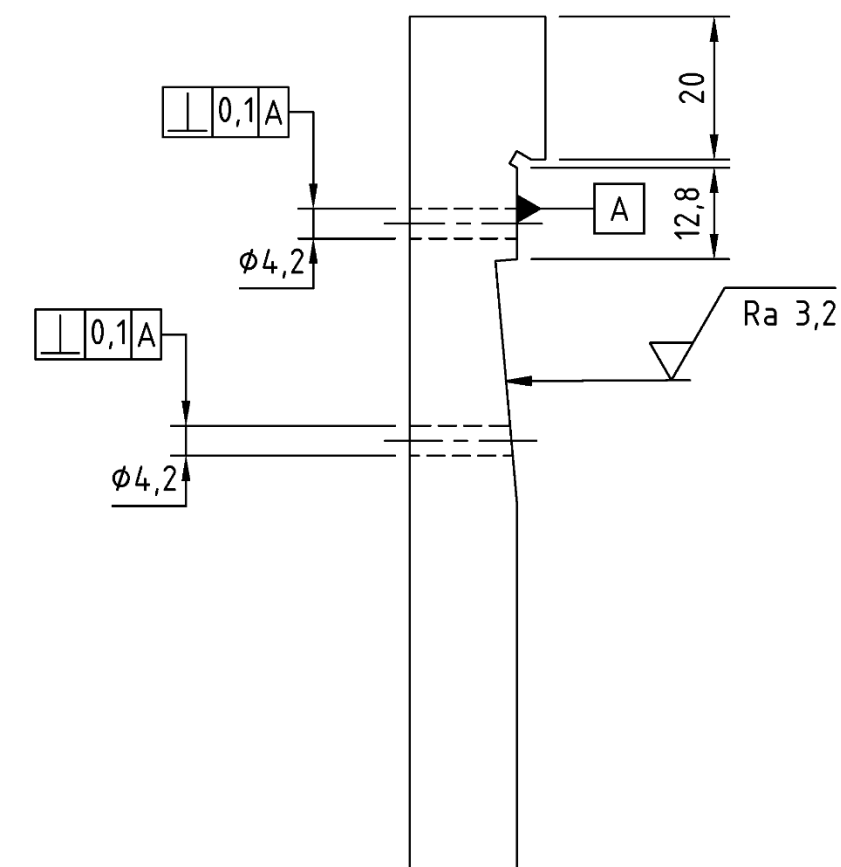
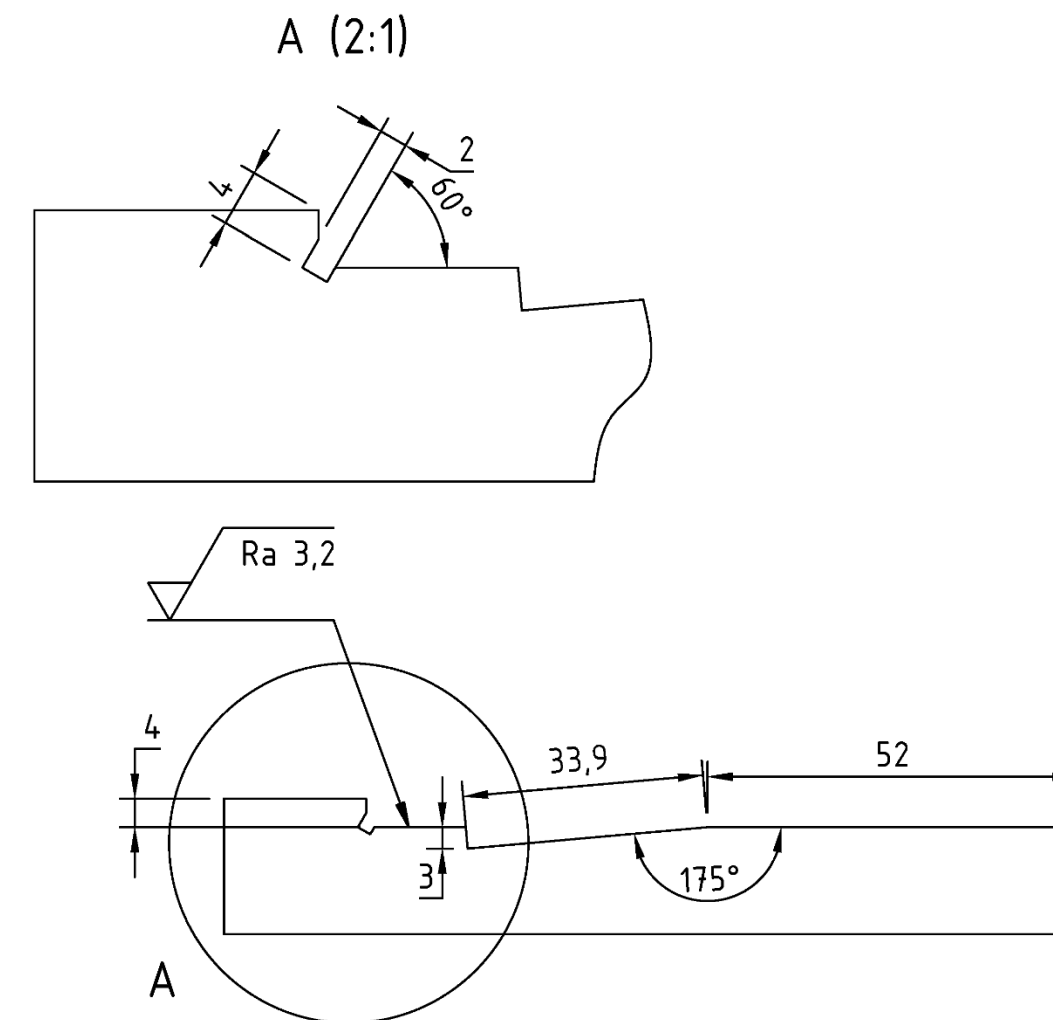
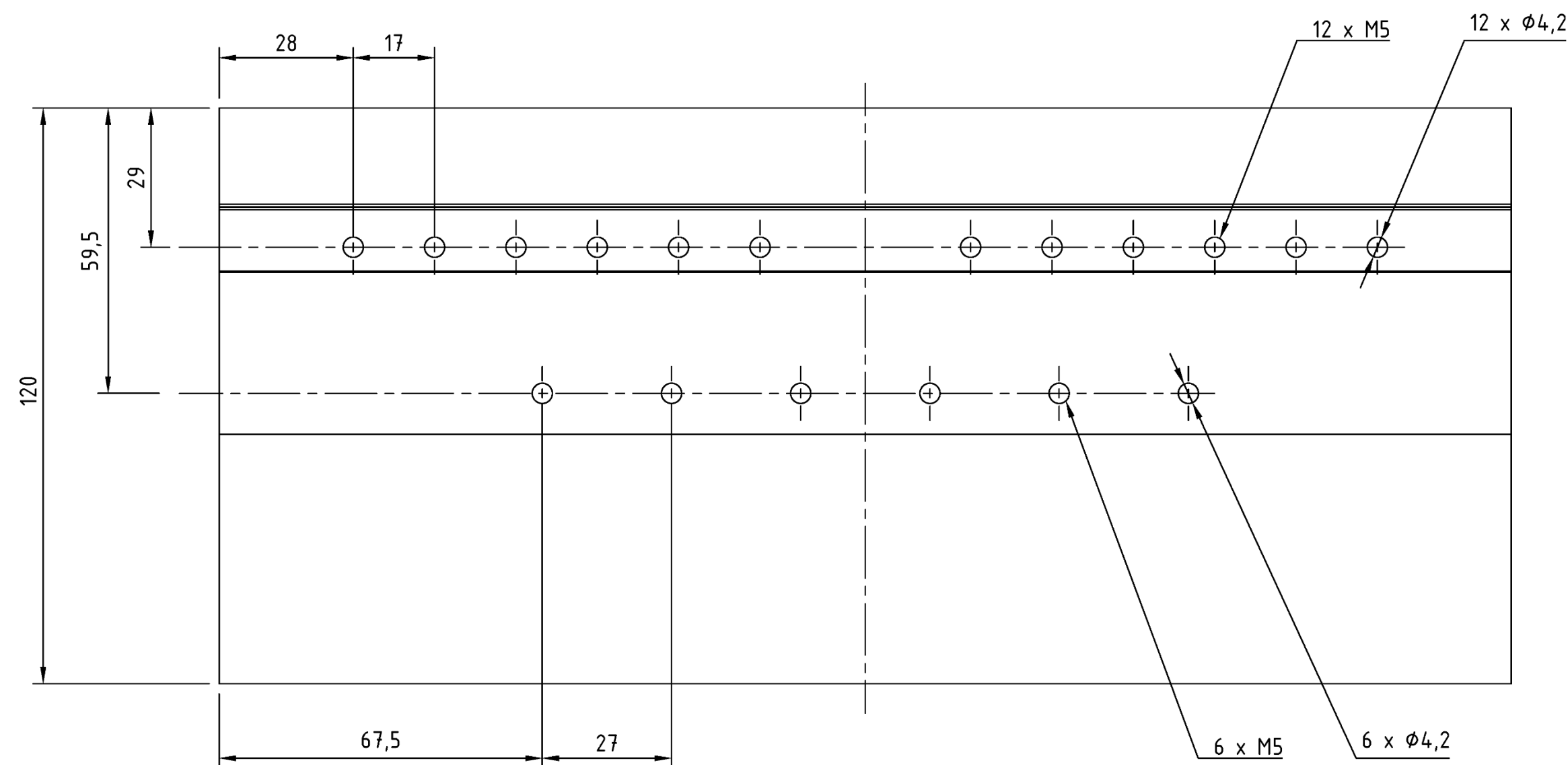
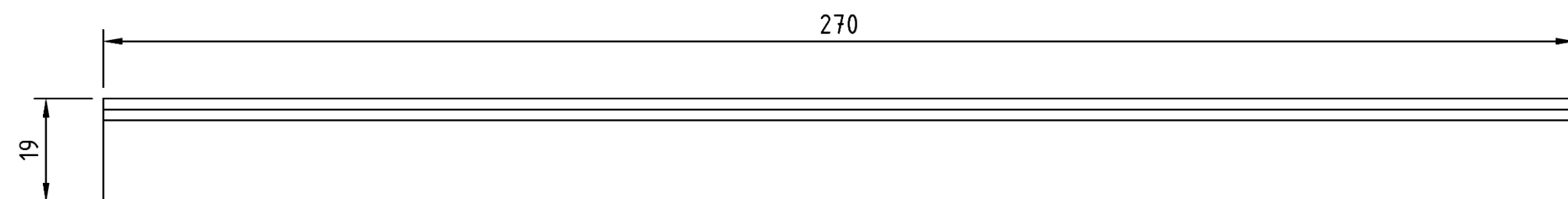
	Materjal:		Märkimata piirhälbed:	Mass:	Mõõt:
				4,4 kg	1:2
	Teostas	Andres-Hardi Ormus	KATSEKEHADE HOIDJA		
	Kontrollis	Mart Kolnes			
	Kinnitas	Märt Kolnes			
TTÜ MEHAANIKA JA TÖÖSTUSTEHNICA INSTITUUT			Leht: 1/5	Tähis:	



	Materjal: S355		Märkimata piirhälbed: ISO 2768 mK	Mass: 15,7 g	Mõõt: 2:1
Teostas	Andres-Hardi Ormus	Nimetus: KATSEKEHA KLAMBER			
Kontrollis	Mart Kolnes				
Kinnitas	Märt Kolnes				
TTÜ MEHAANIKA JA TÖÖSTUSTEHNICA INSTITUUT		Leht: 2/5	Tähis:		

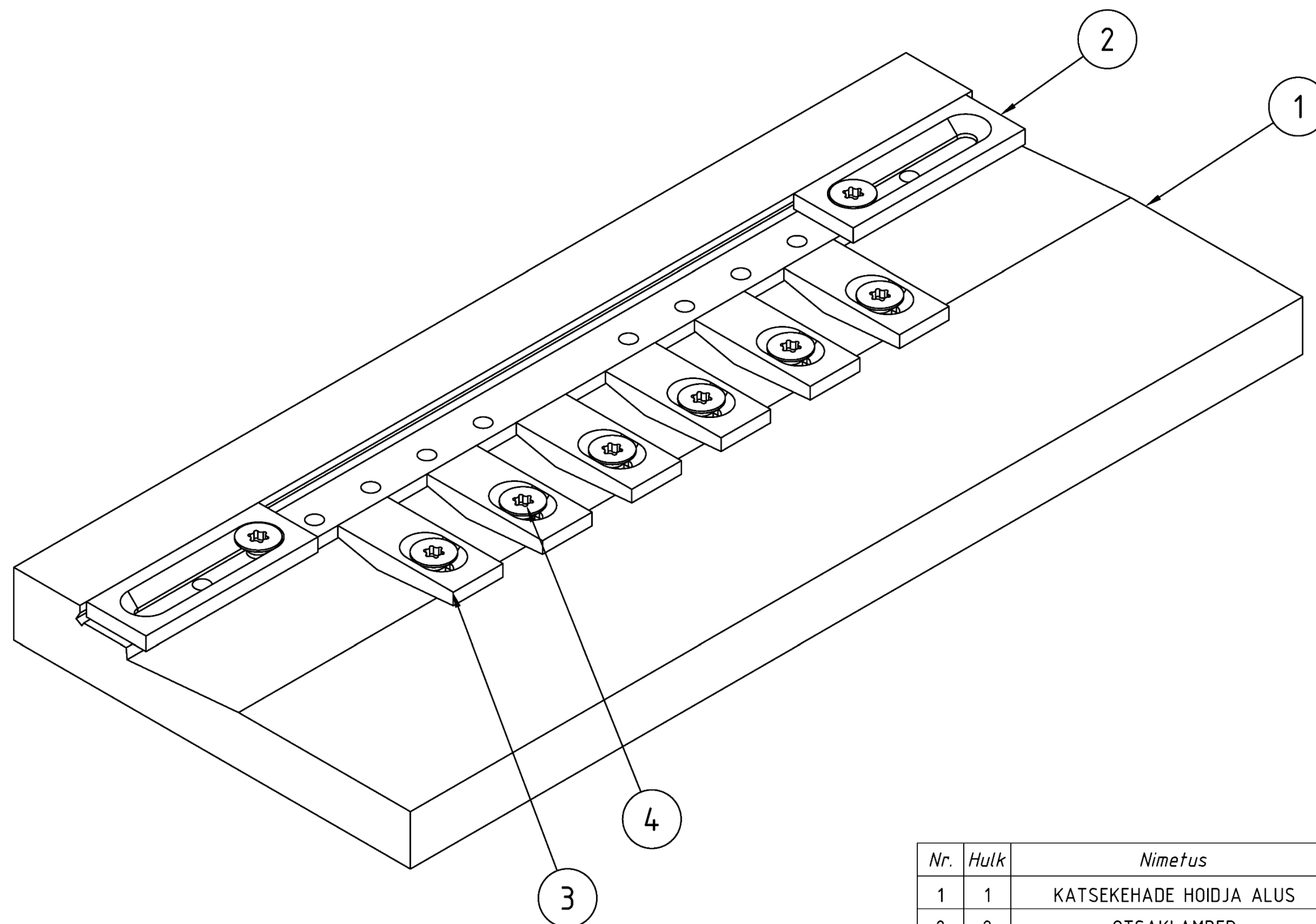


	<i>Materjal:</i> S355		<i>Märkimata piirhälbed:</i> ISO 2768 mK		<i>Mass:</i> 20,3 g	<i>Mõõt:</i> 2:1
<i>Teostas</i>	Andres-Hardi Ormus		<i>Nimetus:</i> OTSAKLAMBER			
<i>Kontrollis</i>	Märt Kolnes					
<i>Kinnitas</i>	Märt Kolnes					
TTÜ MEHAANIKA JA TÖÖSTUSTEHNICA INSTITUUT			<i>Leht:</i> 3/5	<i>Tähis:</i>		



1. Ra 25
Kõik pinnad

	Materjal: S355		Märkimata piirhälbed: ISO 2768 mK	Mass: 4,4 kg	Mõõt: 1:2
	Teostas	Andres-Hardi Ormus	KATSEKEHADE HOIDJA ALUS		
	Kontrollis	Märt Kolnes			
	Kinnitas	Märt Kolnes			
TTÜ MEHAANIKA JA TÖÖSTUSTEHNICA INSTITUUT			Leht: 4/5	Tähis:	



Nr.	Hulk	Nimetus	Materjal	Märkus	
1	1	KATSEKEHADE HOIDJA ALUS	S355		
2	2	OTSAKLAMBER	S355		
3	6	KATSEKEHA KLAMBER	S355		
4	8	POLT M5 x 12 mm		ISO 10642	
		Materjal:	Märkimata piirhälbed:	Mass: 4,4 kg	Mõõt: 1:1
Teostas		Andres-Hardi Ormus	KATSEKEHADE HOIDJA		
Kontrollis		Mart Kolnes			
Kinnitas		Märt Kolnes			
TTÜ MEHAANIKA JA TÖÖSTUSTEHNICA INSTITUUT			Leht: 5/5	Tähis:	

