



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

TTÜ Materjalitehnika instituut
Metallide tehnoloogia õppetool

MTT70LT

Deniss Tšernobajev

**Suurekiiruselise hapnik-kütuspihustuse teel saadud
mehhanoaktiveeritud ja termosünteesitud Cr_3C_2 -Ni
pulberpinnete abrasiiv-erosioonkulumine toa- ja
kõrgendatud temperatuuril**

Magistritöö

Autor taotleb
tehnikateaduste magistri
akadeemilist kraadi

Tallinn 2016

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Andrei Surženkovi juhendamisel

“.....”201...a.

Töö autor: Deniss Tšernobajev

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....”201...a.

Juhendaja: Andrei Surženkov

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”201... a.

..... allkiri

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2016. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Deniss Tšernobajev, 132221MATMM (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava: MATM02/11

Eriala: Tootearendus ja tootmistehnika

Juhendaja: assistent Andrei Surženkov (amet, nimi)

Konsultandid: Maksim Antonov, vanemteadur, 620 3355 (nimi, amet, telefon)

MAGISTRITÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Suurekiiruselise hapnik-kütuspõhustuse teel saadud mehhaanilise ja termomehaanilise Cr₃C₂-Ni pulberpinnete abrasiiv-erosioonkulumine toa- ja kõrgendatud temperatuuril

(inglise keeles) Abrasive-erosive wear of HVOF sprayed MATS Cr₃C₂-Ni powder coatings at room and elevated temperatures

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1	Kirjanduse ülevaade	27.03.2016
2.	Katsekehade ettevalmistamine	10.04.2016
3.	Abrasiiv-erosioonkulutamiskatsete läbiviimine toa- ja kõrgendatud temperatuuril	02.05.2016
4.	Tulemuste analüüs ja võrdlus analoogsetes tingimustes katsetatud materjalide ja pinnetega	20.05.2016

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: suurekiiruselise hapnik-kütusepõhustusega saadud eksperimentaalse Cr₃C₂-Ni pinde võrdlusuuring kommertslikuga abrasiiv-erosioonkulumisel normaal- ja kõrgendatud temperatuuridel

Täiendavad märkused ja nõuded: puuduvad

Töö keel: eesti

Kaitsemistaotlus esitada hiljemalt 10.05.2016

Töö esitamise tähtaeg 20.05.2016

Üliõpilane Deniss Tšernobajev /allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja Andrei Surženkov /allkiri/ kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöörde

SISUKORD

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE	3
SISUKORD	4
SISSEJUHATUS	6
I UURINGUTÖÖ TAUST.	9
1. Abrasiiv-erosioonkulumine.	9
1.1. Protsessi lühikirjeldus. Näited.....	9
1.2. Kulumisprotsessi iseloomu mõjutavad parameetrid (lööginurk, temperatuur, jne.) ..	12
1.3. Materjali (pinde) tööks abrasiiv-erosioonkulumise tingimustes toa- ja kõrgendatud temperatuuril valiku põhimõtted.	16
1.3.1. Tribioloogilised kriteeriumid	16
1.3.2. Struktuursed kriteeriumid	19
2. Kulumiskindlad pihustuspulberpinded.	24
2.1. Kulumiskindlate pihustuspulberpinnete rakendamise põhjused ja eelised.	24
2.2. Pihustusmeetodid	25
2.2.1. Leekpihustus.....	26
2.2.2. Plasmapihustus.....	28
2.2.3. Detonatsioonpihustus.	30
2.2.4. Suurekiiruseline hapnik-(õhk-)kütuspihustus.	32
2.3. Pihustuspulbrite põhilised saamismeetodid.	33
2.3.1. Taandamine soolalahustest.....	34
2.3.2. Pihustus-jahutusmeetodid.....	35
2.3.3. Sulatamine/paagutamine ja jahvatamine.	36
3. Mehhaaniliseeritud termosüntees. Lühitutvustus, eelised võrreldes tavapaagutamisega.	38
II KATSELINE OSA.	41
1. Materjali ja protsessi valiku põhjendus. Ülesande püstitus.....	41
2. Cr ₃ C ₂ -Ni pulbri valmistamine mehhaaniliseeritud termosünteesi ja desintegraatorjahvatuse teel.....	41
3. Cr ₃ C ₂ -Ni pinnete saamine suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamise teel.....	42
4. Pihustatud pinnete abrasiiv-erosioonkulutamiskatse CUK-3M peal.....	43
4.1. Katsekehade ettevalmistamine.....	43
4.2. Katseparaadi CUK-3M lühitutvustus.....	47
4.3. Katse parameetrid.	49
III TULEMUSTE ANALÜÜS.	51

1. Abrasiiv-erosioonkatse tulemuste tutvustamine ja analüüs.....	51
KOKKUVÕTE.....	55
SUMMARY	57
KASUTATUD KIRJANDUS	59

SISSEJUHATUS

Töö aktuaalsus

Kui algul tekkisid esimesed metallist tööriistad, selgus, et kuigi tugevad ja vastupidavad, olid nad väga tundlikud niiskuse vastu. Aeg möödus, inimesed leiutasid mehhanisme ja masinaid, ning mida unikaalsemaks nad muutusid, seda raskemates tingimustes nende metallist detailid pidid töötama. Vibratsioonid ning väsimuskoormused, kõrged temperatuurid, radioaktiivsed kiirgused, agressiivsed keemilised keskkonnad – see ei ole nüüd terve „katsete“ loetelu, millele nad peavad alluma.

Ajaga inimesed õpivad kaitsma metalli korrosiooni, kulumise ja teiste nähtuste eest, mis vähendavad detailide tööiga. Tegelikult on kaks võimalust, et kindlustada selline kaitse: enamasti lisatakse metalli legeritud elemendid, mis annavad sulamile juurde otsitavad omadused või metalli pinnale kantakse kaitsepinne.

Omadused, mida peavad omama pinded, määravad masinate detailidele töötingimusi. Nende pealekandmise tehnoloogiad on mitmed: on enamlevinud ja võrdlemisi lihtsad, on peened, mis võimaldavad toota katted unikaalsete omadustega. Jätkub kattete tootmise meetodite arendamine ja täiustamine, et parandada nende omadusi või suurendada majanduslikku kasu nende kasutamisest. [1]

Enamlevinud kulumiskindluse uurimuse viis ning selle sõltuvus erinevatest faktoritest seisnevad detailide ja katsekehade tööstuslike ja laboratoorsete katsumuste läbiviimises.

Tööstuskatsed annavad enam täpsemat ettekujutust materjalide kulumiskindlusest antud tingimustes, kuid, nad on raskendatud mitme asjaoluga, millest tähtsam on suur ajakulu. Samal ajal, laboratoorsed katsed võivad olla teostatud lühikese ajaga ning ilma suurte kuludeta. Nad võimaldavad uurida samal ajal mitmete faktorite mõju kulumiskindlusele, viia läbi katsete kompleksit võrdlemisi lühikese ajaga. Selle aja jooksul kulumisprotsess intensiivistub, kuid laboratoorsete katsete tingimused peavad võimalikult täpsemalt peegeldama detailide töötingimusi. [2]

Töö eesmärk

Antud töö eesmärk seisneb komposiitmaterjalist koostisega $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$, mis oli toodetud Tallinna Tehnikaülikoolis eksperimentaalse tehnoloogiaga, pulberpinnete abrasiiv-erosiooni

kulumiskindluse uurimises ja võrdlustes teiste pulberpinnetega komposiitmaterjalist sarnase koostisega, mis on kättesaadavad turul.

Uurimise objektid

Spetsiaalsed ettevalmistatud katsekehad madalsüsinikterasest, pinnatud kahe erineva pindega (pulbrist, mis on väljatöötatud TTÜ's, ning kommertspulbrist), rakendades suurekiiruselise hapnik-kütuspihustuse meetodit, ning roostevabast terasest AISI 316L katsekehad.

Töö peamised eesmärgid

1. Uurida Tallinna Tehnikaülikoolis väljatöötatud eksperimentaalse tehnoloogiaga toodetud pulbrist Cr_3C_2 -Ni pinde vastupanu abrasiiv-erosioonkulumisele.
2. Eksperimendaalselt määrata faktorite mõju (gaasabrasiivse voolu lööginurga ja katsekeha pinna temperatuuri) abrasiiv-erosioonikulumise protsessi intensiivsusele.
3. Võrrelda katsekehade pinna kulumist uue kattega näidistega, mille pealispind on kaetud kattega analoogse koostisega, mis on olemas turul, mis on juba kauaaegselt kasutatud masinatööstuses.

Usaldusväärsus ja kehtivus

Tööst saadud tulemuste usaldusväärsus ja kehtivus on kindlustatud kalibreeritud mõõtmisvahendite ja kontrollitud mõõtmismetoodikate kasutamisega. Laboratoorsete uuringute jaoks oli kasutatud abrasiiv-erosioonkulumise materjalide ja pinnete katsemeetod standardi GOST 23.201-78 järgi (rakendades I. Kleisi tsentrifugaalkiirendajat). [3].

Struktuur ning töömaht

Diplomitöö sisaldab 60 lehekülge ning koosneb sissejutatusest, kolmest peatükist, tööjäreldest ning ajakirjanduse loetelust. Töö omab 26 joonist ning 3 tabelit. Ajakirjanduse loetelu koosneb 32 nimetusest.

Esimeses peatükis on lühidalt kirjeldatud abrasiiv-erosioonkulumine, selle iseloomulijud parameetrid (gaasabrasiivse voolu lööginurk, gaasabrasiivse voolu temperatuur ja kiirus), samuti lühidalt on kirjeldatud abrasiiv-erosioonkulumise tingimustes töötavate materjalide valimise protsess. Selles osas on samuti väljatoodud pihustamismispinnete eelised ning puudused, mõned pulbri saamise meetodid ning nende pealekandmise meetodid.

Teises peatükkid on kirjeldatud töö praktiline osa, põhjendatud protsesside ja materjalide valik ning kuidas on püstitatud töö eesmärk. Väljatoodud on pulbri saamise kirjeldus ning pinnete pihustamise meetod. Kirjeldatud on katsekehade ettevalmistamine katseks, aparaat, mille peal olid läbiviidud katsed, ning katsetamise protsess.

Kolmas peatükk tutvustab katsete tulemusi ning nende analüüsi.

I UURINGUTÖÖ TAUST.

1. Abrasiiv-erosioonkulumine.

1.1. Protsessi lühikirjeldus. Näited.

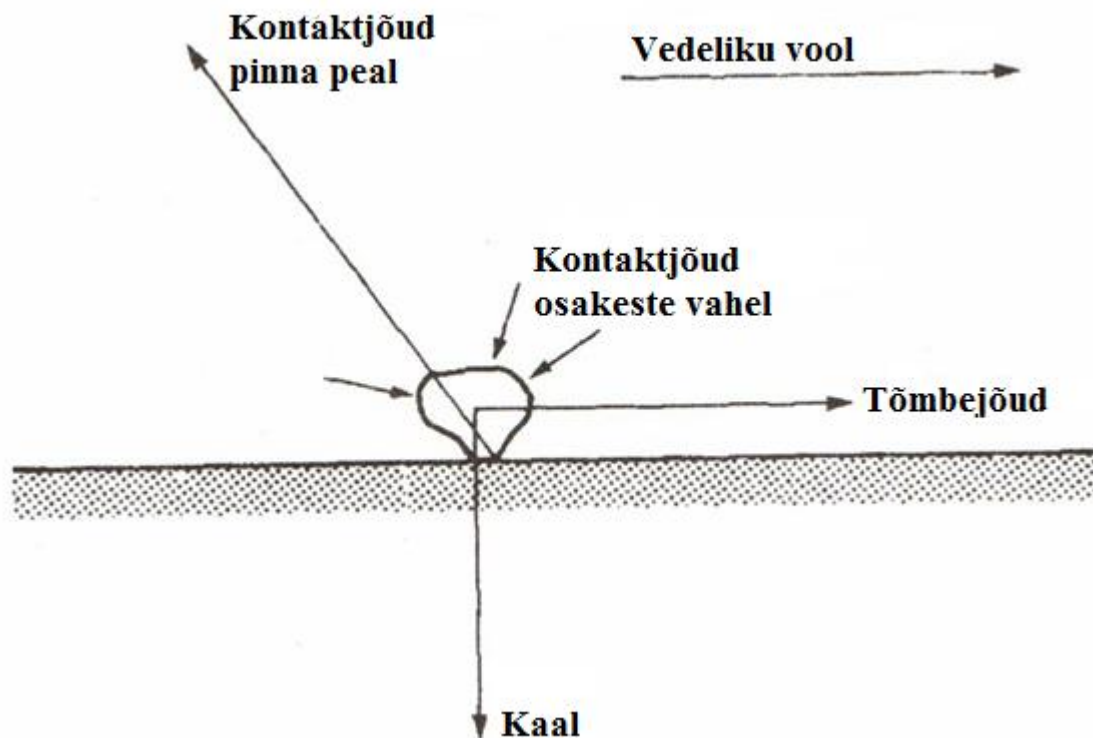
Erosioon on kulutamise moodus liikuvate gaaside, vedelike ja tahkete kehade voogudega, mille tulemusena kulunud materjal viiakse nendega minema. [4]

Erosioon on järg-järguline tahke keha pinna materjali kaotus tänu antud pinde mehhaanilisele kokkupuutele vedelikuga või gaasiga, sealhulgas tänu kokkupõrkele vedeliku tilkadega või tahkede osakestega, mis sisalduvad vedelikus või gaasi sees. Materjali hävitamine abrasiivosakeste deformeerimise käigus on seotud sisemisi vigastuste tekke ja arenguga, tekkinud mikropragude pingekontsentratsioonide kasvuga ning nende ühinemisega, mis viib lõpuks materjali mikrokoguste eraldumiseni. [4, 5]

Tänu laiale mõistele, on soovituslik selgitus, et määrata asjakohane mehhanism või olukord, näiteks: hüdro- või abrasiivne erosioon, kavitatsioonerosioon jne. [4]

Abrasiiv-erosioonkulumisega võitlemise küsimus kerkis esile XX sajandi 20ndatel aastatel seoses pneumaatilise kaevanduse rajamise meetodika arenguga, seejärel seoses vajadusega tagada vastupidavust elektrijaama seadmetele, mis töötavad kõrge tuhasisaldusega kütusel. Tulevikus on insenerirakenduste abrasiiv-erosioonkulumise seaduspärasus ja materjalide kulumiskindlus oluliselt laienenud (pneumotransportseadmed, gaasturbiinid, desintegraatorid, pumpade, ventilaatorite, pinnasepumba detailid jms). [5]

Erosioon tahkete osakestega on erosioonkulumise üldvorm, mis tekitab tahkete osakeste tsükliliste löökide tagajärjel (need on omakorda kaasahaaratud gaasi või vedeliku vooluga ning löödud tahke keha pinna vastu). Nende osakeste mehhaaniline toime hõlmab plastilist deformatsiooni ning hapra purunemist. Erosiooni käigus osakesele, mis puutub kokku keha pindega, võivad mõju avaldada mitmed erinevad loodusjõud (Sele 1). [4]



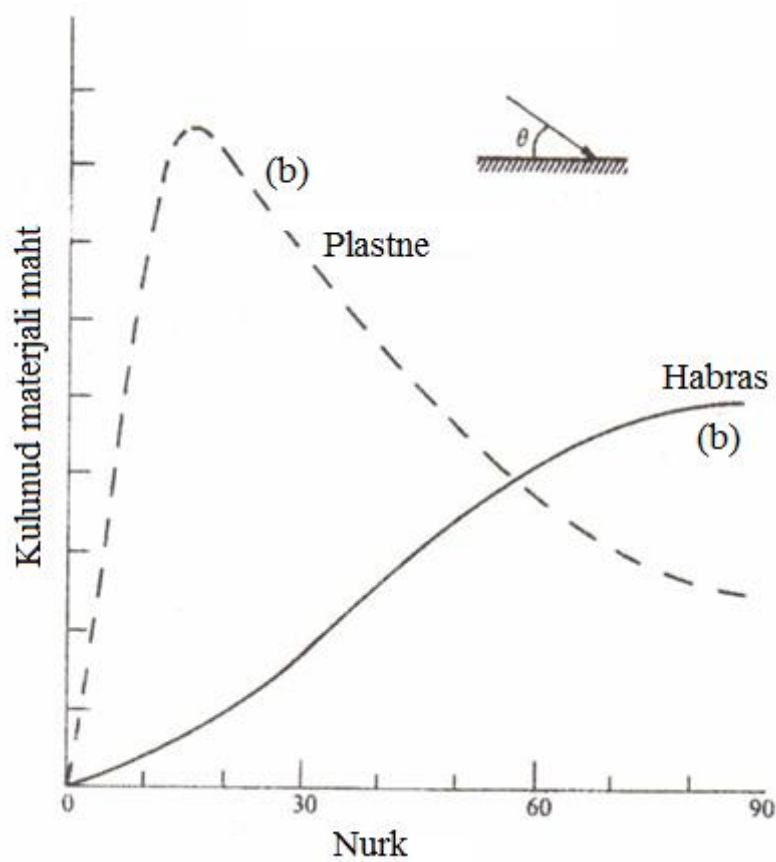
Sele 1. Jõudude skeem, mis mõjutavad osakest, mis liigub vedeliku voolus ning kontakteerub tahke pinnasega [3].

Peamine jõud, millega osake avaldab mõju pinnale, on seotud tema aeglustumisega. Teatud hulk kineetilist energiat, mida omab osake kokkupõrke hetkeks, naaseb talle tagasi peale kokkupõrget ning on kulutatud osakese kiirendusele rikošettimisel, deformeerumisel ning abrasiivse materjali murdumisel. Osa energiast kulutatakse deformeerumisele ning materjali detali lammutamisele, samuti materjali soojendamisele, tribokeemilistele reaktsioonidele, triboemissioonidele, võnkumise tekkimisele (heli) jne. Erosioonkulumise intensiivsust määratakse koguse, massi ning eraldi olevate osakeste kujuga, mis põrkuvad kokku pinnaga ning nende põrke kiirusega. Erosioonkulumise intensiivsus E (see on tavaliselt antud eemaldatud materjali massi või mahu ühikutes) on seotud kiiruse V astmeväärtusega:

$$E = k \cdot v^n$$

kus k - konstant, n - eksponendi indeks kiirusel, mis sõltub erosiooni ning materjali tingimustest. Tema väärtus tavaliselt muutub vahemikus 2... 2,5 metallide puhul ja vahemikus 2,5 ... 3 keraamiliste materjalide puhul. [4, 6]

Lööginurk, mille määratakse pinnase suhtelise lamedusega, nagu näidatud seel 2, erinevatel viisidel mõjutab plastiliste, haprate materjalide erosioonkulumise intensiivsust.



Sele 2. Iseloomulik sõltuvus erosiooni intensiivsusest plastse (a) ja hapra (b) materjali lööginurgast θ [3]

Peamine lööginurga mõju erinevus plastsete ja hibraste materjalide jaoks seisneb nurga väärtuses, mille juures erosiooni intensiivsus on maksimaalne. Plastsete materjalide jaoks on see 20-30° juures, kuid hibraste materjalide jaoks (klaas, keraamika) see on 90°. Mõndade tugevate ja põrutuskindlate legeritud teraste puhul mõjuv erosioon toimub ka osakeste normaalsel langemisel. [4]

Samuti, erosiooni intensiivsust mõjutavad erinevad osakeste iseloomu omadused, näiteks kuju, suurus, kõvadus. Kõike enam abrasiiv-erosioonkulumisele ja tema intensiivsusele avaldab mõju osakese kiirus kokkupõrke hetkeks, lööginurk ning materjali ja abrasiivi kõvaduse suhe. Nende parameetrite muutus isegi väikestes intervallides on võimeline põhjustama vastupidavate materjalide pöördjärjestuse. [4]

Teised iseloomulikud parameetrid abrasiiv-erosioonkulumisel (abrasiivosakeste kontsentratsioon gaasis, osakeste suurus, koefitsent, mis iseloomustab osakeste kuju, koefitsent, mis iseloomustab materjali mehhaaniliste omaduste langust füüsikaliste ja keemiliste tegevuste tagajärjel keskkonnas) mõjutavad pealmise kihi kulumist ning antud parameetrite muutumine võib viia kulumiskindluse inversioonini. Kõik mainitud parameetrid on vaja arvesse võtta, modelleerides reaalseid protsesse mehhanismide deteilide abrasiiv-erosioonkulumisel. [5]

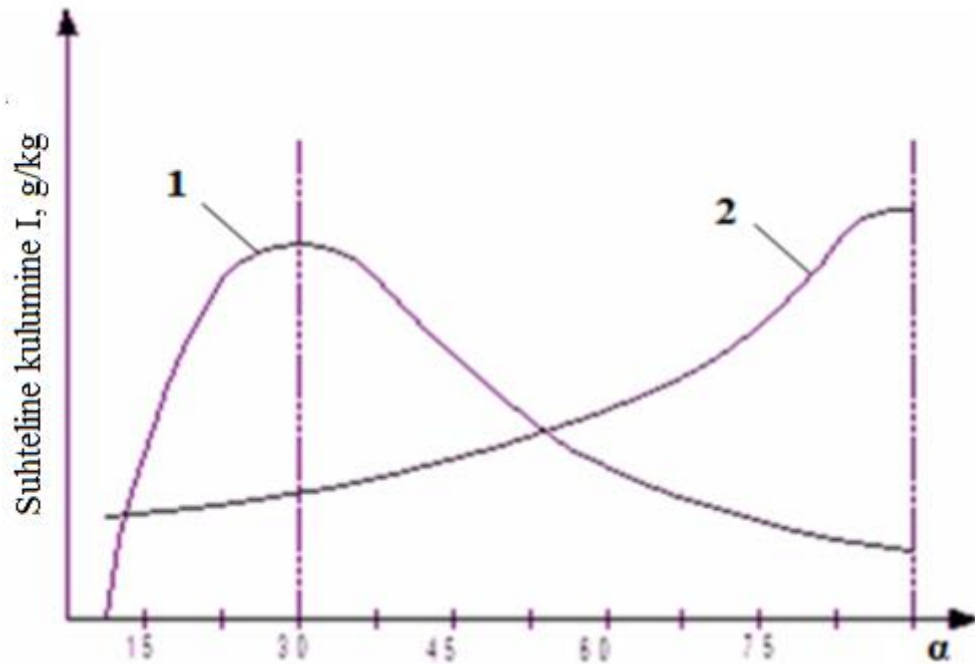
1.2. Kulumisprotsessi iseloomu mõjutavad parameetrid (lööginurk, temperatuur, jne.).

Viimase aja tööde läbiviidud analüüs ja mitmete katseandmete üldistus, mis oli pühendatud pealispinna kulumisele tänu tahteke osakestele, ning samuti eraldi füüsikaliste parameetrite analüüs, mis määrab keha pinna kulumise intensiivsust, näitasid, et peamsed suurused, mis mõjutavad seda protsessi, on [7]:

- kulutatava materjali pinna ja tahkete osakeste kiiruse ja nurga vastastikune mõju;
- kulutatava materjali tihedus, kõvadus ja elastsusmoodul;
- tahkete osakeste kaaluline kontsentratsioon voos;
- tahkete osakeste kuju, suurus, tihedus ja kõvadus;
- kulutatava materjali temperatuur

Ülevaltoodute parameetrite seast kulutatava materjali temperatuur, keskmine kiirus ja gaasabrasiivse voolu lööginurk mõjutavad kõige rohkem materjalide abrasiivkulumise intensiivsust [7].

On olemas olulised erinevused sõltuvusi kulumise suuruse abrasiiv voolu lööginurgast haprate ja plastsete materjalide jaoks (vaata Sele 3). Andmete järgi [33], 12%lise kroomilise terase maksimaalne erosioon (näiteks 12X13 teras) saadakse osakeste ja pinna löögi korral, 20÷30° nurga all [7].

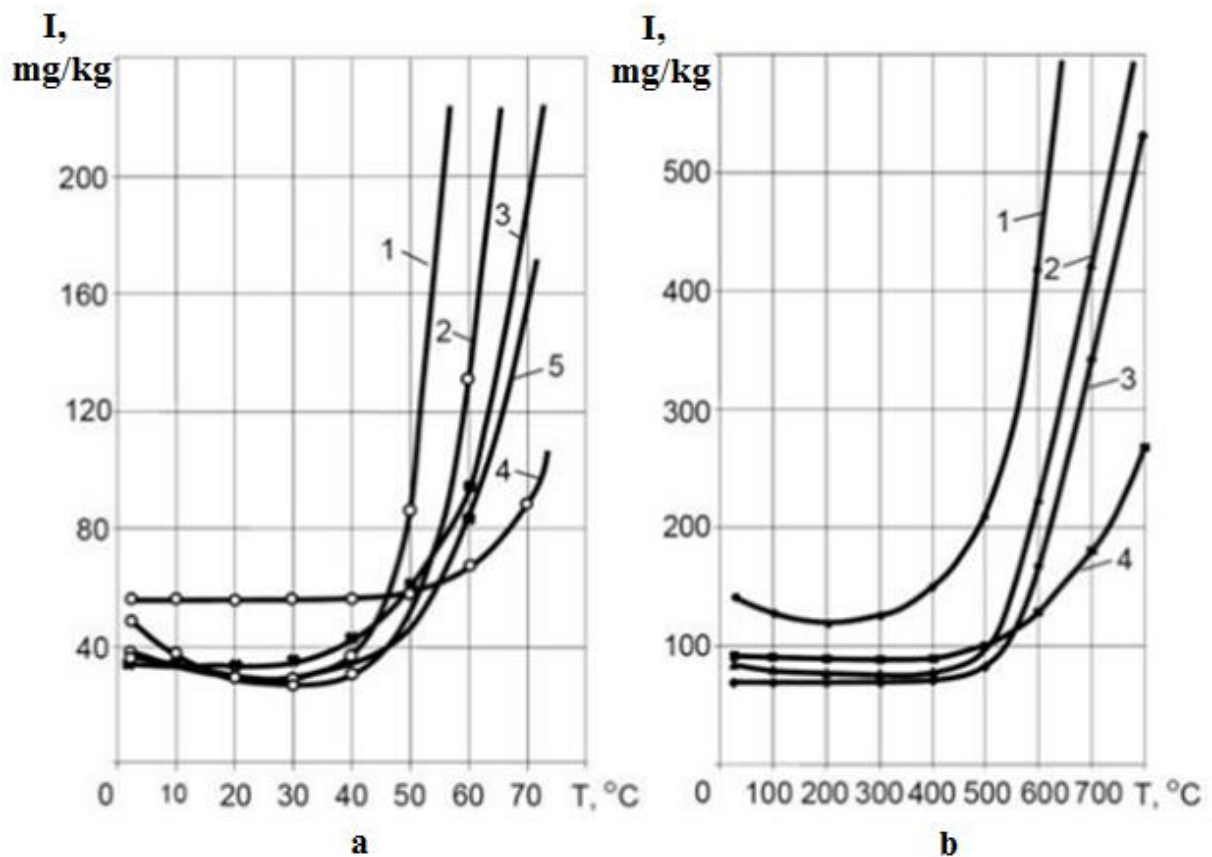


Sele 3. Abrasiivse voolu α lööginurga mõju plastsete (1) ja habraste (2) materjalide kulumise intensiivsele [6].

Katsekehade kulunud pinna uuringud näitasid, et erosioonkulumise korral, abrasiivosakese ja sihtmärgi kulutatava kokkupuute kohal, tihti vaadeldakse kulumise plastset tüüpi, mis avaldub plastiliste jäljena. Samal ajal metallide puhul, kulutatava materjali plastsus tõuseb temperatuuri kasvamisega [7].

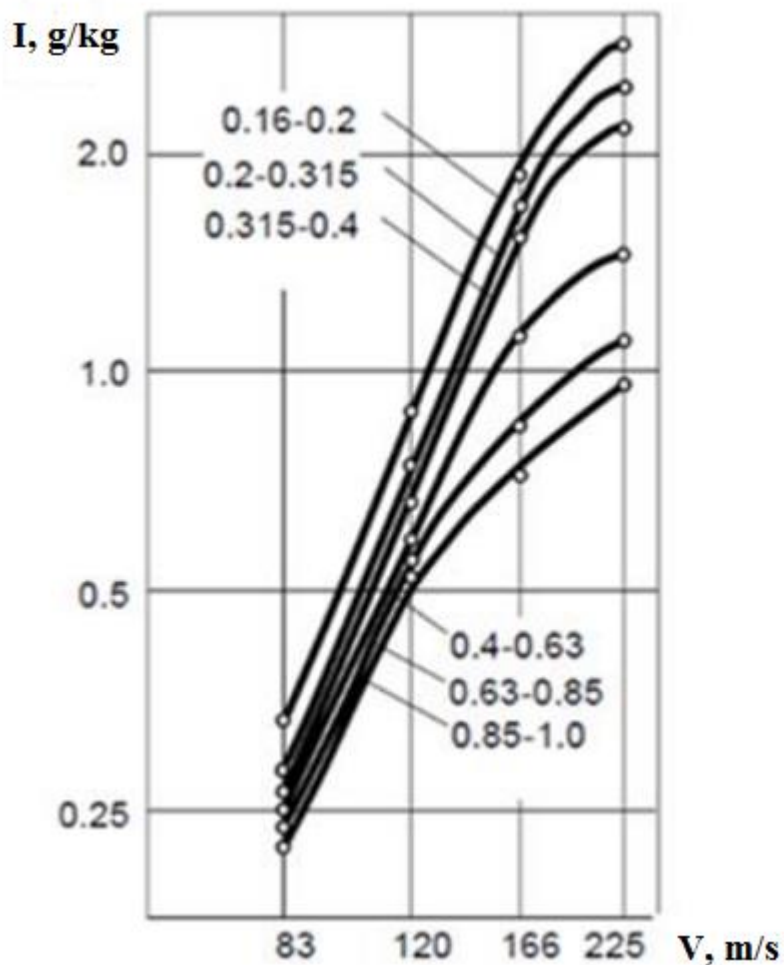
Materjali soojenemisel toimub kõvaduse langus ja pinna hapraks muutmine. See efekt on seotud pinna temperatuuri suurenemisega, paksu oksiidkihi tekkimisega sihtmärgil. Oletatakse, et selline oksiidikiht peab vähendama abrasiivkulumise intensiivsust [8].

Tuleb märkida, et kirjandusandmete analüüsi tulemusena, temperatuur võib avaldada erinevat mõju materjali kulumise protsessile. Niisiis, mõnede uuringute andmete järgi [9] pinde oksüdatsioon, mis on tekkinud kulutatava materjali temperatuuri suurenemisega, ei mõjutanud märgatavalt erosiooniga põhjustatud katsekehade kulumist. Peale seda, mõnikord märgati kaaluliste kulude vähenemist temperatuuri suurendes (vt Sele 4).



Sele 4. Kulumise kiiruse sõltuvus I kulutatava temperatuurist gaasabasiivse kulumise korral lööginurgast: 45°(a) ja 90° (b) (1–St3, 2–teras U8A, 3–teras R9, 4–malm Ch34L, 5–teras 9ChS (kvarts liiva osakeste kiirus $v_0 = 48$ m/s, kvartslüüva osakeste diameeter 0,4-0,6 μm)) [2].

Gaasabasiivse voolu keskmine kiirus, millega ta puutub kokku kulutatava materjali pinnaga, mõjutab abrasiivkulumise intensiivsust mitte vähem kui lööginurk. Teoreetiliste arvutuste ja ekspretementaalsele uuringute tulemused [10] kõnelevad abrasiivkulumise protsessi kiiruse suurenemisest gaasabasiivse voolu suurenemisega. See on seletatav kineetilise energia varu suurenemisega, mis liigub tahkete osakeste vooluga ning läheb üle energiaks löögi või materjali pinna vastastikmõju korral.



Sele 5. Kulumise suuruse sõltuvus erineva fraktsioonilise koostisega tahkeid osakesi sisaldusva gaasabrsiivse voolu kiirusest kulutatava materjali (terase süsiniku sisaldusega 0.8% (850 HV)) juhul (numbrid graafikul – tahkete osakeste suurused, mm) [12].

Tahkete osakeste fraktsiooniline koostis, mis mõjutab vastastikku erinevate seadmete pindeid, on äärmiselt mitmekesine. Üks peamine abrasiivkulumise protsessi erilisus on see, et kulumise kahju ei saa alati täpselt seostada osakese suurusega. Siinkohal on oluline arvestada nii liikumise kiirust kui ka nurka, mille all osakesed hakkavad lööma seadmete elementide pinda. [7]

Väiksema suurusega (diameetriga) osakesed kulutavad ja deformeerivad materjali pinda rohkem, kui suuremad osakesed samasuguste kiiruste ja lööginurga gaasabrsiivse voolu korral. Peale selle, on olemas mõni osakeste suuruse maksimum, millest suurema tahke osakese mõõtme puhul abrasiivkulumise intensiivsus kasvab või langeb rohkem, või hoopiski jääb konstantseks [7].

Antud olukorra põhjenduseks on see, et väikeste suurustega osakesed võivad saada kiirust, mis on lähedal voolu keskmise kiirusele, saades suurt varu kineetilist energiat, võrreldes suurte osakestega. Siin tasub märgata, et antud maksimum osakeste suurusel on iseloomulik ainult ühele abrasiivmaterjali osakeste tüübile [7].

1.3. Materjali (pinde) tööks abrasiiv-erosioonkulumise tingimustes toa- ja kõrgendatud temperatuuril valiku põhimõtted.

Tahkete metallide, keraamika ja termopihustatud pinnete abrasiiv-erosioonkulumise uuringute põhjal selgus, et peamised nende valiku kriteeriumid võib jaotada järgmiselt [13]:

- tribioloogilised kriteeriumid (lööginurk, abrasiivi kõvadus, abrasiivi kuju)
- struktuursed kriteeriumid (koostis, mikrostruktuur, poorsus, pinde paksus)

1.3.1. Tribioloogilised kriteeriumid

Lööginurknurk

Pinde valimisel abrasiiv-erosioonkulumise tingimustes töötamiseks peab arvestama järgmised nõuded [13]:

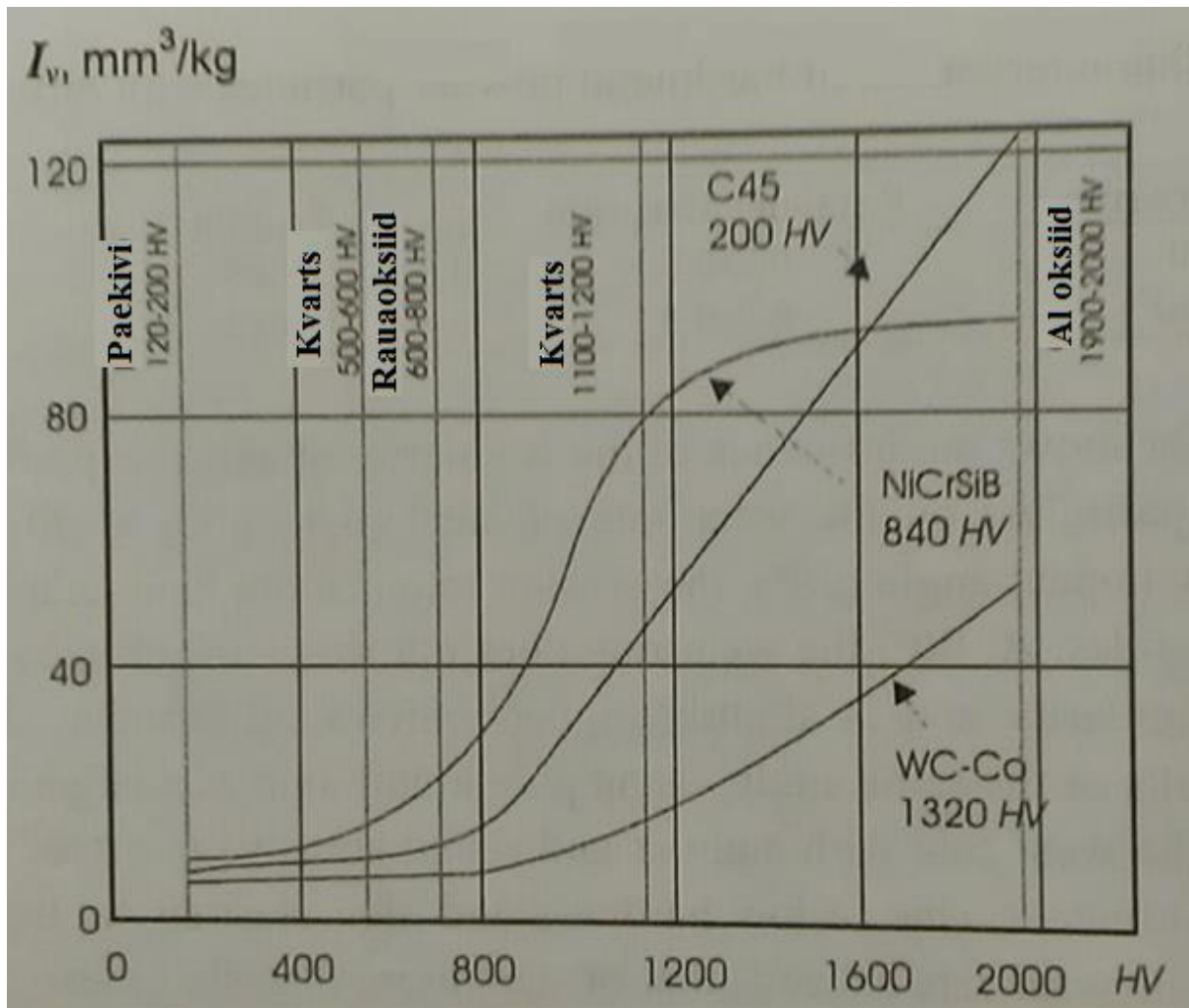
- terava lööginurga ($< 90^\circ$) juhul (väike ja keskmine lööginurk) mikrolõikamise domineeriva mehhanismiga on väga olulised materjali tugevusomadused
- normaalse lööginurga (90°) juhul, kui domineeriv kulumise mehhanism on madalatsükliline väsimus, oluline on sitkuse ja kõvaduse suhe.

Abrasiivi kõvadus

Materjali erosioonkulumise suurus sõltub kõvadusest, täpsemalt materjali kõvaduse ja abrasiivi kõvaduse suhte suurusel (H_m/H_a). Kui materjali kõvadus on madalam kui abrasiivi kõvadus ($H_m < H_a$), võib tekkida mikrolõikamine, teisisõnu, pinnale hakkavad tekkima kriimud. Kui materjali kõvadus on abrasiivi kõvadusest kõrgem ($H_m > H_a$), siis materjali puhas kulumine tavaliselt ei juhtu ning kogu kulumisprotsess omab väsimuse iseloomu. Abrasiivosakeste kõrgenergilise mõju korral aset leiab habras purustamine ja karbiidteraste või nende fragmentide murdumine [13].

Abrasiiv-erosioonkulumise eksperimendaalsed uuringud koos erineva kõvadusega (120–200 kuni 1900–2000 HV) abrasiividega näitasid, et abrasiivi kõvadus avaldab suurt mõju tahke

materjali või pinde kulumise kiirusele. Abrasiiv-erosioonkulumise korral kulumiskiiruse sõltuvus kulumismaterjali kõvadusest on kirjeldatav nn S-kõveratega. Erinevate materjalide ja pinnete S-kõverate võrdlusest järeldus (Sele 6), et peamine erosioonkulumise reegel on – et garanteerida tugevat pinna vastupanu kulumisele terava lööginurga korral, pinna kõvadus peab ületama abrasiivi kõvadust. Normaalse lööginurga korral (90°), abrasiivi kõvaduse mõju kulumiskiirusele on oluline kulumismehhanismi väsimusiseloому pärast [13].



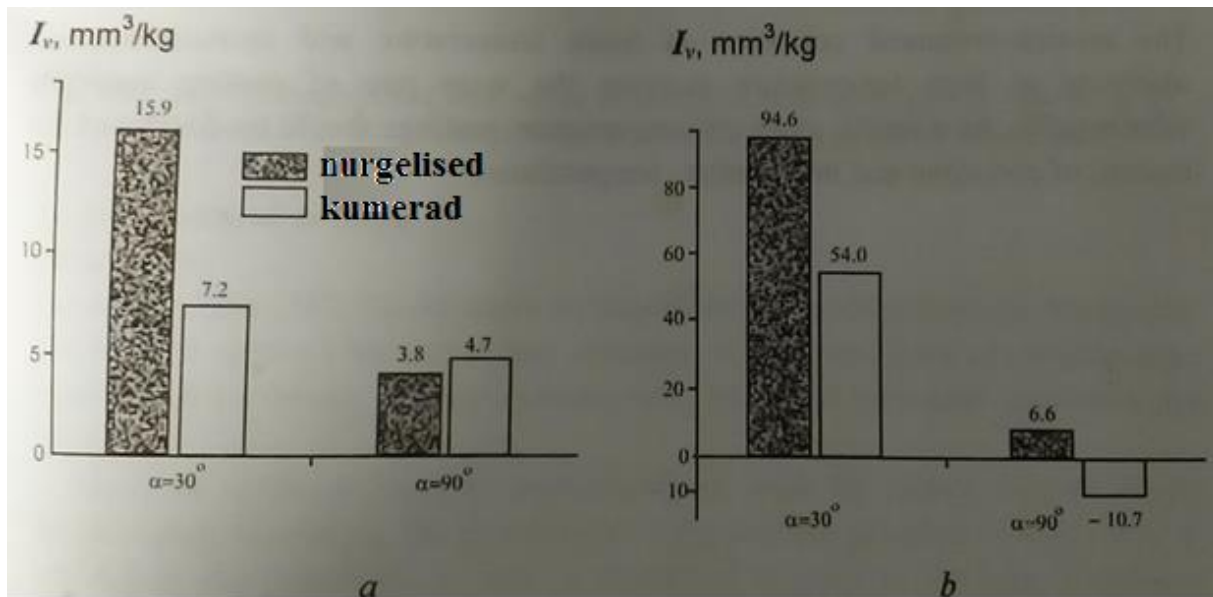
Sele 6. Erosiooni kiiruse sõltuvus abrasiivi kõvadusest (kahe erineva pinde S - kõverad) [13]

Abrasiivi kuju

Nagu oli näidatud plastsete materjalide erosioonikulumise teoorias, abrasiivi kuju omab mõjuvat tähtsust pinna materjali kulutamisel mikrolõikamise protsessi tõttu.

Samasuguste kõvaduse, aga erinevate kujudega abrasiivsete osakeste kulumise uuringu põhjal, on näha otsest seost abrasiivsete osakeste kuju ja materjali kulumiskiiruse vahel

(terava lööginurga korral) (Sele 7). Abrasiivsete osakeste kuju parameeter – nurgelisus SPQ oli tuvastatud meetodiga, mis pakkus Stachowiak [13].



Sele 7. Abrasiivsete osakeste nurgelisuse mõju erosiooni kulumiskiirusele: a – teras, C = 0,45%; b - puhas Al [13].

Tabel 1. Tugevatest metallidest, erineva kujuga pulbri osakeste omadused [13].

Abrasiivi tüüp	Osakeste suurus, mm	d _m , mm	SPQ
Nurgeline	0.2-0.5	0.28	0.7
Ringikujuline	0.2-0.5	0.32	0.5

Sele 7a näitab abrasiivosakeste nurgelisuse mõju terase (0,45 % C) kulumiskiirusele erinevate lööginurkade korral. Väikese lööginurga korral (30°) erosiooni kiirus on 2 korda suurem, kui kasutusel on nurgelised osakesed. 90° juures kuluvuse kiirus ei näita olulist sõltuvust nurgelisusest, kulumine on natuke suurem kumerate osakeste kasutusel. Sele 7b näitab sama uuringu tulemust, kui katsekehad olid valmistatud puhtast allumiiniumist. Nurgeliste ja kumerate abrasiivosakeste kulumiskiiruse vahe on peaaegu sama nagu terasel. Madala kõvaduse ja kõrge plastisuse pärast, väikese lööginurga juures (30°) kulumiskiirus ületab terase oma rohkem kui 6 korda [13].

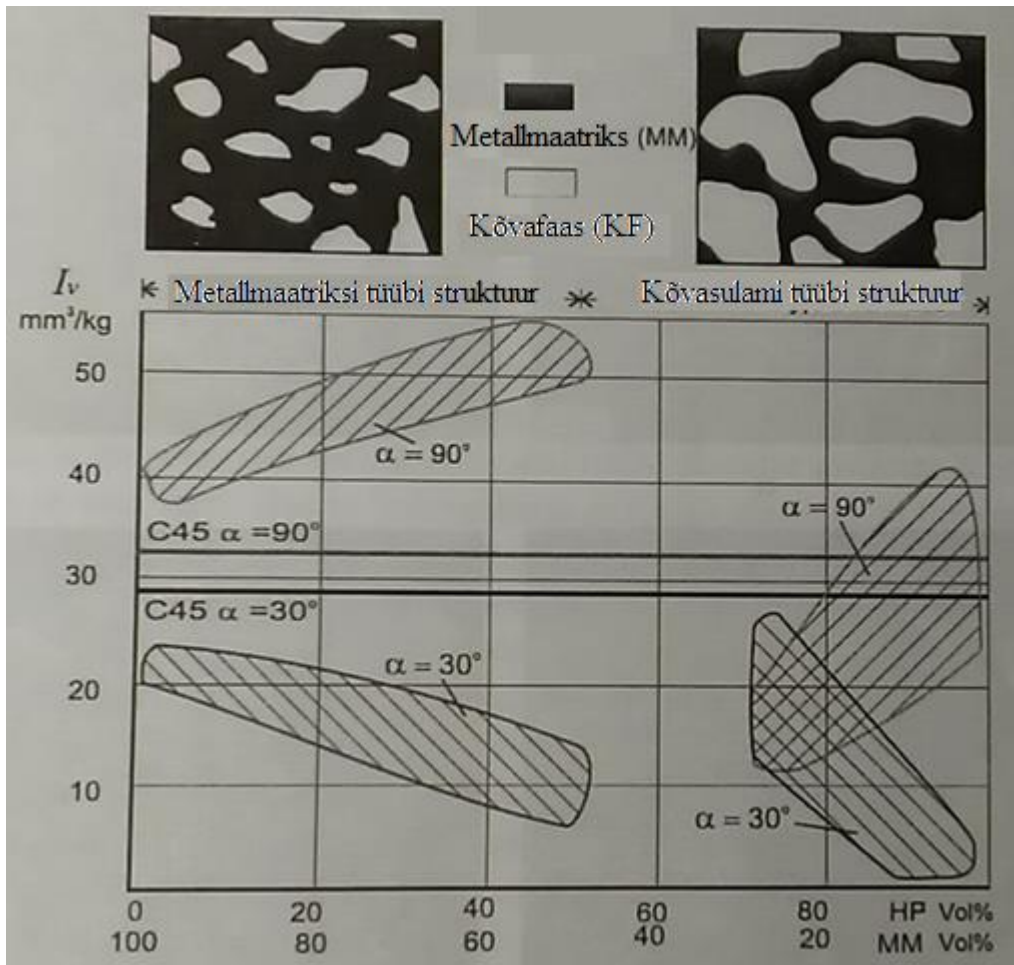
Normaalse lööginurga (90°) korral oli aset leidnud metalli osakeste tungimine allumiiniumisse. Nurgeliste abrasiivosakeste põrkete tulemusena katsekehade kaal suurenes (ringikujuliste abrasiivosakestega kulumise kiirus oli negatiivne - Sele 7b) [13].

1.3.2. Struktuursed kriteeriumid

Koostis

Kõvasulamid (komposiitmaterjalid koostisega WC-Co) kujutavad endast tähtsat materjalide gruppi, kui rääkida kaitsest abrasiiv-erosioonkulumise vastu. Nemad on kasutatavad nii tahkete materjalide kui termopihustatud pinnete kujul. Samaaegse erosiooni ja korrosiooni tingimustes WC-Co koostist muudetakse, et tõsta vastupanu korrosioonile [13].

Terava lööginurga korral abrasiiv-erosioonkulumisel (väikeste ja keskmiste lööginurgaste korral), kus kulumise kiirus väheneb kõvaduse suurendades ning domineerib mikrolõikamise kulumismehhanism, eelistatud on materjali WC-Co tüübi struktuur (Sele 8). Kõva faasi koostis peab ületama 50%. Normaalse lööginurga korral on eelistatud matriksi struktuur kõva faasi koostisega vähem kui 50% [13].



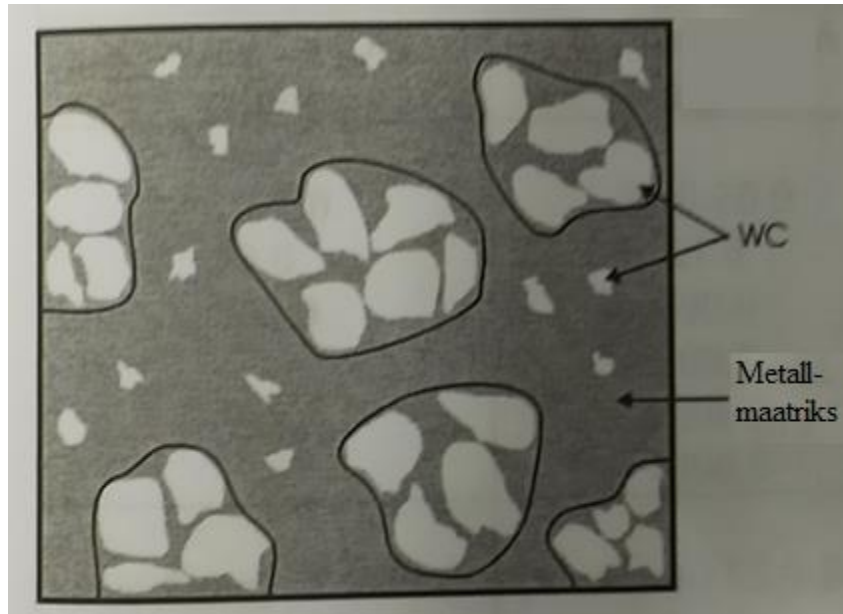
Sele 8. Materjalide ja pinnete soovituslikud struktuurid erinevate abrasiiv-erosioonkulumise tingimuste jaoks [13].

Mikrostruktuur

Abrasiiv-erosioonkulumise tingimuste jaoks on eelistatud materjalid ja pinned komposiitstruktuuriga: väga tugevad faasid (karbiidid, nitriidid jne) suhteliselt tahkes metallmaatriksis [13].

Optimaalsed struktuurid, sõltuvalt erosiooni tingimustest, on kas keraamilise struktuuri tüüpi teravate lööginurkade jaoks, või metallmaatriksiga komposiidi struktuuri tüüpi normaalse lööginurga jaoks. Kombineeritud abrasiiv-erosioonkulumise tingimusteks (nii teravad kui normaalne lööginurk) sobib kõige paremini multimodaalne, eelistatud on «topelt armeeritud» struktuuri tüüp. Antud struktuuri tüübi korral, WC-Co või sarnase komposiitmaterjali struktuuriga osakesed agglomeritud graanulite või tahkest sulamist kildude kujul on metalse maatriksi sees (Sele 9). Sarnane struktuur võib olla saadud kõvasulam- või kermispulbrist, mis on kaetud metalliga (koobalt või nikkel) ning pihustatud suurekiiruselise pihustusega.

Teine meetod saada selline sktruktuur on WC-Co või sarnase struktuuriga kermispulbri ja maatriksi pulbri segu sulatamine, näiteks NiCrSiB iseräbustuva sulami pulbri ja WC-Co või teiste karbiidarmatuuriga pulbri segu sulatamine ahjus. Lõplik struktuur koosneb WC-Co kõvasulami osakestest, mis asuvad maatriksis NiCrSiB sulamist, milles on väikesel määral lahustunud volframkarbiidi osakesed [13].



Sele 9. Topelt armeeritud pinde skemaatiline struktuur [13].

Poorsus

Minimaalne poorsus (alla 3 %) materjalides, mis on saadud pulbermetallurgia meetodil, samuti kõrgtemperatuurilise termilise pihustamise protsessiga saadud pindes, garanteerib kõrget tihedust ning kõrget vastupanu abrasiiv-erosioonkulumisele ekstreemalsetes tingimustes (tahkete metallide vastupanu gaastabrasiivsele kulumisele võrreldes pehmete metallidega on kõrgem kuni 50 korda, sõltuvalt kulumise tingimustest, ning suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamismeetodiga pinnete vastupanu kulumisele on 10 korda kõrgem kui standartsel terasel) [13].

Keskmise ja kõrge poorsusega (rohkem kui 5 %) pinded, samasuguse kõvadusega, saadud erinevate meetoditega (leek-, plasma-, detonatsioonpihustamisega) võivad eristuda ühe suurusjärgu võrra nende kulumisele vastupanu järgi samasugustes kulumise tingimustes. See tähendab, et ainult suurekiiruseline hapnik-kütuspihustus, või suurekiiruseline õhk-kütuspihustus, või gaasleekpihustus garanteerib madalat poorsust (ca 1-3%) ning kõrget vastupanu kulumisele abrasiiv-erosioonkulumise tingimustes [13].

Pinde paksus

Pinde tööstus- ja kaitsepotsiaal on määratud nende paksusega ja erosiooni lineaarkiirusega. Viimane sõltub osakeste kontsentratsioonist ja erosiooni intensiivsusest (kulumine abrasiivi materjali massiühikute). Erinevate materjalide ja pinnete (keraamika, tahked metallid) lineaarkulumise materjalidest järeldub, et lineaarerosiooni kiirus ühe kilogrammi abrasiivi kohta on 0.01-0.1 mm vahel tahkete metallide jaoks ja kuni 0.5-0.6 mm keraamika jaoks suure lööginurkade all (Tabel 2) [13].

Tabel 2. Materjalide ja pinnete erosiooni lineaarkiirus toatemperatuuril

Materjali või komposiidi tüüp	Lineaarkulumise kiirus, mm/kg	
	Väikese lööginurga korral	Suure lööginurga korral
Keraamika		
Al ₂ O ₃ , SiN, B ₄ C	0.05–0.06	0.1–0.4
SiC, Al ₂ O ₃ + ZR/TiNC	0.12	0.6
Al ₂ O ₃	0.003	0.008
Al ₂ O ₃	0.001	-
Si ₃ N ₄	0.0001	-
Sialon	0.0001	-
Tahked metallid		
WC – (6 – 25)Co	0.08-0.27 (mm/tund)	0.17–0.27 (mm/tund)
WC – 15Co	-	0.02–0.1
Cr ₃ C ₂ – Ni	-	0.02–0.24

Tabel 2 (jätkub). Materjalide ja pinnete lineaarerosiooni kiirus toatemperatuuril

Pihustatud pinded		
HVOFS WC – Co	0.01–0.02	0.04–0.06
HVOFS NiCrSiB	0.1	0.2
FSF NiCrSiB	0.04	0.2

Praktikas, erosiooni lineaarne kiirus (kulumine mm ühe abrasiivühiku kohta, mm/kg) sõltub osakeste kontsentratsioonist, mis võib olla erinev. Ta erineb masinates, mis töötavad erinevates abrasiiverosiooni tingimustes: väga suur materjali osakeste kogus lihvimisseadmes, näiteks, on omane paagutuspulbritele; madalate kontsentratsioonidega erosioon on omane ventilaatoritele, heitgaaside ventilaatoritele, jne. Kui esimese variandi puhul kulumist mõõdetakse kümnendikes mm-tes tunni jooksul, siis osakeste madala kontsentratsiooni puhul see on sajandik või tuhandik mm tunnis. Sõltuvalt erosiooni tingimustest, katte paksus varieerub 0.02–0.1 mm vahel [13].

Termopihustusmeetodid on enamasti kasutusel pinnete tootmises, mis on mõeldud kaitseks abrasiiv-erosioonkulumise eest. Need meetodid võimaldavad toota erosioonkulumiskindlad pinded, paksusega mitu kümnendikku millimeetrist. Samas, pealesulatatud pinde paksus võib ulatuda kuni 10 mm [13].

2. Kulumiskindlad pihustuspulberpinded.

2.1. Kulumiskindlate pihustuspulberpinnete rakendamise põhjused ja eelised.

Üks peamistest arenguprobleemidest masinaehituse juures on kvaliteedi, kindlustuse ning vastupidavuse suurendamine detailidel, sõlmedel ja mehhanismidel. Peamine põhjus, nemad miks lähevad tööst välja on kulumine. Aktuaalne problem masinaehituses seisneb suurte mehhanismide kulumises, sest detailide kvaliteet suurendatakse (detailid, mis töötavad abrasiiv - ja korrosioon-abrasiiv kulumise tingimustes) [14].

Masinate detailide töö pinnatele vastavalt nende kasutamise tingimustele esitavad määratud nõuded erinevatel omadustel: kulumiskindlus, kuumuskindlus, korrosioonikindlus ja teised. Kulumiskindla pinde kasutamine masina detailide kaitsmisel võimaldab tootma masina ja mehhanismi vastutusrikkaid detaile tavalistest konstruktsiooni terastest. Olulisemad faktorid, mis määravad masina detailide ja konstruktsioon elementide eksploatatsiooni kindlust ja kasutusiga on detailide ja elementide materjali pinna omadused. Masina detailide kasutusiga saab saavutada kihti või pinde moodustamisega nende detailide ja elementide peal, mis on nõutud kõrgetasemeliste omadustega – kulumiskindluse, kõvaduse jt [14, 15].

Peamine kaitsekihtide tehnoloogiate tekke ja arengu põhjus seisneb selles, et oli soov tõsta autode ja mehhanismide detailide tööiga. Pindamissüsteemi optimisatsioon pakub vastavat koostise valikut, selle struktuuri, poorsust arvestades nii kihi katmise temperatuuri kui ka töö temperatuuri, materjalide kokkusobivust, pindamismaterjali kättesaadavust ja hinda ning võimalust selle uuendada, remontida ning teostada hooldusi eksploatatsiooni ajal [15].

Ebatöökindla katte kasutamine mille paksus töö jooksul märgatavalt väheneb, võib viia kogu detaili tööea vähenemiseni. Komponentide vastastikune difusioon alusest pindesse ning vastupidi võib viia sulami vaesumiseni või rikkastumiseni (ühe elemendiga). Termiline vastastikmõju võib muuta aluse mikrostruktuuri ning kutsuda pindes esile jääkpingeid. Arvestades loetletud optimaalne süsteemi valik peaks garanteerima selle stabiilsust - see tähendab, selliste omaduste säilitamine nagu vastupidavus (erinevates aspektides), plastilisus, löögitaluvus, väsimuskindlus peale igat mõju. Kõike tugevamat mõju mehhaanilistele omadustele annab eksploatatsioon ajal kiire üleminek kuumutuselt jahutusele ja vastupidi, aga kõige tähtsam parameeter on temperatuur ning aeg, millega mõjutatakse materjali,

vastastikmõju ümbritseva töökeskkonnaga määrab keemilise mõju karakteri ning intensiivsust [15].

2.2. Pihustusmeetodid

Mitmekülgset, kiiresti arenevat tehnika valdkonda tutvustab metallist, keraamikast või polüomeersetest materjalidest kihi pealekandmine gaastermilise pihustamise meetodiga [16].

Need protsessid on ülesehitatud pinnatud materjali soojendamisel või sulatamisel ning selle pihustamisel detaili pinnale, et saada pinde, mis omab kindlaid omadusi ning head naket alusega.

Pulberpihustamine peetakse tänapäeval enamlevinumaks kaitsetehnoloogiaks metallkonstruktsioonides. Näiteks, pulberkõvasulampinne oma omaduste poolest ületab galvaanilised Cr(VI) pinded, ning omab palju eeliseid võrreldes tavalise värvikattega. Pulberpihustamise tulemusena tekib tugev kauakestev pinne, mis omab häid käitusomadusi, sealhulgas korrosiooni-, löögi- jm kindlust. See suurendab detailide tööiga kümneteks aastateks. Seejures sellise pindega kaitstud pinna hind on oluliselt väiksem kui analoogse galvaanilise pinde oma [17].

Enamlevinud pihustatava materjali soojendamise või sulatamise allikad on gaasleek, elektriline kaar või plasmakaar [16].

On teada ka teisi võimalusi, et soojendada pinnatav materjal, näiteks kõrgvoolu, kõrgvoolu impulslahenduse, hapnik-küte segu plahvatusliku sütimisega jne. Kuid need viisid on leidnud kasutamist väiksemal määral [16].

Sellepärast järgnevas esitluses me piirdume ainult nelja peamise (mida kasutatakse gaastermilise soojendamise allikana) pihustamise meetodi vaatlemisega: leekpihustuse, plasmapihustuse, detonatsioonpihustuse ja suurekiiruselise hapnik-(õhk-)kütuspihustusega [16].

Sellise meetodiga võib pihustada pindeid praktiliselt kõikidest metallidest ja materjalidest (keraamikast, termoplastist jms), traadist või pulbritest [16].

Pihustamispindeid ei tohi kasutada iseseisvalt nagu konstruktiivset materjali detailide valmistamisel, mis on asetatud venitavate ja painutavate koormuste alla. Kuid pinne töötab suhteliselt rahuldavalt koos materjali alusega [16].

Termopihustatud pindeid on kasulik rakendada erinevates toodangu maštaabides - individuaalsest ning väikeseeriatootmisest kuni suurseriatootmiseni (automatiseeritud). Nende meetodite suur efektiivsus ning universaalsus määratakse nende printsiibiliste omaduste põhjal [18]:

- võimalusega kanda pindeid erinevatest materjalidest-puhtadest metallidest ning sulamitest nende põhjal, metallilistest ühenditest, oksiididest, orgaanilistest ainetest ning paljudest teistest ainetest, kaasaarvatud nende materjalide erinevatest kombinatsioonidest;
- pinnete saamine absoluutselt igasugustel konstruktsioonidel ja materjalidel - metallidel, klaasidel, keraamikal, plastmassil, tekstiilil, paberil jne;
- termiliste deformatsioonide puudumine ja sellega seotud toote vastupidavuse languse puudumine pinde pealekandmisega tänu sellele, et termopihustamisel soojussisestus detaili on minimaalne;
- pinde materjali sääst, sest pinnete paksus on tavalisest 100-500 μm ;
- suure termopihustamismeetodite tootlikkus, mis kõigub erinevate protsesside korral ühest kuni 20 kg pihustatud materjali tunnis.

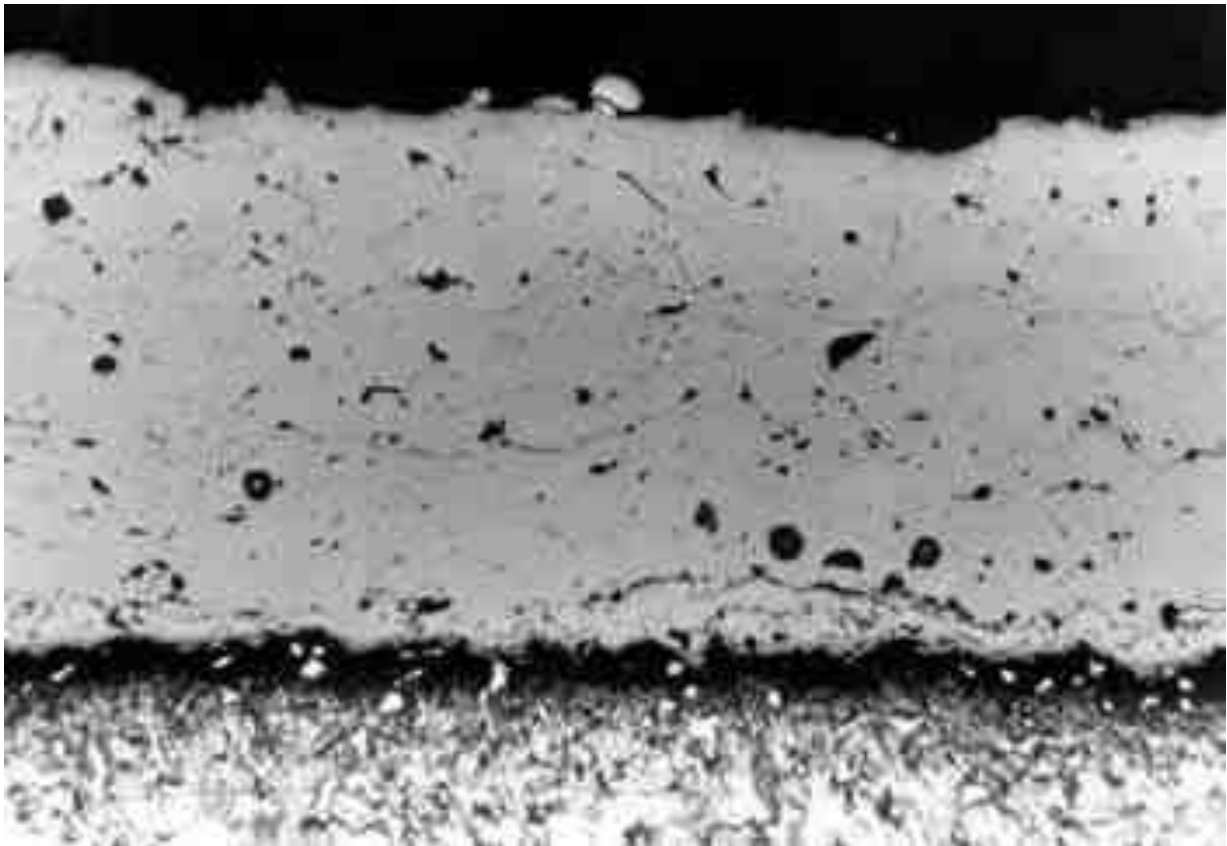
Tänu tänapäeva termopihustatud pinnete tehnoloogiatele, võib lahendada terve rida tähtsaid masinaehituse ülesandeid. Esmalt, nende juurde kuulub viia unikaalsete omaduste materjalide ja pinnete saamist, mis on vajalikud uue tehnika arendamiseks [18].

2.2.1. Leekpihustus.

Pinnete leekpihustamismeetod hõlmab pihustamismaterjali osakeste, mis omavad vajalikku soojus- ja kineetilise energia varu, kihi formeerimist aluspinna peal põlevgaasijoa abil. Põlevgaasijuga moodustub süttiva segu põlemise tulemusena, mis voolab põleti düüsavast suure kiirusega. Süttiva gaas-hapnik joa temperatuur võib ulatuda kuni 3200 C°, osakeste sadestumise kiirus on 150-160 m/s kuni ülehelikiiruseni [19].

Pihustamise meetod vajab hoolikat pinde ettevalmistust, et tagada vastupidav nake ning on soovituslik, et saada suure paksusega pindeid [20].

Pihustamise tagajärjel tekkib kiht, paksusega kuni 3 mm ning nakketugevusega 5-45 MPa jääkpoorsusega 5-25%.



Sele 10. Tüüpiline kihi struktuur, mis on saadud leekpihustamisega [19]

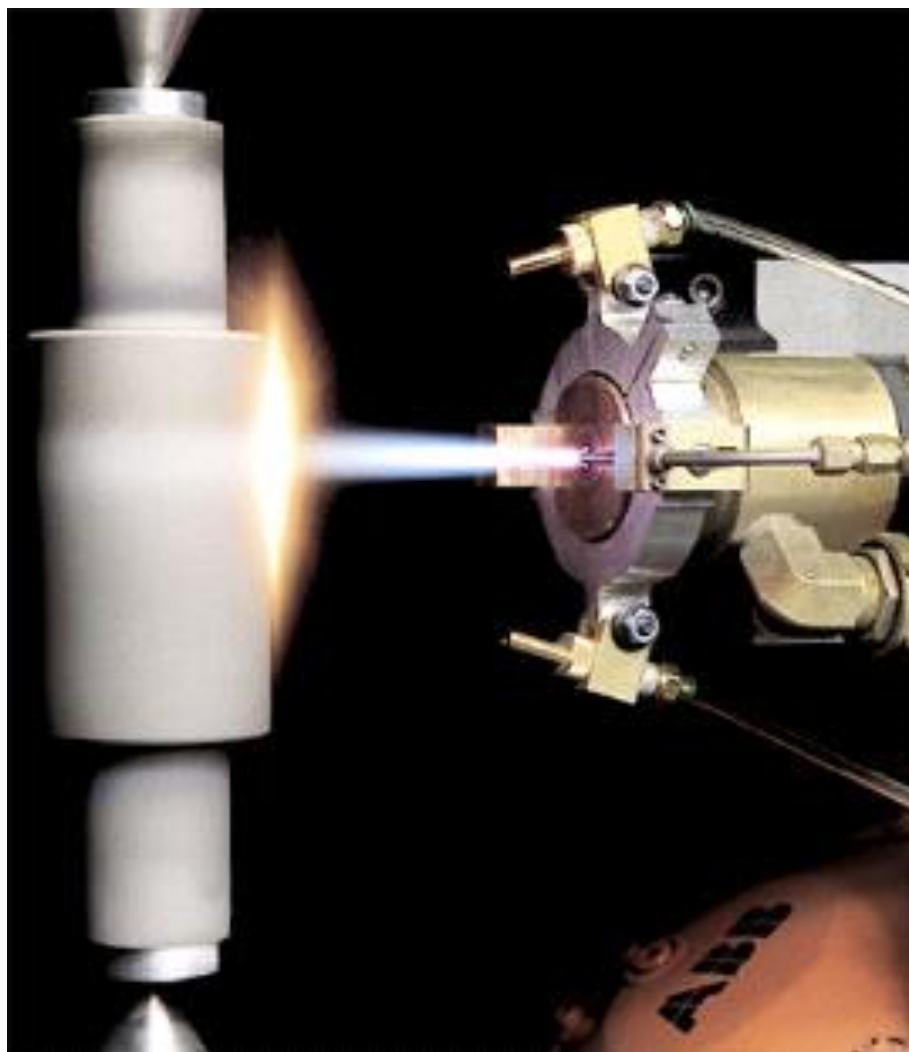
Leekpihustus erineb suhtelise lihtsuse ja mobiilsuse poolest, mis võimaldab pihustada pindeid gabariitsetele detailidele ning võimaldab pihustamist lokaalsetes, raskesti ligipääsetavates kohtades. Antud viis on enam eelistatud järgneva lasertötluse jaoks, sest võimaldab pihustada pindeid piisava nakkega ning kontrollitava paksusega [19].

Oma keemilise koostisega ning osakeste struktuuriga termopihustamispulbrid jagunevad järgmisteks klassideks: metallid (Ni, Al, Mo, Ti, Cr, Cu); sulamid (legeeritud sulamid ja malm; nikli, koobalt-, titaansulamid, sealhulgas iseräbustuvad Ni-Cr-B-Si, Ni-B-Si, Co-Ni-Cr-B-Si, Ni-Cu-B-Si sulamid; oksiidid (Al, Ti, Cr, Zr jm nende kompositsioonid); hapnikuvabad tulekindlad ühendid ning kõvasulamid (karbiidid, Cr, Ti, W ja muud nende segud koos Co ja Ni), komposiitpulbrid (plakeeritud Ni-grafiit, Ni-Al jm, konglomereeritud - Ni-Al, NiCrBSi-Al jm) mehhaanilised segud (Cr_3Cr_2 + NiCr, NiCrBSi + Cr_3C_2 jm) [19].

Komposiitpulbrilised materjalid kasutatakse, et taastada terasest, malmist, allumiiniumist masinate detailid. Kasutatakse spetsiaalsed modifitseeritud lisandid ning täiteained, et saada tahke polümeeri suurenduse ning kompositsioneeritud materjalid, kus tahke komponent on paigutatud suhteliselt pehme maatriksi (nt. elektrimootori võllid, ühendite surveamine [19]).

2.2.2. Plasmapihustus.

Plasmapihustus on üks pinnete termopihustamismeetoditest, mis on kasutusel masinate detailide (pinnete), mehhanismide, aparaatide, seadmete jms tugevdamise ja taastamise eesmärgina. Seda pihustamismeetodit tööstuslikus mahus detailidel hakkati kasutama alates XX sajandi 50dest aastatest [21].



Sele 11. Plasmapihustus [23]

Plasmapihustamise tehnoloogiline protsess koosneb aluspinna eelnevast puhastamisest (mistahes meetodiga), aluspinna aktiveeritavast töötlemisest (näiteks liivapritsiiga) ning seejärel pinde pealekandmisest [22]. Plasmapihustusmeetodil pihustatud materjal soojeneb vedela olekuni ning kandub üle (tänu plasmavoolu kõrge temperatuurile) töödeldatud pinnale. Pihustatav materjal toodetakse välja kangide, pulbri või traadi kujul. Pulbriline

meetod on enamlevinum. Plasmapihustus meetodi unikaalsus seisneb kõrges temperatuuris (kuni 50000 C°) plasmilises nires ja kõrges osakeste kiiruses (kuni 500m/s) plasmajoas. Pihustatava pinde temperatuur ei ole kõrge, mitte enam kui 200 C°. Plasmapihustuse tootlikkus on 3-20 kg/tund plasmotronide puhul, mille võimsus on 30–40 kWt ning 50-80 kg/tunnis seadmete jaoks, mille võimsus on 150–200 kWt [23].

Plasmatmoodustatavateks gaasideks on lämmastik, heelium, argoon, vesinik, nende segud ja õhu segu metaani, propaani või butaaniga. Plasmapihustamiseks kasutatakse traati, sealhulgas pulbrilist, mustadest ning värvilistest metallidest pulbreid, nikli, molübdeeni, kroomi, vaske, metallioksiidide, metallkarbiidide ning koobalti ja nikli kompositsioone, metallisulameid, komposiitmaterjale (grafiit, nikkel, nikkel-alumiinium jms) ning mehhanilisi segusid metallisulamitest ja karbiididest. Pihustamise režiimi määramine võimaldab pinnata nii rasksulavad kui ka kergsulavad materjalid. Plasmapihustamise aluseks võivad olla metallid ja mittemetallid (plastmass, beeton, grafiit, jms). Et pinnata väikseid pindu kasutatakse mikroplasmapihustamisviisi, mis võimaldab kokku hoida pihustavat materjali (pihustamise tsooni laius 1–3mm) [23].

Plasmapihustamine on laialt kasutusel, et tugevdada ja taastada detailide tööpindu. Olulisteks antud tehnoloogia tehno-majanduslikeks eelisteks on [21]:

- protsessi kõrge tootlikkus;
- pinnete kõrge kvaliteet, eriti ühiskaitse tingimustes;
- suur kogus tehnoloogilisi faktoreid, mille varieerumine tagab pihustamise painduvat reguleerimist;
- kõrge pulbermaterjali kasutamiskoeffitsient;
- laialdane meetodi kättesaadavus nii töötlevas kui ka remonditööstuses;
- ökonoomsus;
- lihtsamate seadmete madal hinnaklass;
- kompleksmehhanisatsiooni ja protsessi automatiseerimise võimalus;
- kallide detailide ressurside pikendamine;
- unikaalne võimalus saada detailide tööpindu eksploatatsiooniliste omadustega;
- pulbermaterjalide universaalsus, sealhulghad kõrgtemperatuurseks sulatamiseks.

Plasmapihustamismeetod omab ka miinuseid, mis sisuliselt on tehnoloogia paremaks muutumise reserv [21]:

- madal elektri kasutamise koefitsient, pulbrite puhul 0,001—0,020;
- annab poorset katet (2-15%), mõnikord poorsus tagab pinde määrdaine hoidmist, mis efektiivselt mõjutab detailide tööd hõõrdumise tingimustes;
- madal pinde nakke tugevus, pinde ja aluspinna vahel ja pinde sees 80–100 MPa;
- kõrge müratase (60–120 dB);
- individuaalsete kaitsmisvahendite vajadus (kaitse ohtlike mõjude eest pihustamise protsessi käigus).

2.2.3. Detonatsioonpihustus.

Termopihustatavate kulumiskindlate pinnete arengu tendents seisnes tugevduse ja vastupidavuse suurendamises. Selle eesmärgiga oli Union Carbide (UC) firmaga Ameerikas 50ndate alguses väljatöötatud üleheliikiiruseline detonatsiooniline seade. Gaasi aegumine tüvi peal pikkusega 1,4 m oli 1300 m/s. Pinnete tihedus oli viidud 98% ni. Peamine detonatsioonpihustamisportsessi puudus oli madal tootlikkus, mis oli seotud diskreetse (tsüklilise) töörežiimiga [24].

Detonatsioonpihustamismeetod on üks termopihustamismeetod, mis kasutab küttegaaside energiat (enamasti propaan-butaan) segus hapnikuga, samuti koos suruõhuga (lämmastiku, argooniga). Detonatsioonpihustamismeetod, kasutades gaassegude plahvatuse energiat, on tsükliline protsess, mis omab suurt võimsust ning lihtsustamis mundamine energiat – kasulikuks tööks [24].

Detonatsioonpihustamismeetodi eelised on:

- pinna kõrge nake (80–250 MPa)
- pinde madal poorsus (0,5-1%)
- pihustatava detaili deformatsiooni puudumine

Puudusteks võib peeta madalat tootlikkust ning olemasolevate seadmete ebapiisavat töökindlust [24].

Detonatsioonpihustumise tehnoloogia võimaldab mitte ainult taastada detailide töö pealispinnad, vaid ka märgatavalt suurendada tööiga tänu kulumiskindlatele materjalide

kasutuselevõtmisele. Detonatsioonipihustumis meetod võimaldab peale kanda pindeid metallide, nende sulamite, metallide oksiidide ja karbiidide pulbritest [24].

Sõltuvalt konstruktsioonist tsükli sagedus võib ulatuda 8–10 Hz, kuid enamustel juhtudel ta on võrdne 3–4 Hz. Atsetüleenile lisaks, kütusena võivad olla teised gaasid, näiteks metaan või propaan-butaan. Selle juures põletamistsooni üleminek detonatsiooniks suureneb. Et vähendada pihustatud materjali osakeste temperatuur plahvatuslik segu lahjendatakse lämmastiku või hapnikuga. Osakeste soojendamise kuni plastilise olekuni (kombinatsioonis saadud kineetilise energiaga) võimaldab saada katte suure nakkega (kuni 250 MPa) ning madala poorsusega (vähem kui 2%) [24].

Detonatsioonipihustumis protsessi saab iseloomustada paljude tehnoloogiliste parameetritega. Tähtsamad neist on:

- Pulbri laadimise sügavus, s.t kaugus pulbri sisestamiskohast kuni kahuritoru lõiku
- Gaaside kulutamise suhe:
 - kütus
 - hapnik
 - lämmastik või hapnik

s.t töö plahvatusliku segu koostis

- lämmastiku kulu kahuritoru puhastamiseks
- ühe tsükli jooksul pihustava kihi paksus
- pihustamise distants
- keemiline ning osakeste koostis ning pulbri tootmisviis

Koormuse sügavusest sõltub kahuritoru sees olevate pulbri osakeste viibimise aeg, detonatsiooni produktide füüsikalise-keemilise vastastikmõju. Segu koostis mõjutab pulbri osakeste energeetilisi omadusi ning määrab pihustatava materjali keemilist mõju detonatsiooni produktidele. Sõltuvalt töösegu koostisest võib toimuda täielik või mittetäielik küttegaasi põlemine. Optimaalseks tööseguks võib olla segu, mis läheneb stöhhiomeetrilisele. Kuid, maksimaalsed detonatsiooni kiirused ja pinde tugevus allumiiniumoksiidi puhul (antud juhul tugevusega määratakse optimaalsed tingimused katte formuleerimiseks) ei lange kokku. Samas, karbiiditest pinde pealekandmisel liigne süsinik gaassegus kaitseb karbiidi liigsest süsinikuärastamisest [24].

Üksiku kihi paksus on 5–20 μm . Pihustamise kaugus määratakse laine pindelt peegeldatud osakeste voolu minimaalse vastastikmõjuga. Praktiliselt erineva diameetriga kahuritorude jaoks on see suurus 150–200 mm [24].

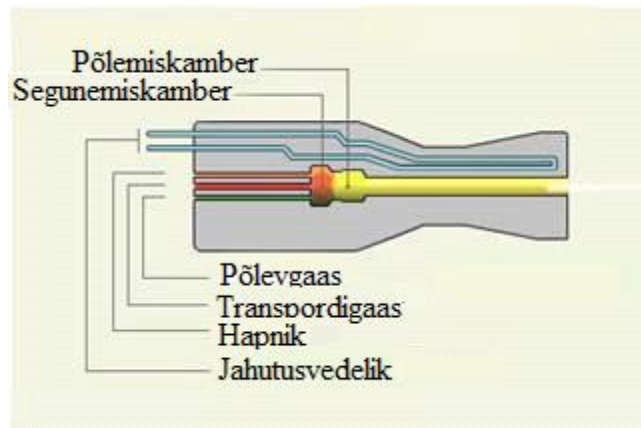
2.2.4. Suurekiiruseline hapnik-(õhk-)kütuspihustus.

Suurekiiruselist hapnik-kütuspihustamist peetakse kõige kaasaegseaks termopihustamistehnoloogiaks. Euroopa, Põhja-Ameerika riikides suurekiiruseline hapnik-kütuspihustamine peaaegu tõrjus välja galvaansadestamist ning aursadestsuspindamist paljudes sektorites. Kõvasulamitega pinded, mis olid peakantud suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamise meetodiga, ületavad galvaanilisi kõvakroompindeid, mille tootmisprotsess on peetud äärmisel vähitekkitavaks [24].

80ndate aastate alguses tekkisid suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamise seaded, mis olid rajatud klassikalise raketi vedelmootori põhjal, gaasvoolu kiirusega enam kui 2000 m/s. Pinnete tihedus, saadud sellistel seadmetel, ulatub kuni 99%ni. Pindematerjalina kasutatakse karbiidide, metallkarbiidseid materjale, Ni, Cu jms sulamite pulbreid. Et suurendada osakeste kiirust, suurendatakse põletuskaambri rõhk kuni 1;0;1;5 MPa (siis suureneb produktide põletamiskiirus) [24].

Tööprotsess suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamise põletuskambris on analoogne raketti mootori tööprotsessile [24].

Suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamise ajal kütused põlevad põletuskambridest kõrgrõhu all, kindlustades kriitilise rõhu erinevuse ülehelikiiruse düüsidest (Sele 12). Selline meetod erineb traditsioonilisest leekpihustamisest, mille ajal kütus põleb välimises tõrvikus, atmosfäärsel rõhuga [25].



Sele 12. Suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamise põletuskambri konstruktsioon [25].

Suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamise korral pindes on vähem oksiide, kui teiste pulberpihustamise meetodite korral. See omab eriti palju tähtsust, et saada korrosioonikindlaid, tihedaid pindeid. Kuid võrdlemisi väike osakeste kiirus, gaasleegilise pihustamise ajal, ei garanteeri tihedat katte formeerimist. Osakeste pealispind jõuab oksüdeeruda. Osakeste kiiruse suurenemine, nende vähima temperatuuri korral, võimaldas vähendada osakeste oksüdatsiooni ning suurendada pulberpinne tihedust. [24].

2.3. Pihustuspulbrite põhilised saamismeetodid.

Pulbermetallurgia meetodid võimaldavad saada uusi materjale, mida on raske või isegi võimatu saada teiste meetoditega. Pulbermetallurgia annab võimalust viia miinimumini metalli jäägid, lihtustada detailide valmistamise tehnoloogiat ning kahandada nende tööstuse tööriskust [26].

Pulbrist detailide tehnoloogiline valmistamisprotsess hõlmab pulbri saamist, täiteaine ettevalmistust, kokkusegamist, formeerimist, kuumpressimist vm. paagutamistehnoloogiat. Mõnikord kasutatakse lisatööstust, mis koosneb õlitamisest, termilisest ja keemilisest tööstusest, kalibreerimisest ja ka lõiketööstusest. [26].

Pulbri osakeste suurused on tavaliselt 0,1 μm kuni 0,1 mm. Suuremad fraktisoonid nimetatakse graanuliteks, väiksemad puudriks [26].

Metallist pulbreid saadakse mehhaaniliste või keemia-metallurgiliste meetoditega. Füüsikalise mehhaaniliste meetodite alusteks on metallide mehhaaniline jahvatamine vedelas ja tahkes

olekus. Nende hulka kuuluvad purustamine ja jahvatamine veskis, sulatatud metalli pihustamine suruõhu, gaasi või vedeliku jukka, granulatsioon sulatatud metalli valades vedelikuks jm [26].

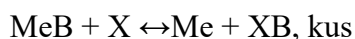
Keemia-metallurgiliste viiside hulka kuuluvad metallide taastamine oksiididest, metallide elektrolüütiline sadestumine vee soolalahustitest, karboniseeritud metallühendite termiline dissotsiatsioon [26].

2.3.1. Taandamine soolalahustest.

Oksiidide ja soolade taandamine on üks levinutest ja ökonoomsetest viisidest, eriti kui lähtematerjalina kasutatakse maaki, metallurgia tööstusjääke ning teisi odavaid tooraineid [27].

Tehnilises mõttes nimetatakse taandamiseks metalli saamine tema keemilisest ühendist mittemetalli komponendi äravõtmisel (hapnik, soola kation) aine abiga, mida nimetatakse taandajaks. Taandamisprotsess on samal ajal ka oksüdatsiooniprotsess. Kui algne keemiline ühend (oksiid, sool) kaotab mittemetalli koostiosa või taandajat, siis taandaja reageerib sellega või oksüdeerub [27].

Üldjuhul taandamisreaktsiooni võib kirjutada kui



- Me on metall, pulber, mida on vaja saada
- B on taastuva keemilise ühendi mittemetalne komponent (hapnik, soola kation jms);
- X on taandaja;
- XB on taandamise tulemusena tekkiv keemiline ühend

Nooled tähendavad, et reaktsiooni käigus võib juhtuda korduv algse ühendi saamine (MeB) saadud metalli (Me) ja taastuja (XB) reaktsioonil. Et hinnata taandamisreaktsiooni kulgemise võimalikkust, peab võrdlema ühikuid, mis iseloomustavad keemiliste sidetemetega tugevust metalliühendis (MeB) ja saadud ühendis (XB). Antud suuruste mõõdupuuk on vaba energia maht, mis vabaneb vastava keemilise ühendi tekkimisel. Mida rohkem energiat vabaneb, seda tugevam on keemiline ühend. Sellepärast taandamisreaktsioon on võimalik ainult juhul, kui

taandaja ühendi moodustumisel (XB) eraldub energiat rohkem, kui metallühendi moodustumisel (MeB) [27].

Taandajaks võib olla ainult see aine, mis omab suurt keemilist sarnasust taandaja mittemetalli koostiosaga. Pulbermetallurgias on enamlevinumad [27]:

- vesinik;
- süsinikoksiid;
- konverteeruv looduslik gaas;
- dissotsieerunud ammoniaak;
- endotermiline gaas;
- kõva süsinik (koks, süsi, tahm);
- metallid.

2.3.2. Pihustus-jahutusmeetodid.

Üks metallpulbrite enamlevinud saamise meetodeid on pihustus-jahutusmeetod sulatatud metalli joa pihustamine jahutavas keskkonnas. Sellistest pulbriest saadud pinded omavad suuremat tugevust ja plastust, mis on tagatud osakeste kiire jahutusega vedelmetalli pihustuse ajal. See meetod on suure tootlikkusega ning lubab lisada sulami koostisesse erinevaid legeerivaid lisandeid [28].

Pihustus-jahutusmeetodiga võib saada peaaegu mistahes keemilise koostisega pulbrit (suure ühtluse puhul). Näiteks, rauapulbri legeerimisel molübdeeni, kroomi, nikli, volframiga võib suurendada pulbri mehhaanilist tugevust, korrosioonikindlust, kuumuskindlust. Sellisest pulbriest valmistatakse vastutuskindlaid hüdroaparatuuri, tuumatehnikat, raketimootorite osi [28].

Kõige sagedamini sulami pihustamine toimub surveõhujoaga vette. Seejures algse metallina võib kasutada ka metallpuru ilma selle ümbersulamiseteta. See võib olla üks tähtsatest meetoditest, kuidas metalli kokku hoida, sest puru ümbersulatus viib tähtsate legeerelementide väljapõlemiseni ja vingugaasi tekkimiseni [28].

Praktikas on aga ka teine meetod sulatatud metalli pihustamiseks. Selle meetodi põhimõte seisneb vedelmetalli pihustamises kiirelt keerleva ketta abil. Tsentrifugaaljõu toimel

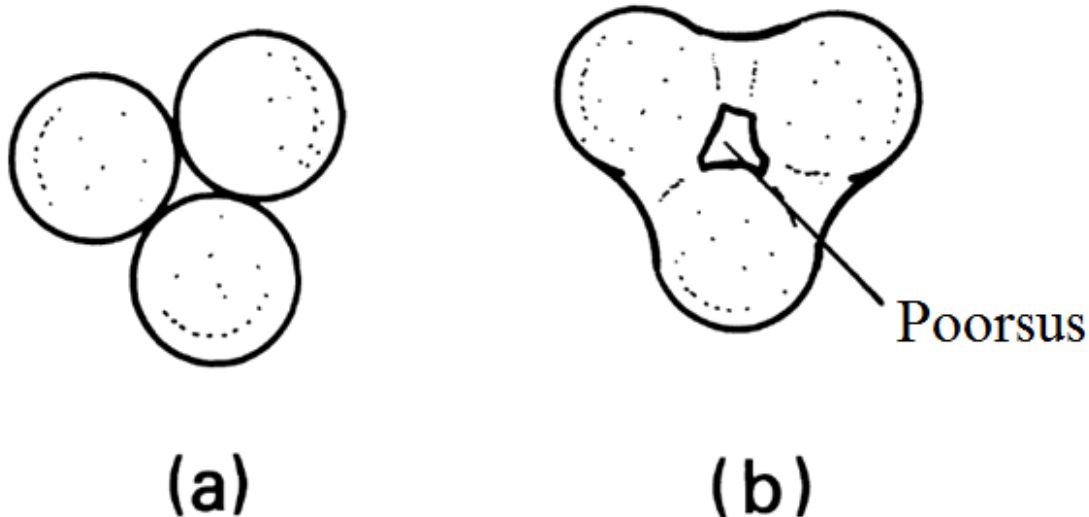
metallosakesed lendavad laiali ja satuvad ringkambrisse, mis on jahutatav vedela heeliumiga, peale mille nad sorteeritakse vastavalt suurusele. Selle meetodi eelis on see, et see annab võimaluse kiirelt korrigeerida pulbri keemilist koostist (vastavalt tööstuse nõuetele) ning ei nõua kallist tehnikat [28].

2.3.3. Sulatamine/paagutamine ja jahvatamine.

Termin paagutamine viitab osakeste ühinemisele kogerentsete kehade moodustamisega. Kasutusel on kaks etappi: esimene, kui kasutatakse pulbriosakesi sisaldavat ainet (plastifikaatorit), ning teine, kui toimub paagutamise operatsioon. Need etapid mõnikord järgnevad soolade taastumisele [29].

Paagutamise termin viitab osakeste ühinemisele ühiselt pinge ja soojendamise abil. Pressitud materjal soojendatakse temperatuurini, mis on madalam tema sulamistemperatuurist ning omavahel seotud osakeste ühinemine toimub, tänu osakeste materjali(de) omavahelise diffusioonile. Osakesed ühinevad omavahel ning edaspidi lihvimine ja sõelumine on vajalikud, et saada vajalik osakeste fraktsioon suuruse järgi. Seel 13(a) on näidatud koherentselt seotud üksikud osakesed. Poorsus võib olla vähendatud tänu suurematele pressi pingetele, suurematele paagutamistemperatuuridele ning tänu pikemale paagutamisaajale, kuid kuna paagutatud tooriku tugevus oluliselt suureneb, sellised muudatused võivad olla kahjulikud järgneva jahvatamise operatsiooni seisukohalt. Paljud WC-Co pulbermaterjalid on toodetavad sellise meetodiga [29].

Osakeste ühinemise protsess samuti võimaldab erinevate materjalide kombineerimist (näiteks, allumiiniumoksiid ja titaaniumoksiid, itriumoksiid ja tsirkoonoksiid, jne) ning mistahes teise protsessiga saadud väikeste osakeste utiliseerimist. Näiteks osakesed, mis on saadud soolade taandamisega, omakorda võivad olla algomeeritud. Sideaine kasutus ei ole vajalik, kui väikesed osakesed on piisavalt plastsed, et võivad olla konsolideeritud pressimisega piisavalt tugevaks toorikuks. Vaataata sellele, edaspidi sellise materjali jaoks on vajalikud jahvatus- ja sõelumisprotsessid. Peale paagutamist, eelsõelumine võib olla läbi viidud selleks, et klassifitseerida paagutatud osakesi suuruse järgi. Jahvatamise operatsiooni iseloom on üsna oluline, sest ta võib ning reeglina ka viib edaspidisele vabalt paagutatud osakeste purustamisele, [29].



Sele 13. Füüsilised protsessid, mis tekkivad osakeste paagutamise protsessi käigus. (a) Üksikud osakesed muutuvad koherentselt seotuks. (b) jäävpoorus [29].

Aglomereeritud (paagutatud ja jahvatatud) osakeste morfoloogia ei ole sfääriline, ta võib olla kirjeldatud nagu sfääriline välimuse järgi, rohkete nukkadega pinnal. Sellisel viisil, võis oodata, et selliseid pulbreid on raskem süüta pihustuspüstolisse. Reeglina, see on õige, kuid termopihustuse parameetrid selliste materjalide jaoks on reeglina optimeeritud sellisel viisil, et vältida pihustuspüstoli ummistamist pihustatava pulbriga. Oluliselt tähtsam aspekt on see, et teoreetiline paagutatud pulbrite tugevus, reeglina, on madalam võrreldes pulbritega, mis on saadud sulatamise ja jahvatamise tulemusena. Kuna on olemas empiiriline võrrand, mis seob pinde madalat tihendust ja madalat naket pulbriosakese komponendite vahel, paagutatud pulbri (või aglomereeritud ja paagutatud pulbri) puhul võib avastada, et selle tihedus on teoreetilisest madalam. Sellised pulbrid on vastuvõetavad ning võivad isegi omada lisaelist – madalamat hinda [29].

3. Mehhanooaktiveeritud termosüntees. Lühitutvustus, eelised võrreldes tavapaagutamisega.

Materjalide mehhanooaktiveerimine veskides on enamlevinuim tehnoloogiline operatsioon kaasaegses tööstuses. Mehhanooaktiveerimine on keemiliselt aktiivse aine saamine mehhaanilise jahvatamise viisil. Selle meetodi unikaalsus seisneb selles, et selle abil kergelt saadakse kristallide peenestamise tippastme. Peale selle, muutes režiime ja mehhanooaktiveerimise keskkonna, võib muuta materjalide karakteristikuid, saada uued materjalid ja faasid, sealhulgas metastabiilsed ja amorfseid. Mehhanooaktiveerimise meetodit peetakse nanokristallse oleku saamisel tahketes kehades kõige lihtsamaks [30].

Mehhanooaktiveerimisega võib töödelda väga erinevaid klasse ja materjale [31]:

- oksiidid (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , MgO , ZnO);
- karbiidid (SiC , B_4C , TiC)
- nitriidid (AlN , Si_3N_4)
- metallid, mittemetallid ning nende sulamid (W , Mo , NiTi)
- komposiitmaterjalid loodusliku ja sünteetilise toimega (boksiit, metallkeraamika, klaaskeraamika)
- tahked jäätmed

Löögi-, löögi-hõõrdumis, hõõrdumissrežiimides peenestamine viib struktuure defektide kuhjumiseni, pinna kõveruse suurendamiseni, faasimuutusteni ning isegi kristallide amorfsumiseni, mis mõjutab nende keemilist aktiivsust. Mehhanooaktiveerimine on mehaaniliste pingete loomine tahke keha osades koos edaspidise relakseerimisega. Mehhanooaktiveerimine toimub, kui defektide kuhjumise kiirus ületab nende hääbumise kiirust. See realiseerub niiõelda kõrgenergeetilistes aparaatides: planetaar-tsentrifugaal- ja nireveskites, desintegraatorites jm, kus kõrged sagedused ja mehhaanilise vastastikmõju on kooskõlas [31].

Pidevtoimega planetaarsed veskid on ettenähtud mitte ainult tahkete ainete efektiivseks jahvatamiseks, vaid võivad ka olla instrumendi rollis, mis võimaldavad teadmised siise viia mehhanookeemilisse sünteesi ja mehhanooaktiveerimist reaalsesse tööstusesse, avades uued võimalused selliste tööstusesse nagu: jäätmete ümbertöötlemine, ehitusmaterjalide tootmine, keraamika, väetised ning samuti ka uute materjalide uute omadustega loomine [31].

Planetaarsete veskide kasutamisalad [31]:

- keemiatööstus
- keraamiliste materjalide tootmine
- kuivade ehitussegude tootmine
- katalüsaatorite tootmine ja regeneratsioon
- abrasiivsete materjalide tootmine
- pigmentide jahvatamine
- pulbermetallurgia
- mäetööstus
- hüdro metallurgia ja pürometallurgia jaoks maagi kontsentratsioonide aktiveerimine
- farmaatsiapreparaatide tootmine
- kosmeetika tootmine
- väetiste tootmine
- raskeltpeenestatavate tahkete jääkmete ümbertöötlemine
- uute materjalide süntees

Näiteks, tänu prof. Peter Balas'e uuringutele, fosforväetised, peale mehhaanilise aktiveerimise, võivad kiirendada taimete kasvu 3-5 korda võrra, seejuures väetiste kogus, mis on taimel vajalik, väheneb mitu korda. Kivisüsi, mis on peenestatud 5 mikronini veega võib töötada nagu kütus diiselmootorite jaoks [31].

Pidevtoimega planetaarsüsteemidega veskites on 4 trummi, mis pöörlevad ümber kesktelje ja samal ajal ümber oma telje vastupidises suunas (nagu planeedid ümber Päikese). Trumlidese laaditakse kuulid ning pidevalt lisatakse tooraine jahvatamiseks. Materjali osakesed jahvatatakse tänu arvukatele kokupõrgete kuulide ja trumli seintega. Jahvatatud materjal lakkamatult laaditakse veskist välja. Planetaarsüsteemiga veskide efektiivsus on põhjustatud kuulide kineetilise energiast, mille nad saavad tänu kaalu mitmekordsele suurendusele (proportsionaalselt tsentrifugaaljõu kiirendusele) ning nende liikumise kõrgele kiirusele. Sattudes trummide ülikõrge koostoime alasse, materjalid mitte ainult jahvatuvad, vaid ka „laadivad“ ennast energiaga, mis võib nende füüsilisi ja keemilisi omadusi väga muuta [31].

Teiste peenestamistehnoloogiate ebapiisav energia ei võimaldanud läbi viia efektiivset ja ökonoomset materjalide mehhaanilise aktiveerimist. Antud probleemi võib illustreerida näitega tavaelust. Graniitpulbri utiliseerimisprobleem, mis on jääk, mida saadakse graniitkullustiku ja -liiva tootmisel, võib olla lahendatud tänu mehhaanilise aktiveerimisele. Graniitpulbri

mehhaanilise aktiveerimise puhul võib saada esimese suuruse vähendamist lendtuhani. See võimaldab kasutada graniitpulbri bettooni tootmisel täiteainena ning kokku hoida kuni 25% tsementi, mitte et bettooni tugevus langeks [31].

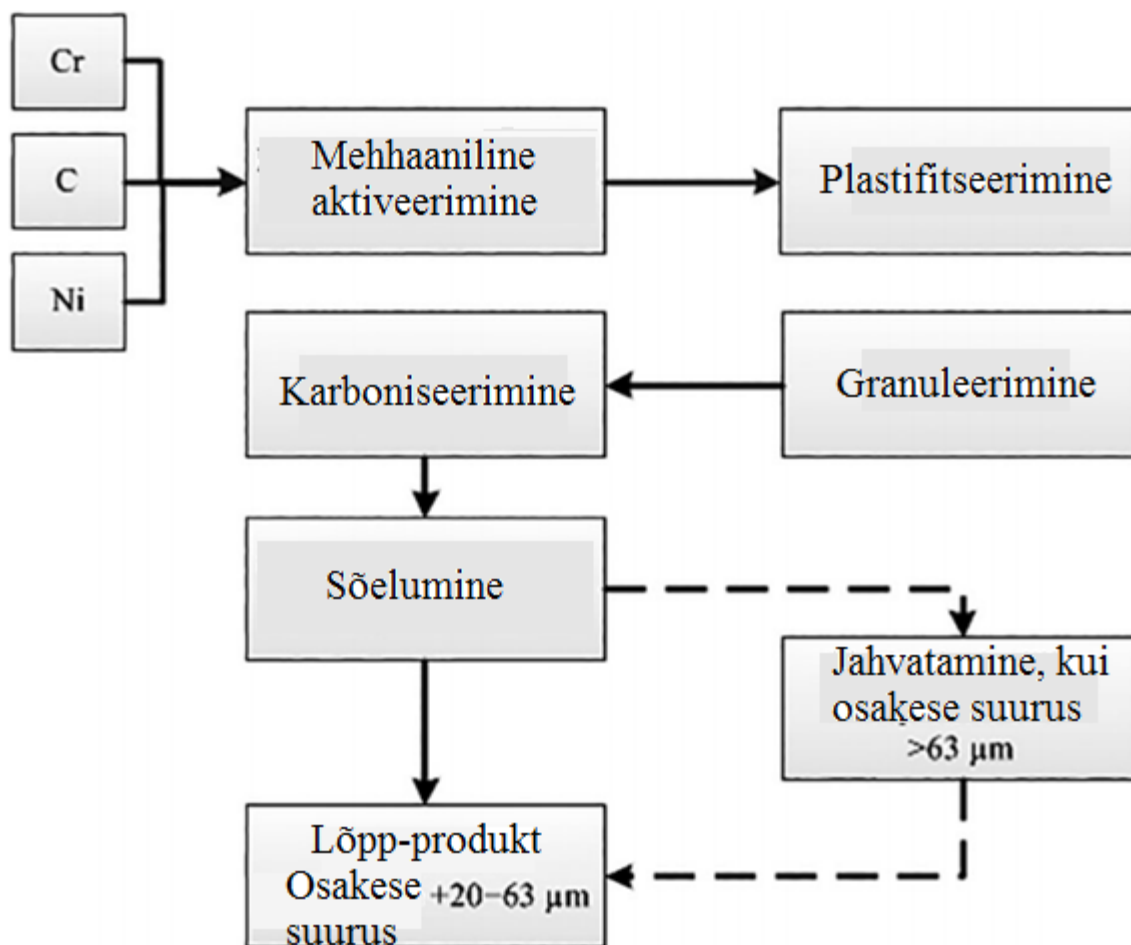
II KATSELINE OSA.

1. Materjali ja protsessi valiku põhjendus. Ülesande püstitus.

Tallinna Tehnikaülikoolis on välja arendatud uus kroomkarbiidi baasil kermispulbri ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$) saamise viis (mehhanoaktiveeritud termosüntees, edaspidi MATS). Antud pulber on sobilik kasutamiseks termopihustatud (täpsemalt suurekiiruselise hapnik-kütuspihustuse teel saadud) pinnetes, mis on omakorda mõeldud kaitsmiseks abrasiiv-erosioonkulumise vastu. Saadud pinnet on vaja võrrelda sama meetodiga termopihustatud pindega, mis oli saadud analoogse koostisega kommertspulbrist, selleks et võrrelda nende kahe pinde kindlust abrasiiv-erosioonkulumisele toa- ning kõrgtemperatuuridel. CAK-3M apparaadi abil oli vaja läbi viia abrasiiv-erosioonkulumise katsed ning seejärel esitada ja võrrelda saadud katse tulemused etaloonse katsekehaga –pindega kommertspulbrist.

2. $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ pulbri valmistamine mehhanooaktiveeritud termosünteesi ja desintegraatorjahvatuse teel.

Esialgseks komponendiks eksperimentalse pulbrimaterjali saamiseks on puhas kroomi pulber (99.5 wt%, Pacific Particulate Material) osakeste keskmise suurusega 7 μm , grafiitpulber KS6 ja nikkli pulber osakeste suurusega 2–3 μm . Oli toodetud segu, mis koosnes 11.45 wt% C, 20 wt% Ni ja 68.55 wt% Cr. Süsiniku sisaldus ja paagutamistemperatuur oli valitud niiviisi, et vältida vaba süsiniku sisaldumist pulbermatrjali struktuuris peale paagutamist. Pulbrid, mis olid kasutatud pihustamisel, olid valmistatud vastavalt protseduurile, mis on näidatud Seel 14. Alguses alguskomponendid olid mehaaniliselt aktiveeritud pöörlevas kuulveskis etanooli keskkonnas. Jahvatamine toimus 72 tunni jooksul ja materjali ja kuuli suhe oli 15:1. Veski ja kuulid olid valmistatud kõvasulamist koostisega WC-Co. Peale mehaanilist aktivatsiooni segu sisse oli lisatud plastifikaator ja saadud massist olid moodustatud katsekehad paagutamiseks. Paagutamine oli viidud läbi vaakum keskkonnas 1100 C° juures ning 30 min jooksul. Paagutamisega saadud komposiitmaterjal sisaldas umbes 75 wt% Cr_3C_2 , 22,5 wt% Ni ja 1,5 wt% Cr. Peale paagutamist materjal läbis mehaanilist jahvatust desintegraatoris DSL-175, et saada pulber osakeste suurusega 20–63 μm suurekiiruseliseks hapnik-kütuspihustamiseks [32]. Pulbri granulomeetriline koostis ja morfoloogia, ja samuti suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamisega saadud pinnete mikrostruktuur ja kõvadus on näidatud viites [32]. Kuna selle töö eesmärk on kulumise võrdlusuuring, korduv eespool nimetatud andmete määramine ei ole teostatud.



Sele 14. Pulbri tootmine mehaaniliselt aktiveeritud termosünteesi abil [32].

3. Cr_3C_2 -Ni pinnete saamine suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamise teel.

Katsekehad kesksüsinikterasest C45E (0,42–0,50 wt% C, 0,50–0,80 wt% Mn, 0,035 wt% P, 0,035 wt% S, \leq 0,40 wt% Cr, \leq 0,10 wt% Mo, \leq 0,40 wt% Ni; 215 HV30) mõõtmetega 100 mm \times 25 mm \times 5 mm olid kasutatud nagu alus pinnete jaoks. Enne pihustus terasest alused olid töödeldud liivapritsiiga alumiiniumoksüüdi kasutamisega (fraktsiooni number 36) pinde adhesiooni parandamiseks. Pinned olid saadud suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamise abil, kasutades suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamise seadet Diamond Jet Hybrid 2700, mis töötab propaani peal (SulzerMetco) Tampere Tehnikaülikoolis. Turult saadav kommertspulber koostisega Cr_3C_2 -25NiCr (75 wt% Cr_3C_2 , 20 wt% Ni, 5 wt% Cr; Amperit 588.074, H.C.Starck), mis laialdaselt kasutatakse tööstuses kulumiskindluse saamiseks, oli valitud

etalonpulbrina võrdluspinde materjalina. Suurekiiruselise hapnik-kütuspihustuse parameetrid on ära toodud Tabelis 3. Pinded oli kantud kiht kihi peale (umbes 50 µm ühe läbimisega) et saada pinde lõpppaksus 400 µm [32]. Edasi töö tekstis eksperimental pulbrist saadud pinded nimetatakse *MATS* ja pinded analoogse turult saadavast kommertspulbrist nimetatakse *Amperit*.

Tabel 3. Pihustamise parameetrid

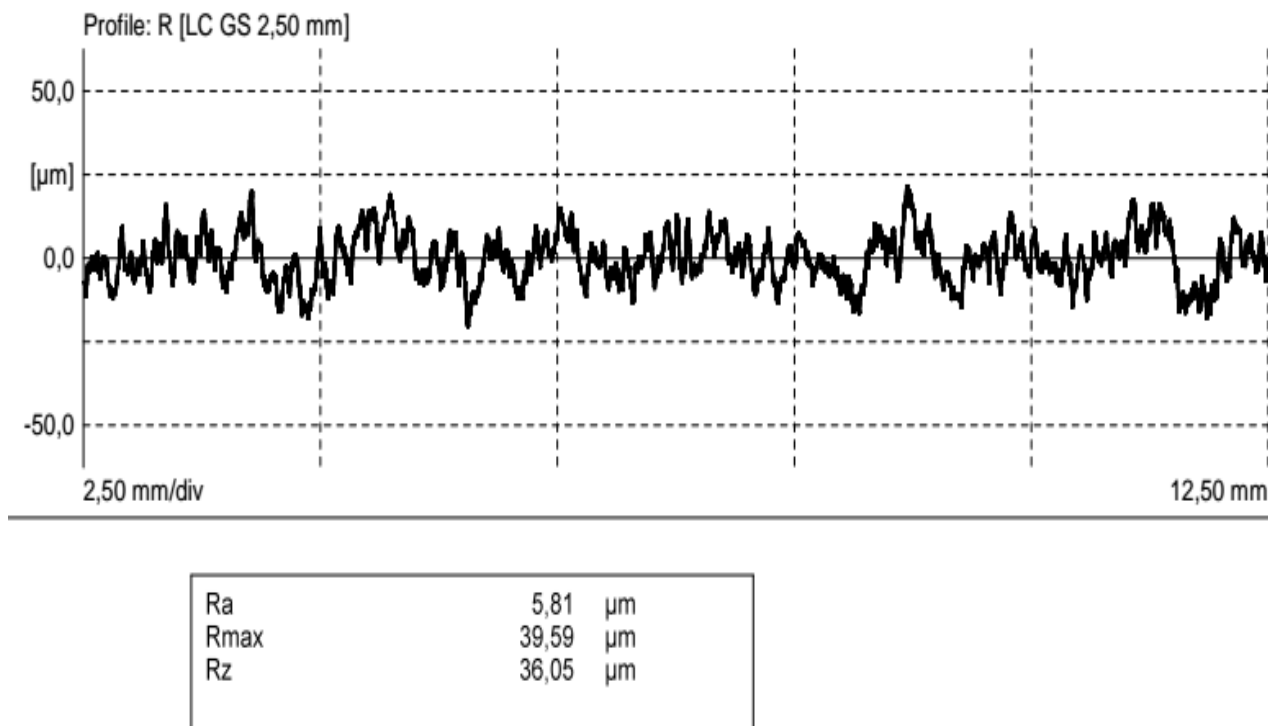
Parameeter	Väärtus
Propaani kulu, l/min	68
Hapniku kulu, l/min	240
Suruõhu kulu, l/min	383
Transpordigaasi kulu, l/min	12,5
Pulbri etteandmise intensiivsus, g/min	60
Pihustamise kaugus, mm	230

4. Pihustatud pinnete abrasiiv-erosioonkulutamiskatse CAK-3M peal.

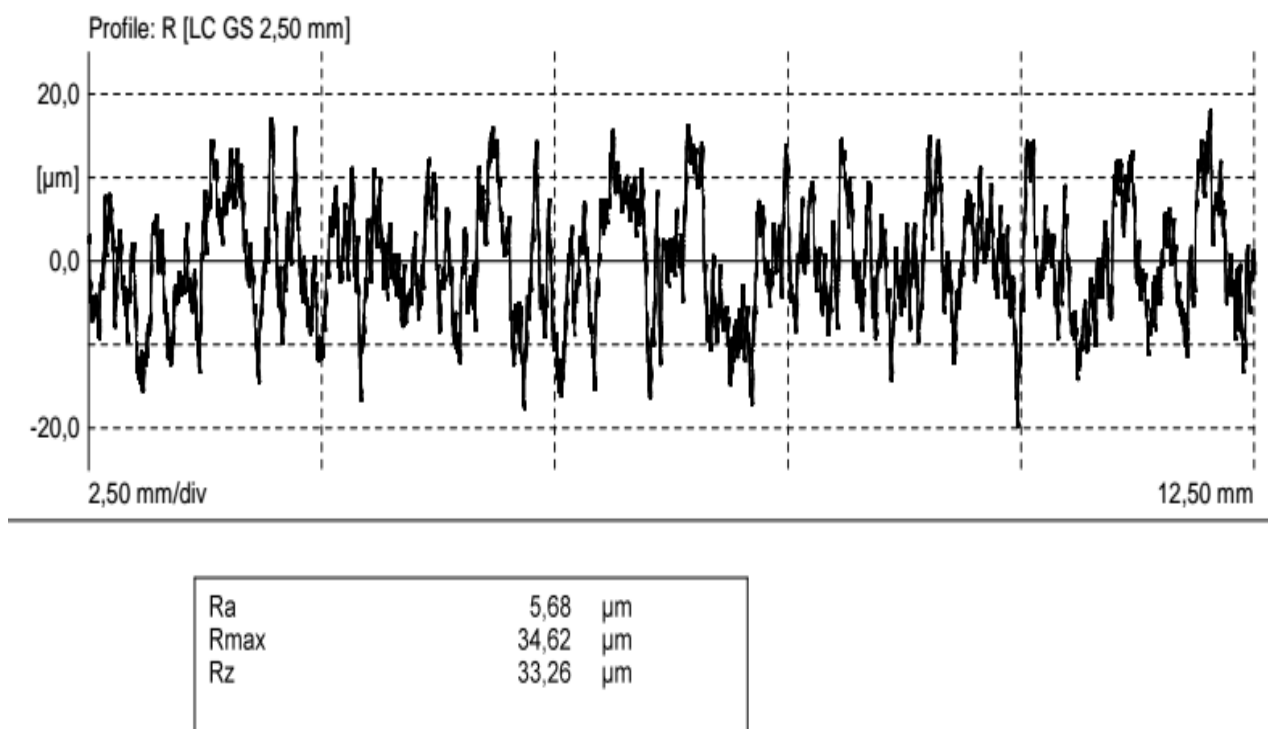
4.1. Katsekehade ettevalmistamine.

Abrasiv-erosioonikulumise katsetamiseks näidised olid ketassael lõigatud suurusteks 25×10×5 mm, ning teravad servad olid nüristatud. Abrasiv-erosioonikulumise test toatemperatuuril oli läbi viidud GOST 23.201-78 "Toote kulumuskindluse tagamine. Pinnete ja materjalide testimismeetodid tsentrifugaaljõudu kiirendi abil" standardi alusel. Standardi järgi pinnete katsetamisel nende paksus ei tohi olla väiksem kui 0,3 mm ning pinna karedus 0,16-0,32 Rz. Eksperimetaal- ja kommertspinde pinna karedus samasugusest koostisest

pulbriga oli mõõdetud (Sele 15 ja 16) ning tulemuseks saadi, et pinna karedus on kuskil 33-36 Rz vahel.

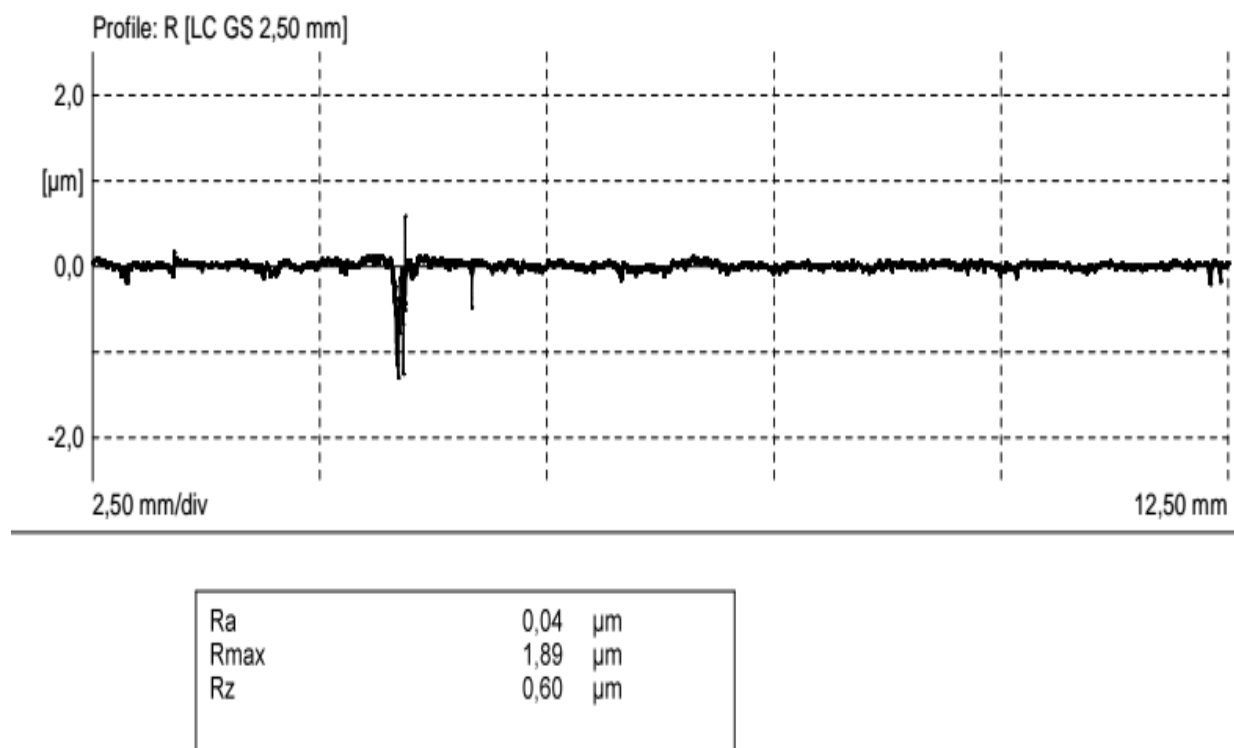


Sele 15. Pinnakaredus pindel MATS

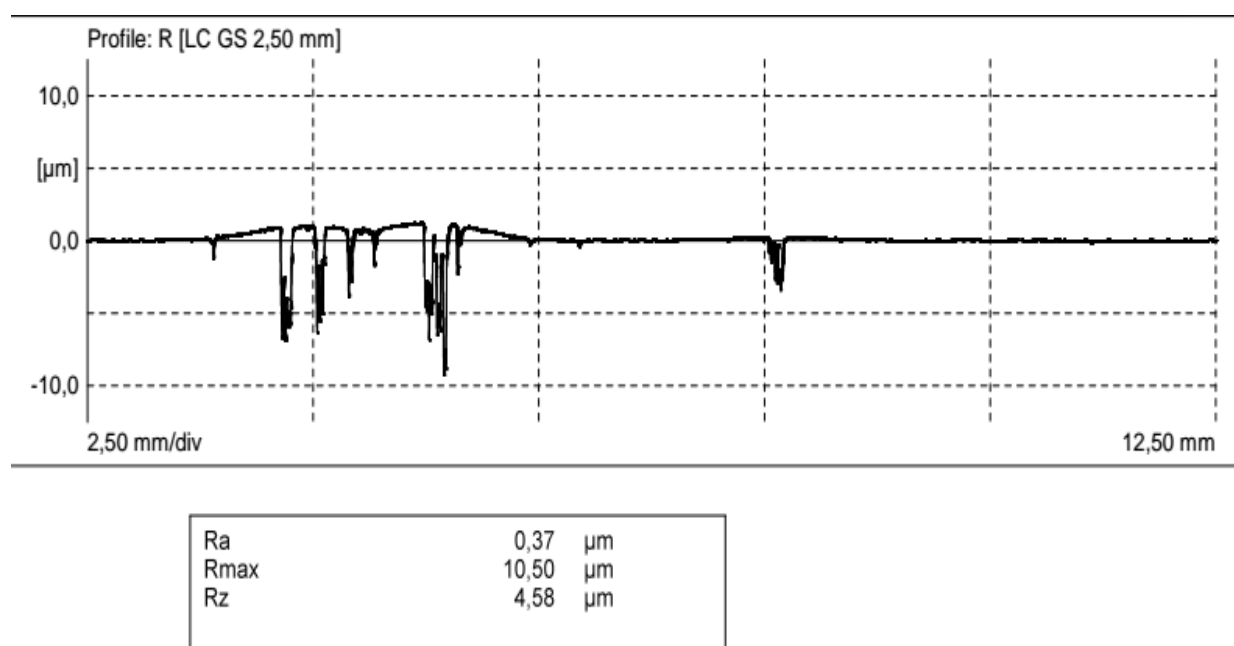


Sele 16. Pinnakaredus pindel Amperit

Peale seda katsekehad olid käsitsi poleeritud märjal viisil teemantkettal ning olid saadud pinde kareduse väärtused 0,6 Rz ja 0,5 Rz vastavalt äri-ja eksperimetaalpinde pindade juhul (Sele 17 ja 18).



Sele 17. Pinnakaredus pindel Amperit peale poleerimist teemantkettal.



Sele 18. Pinnakaredus pindel MATS peale poleerimist teemantkettal.

Edaspidi poleerida oli ohtlik, sest oli oht, et pinne läheb liiga õhukeseks. Peale selle, katsekehade poleerimise mõte seisneb selles, et eemaldada mikrokumerused, mis kulutamiskatse ajal koheselt murduksid, suurendades kaalukadu ning selle tagajärjel kulumise näitajaid suurendades, võrreldes nendega, mis olid päriselt. Kõik peamised mikrokumerused olid poleerimise ajal maha võetud, sellepärast võib öelda, et katsekehad, nagu ka üldine test, on GOST 23.201-78 standartitele rohkem kui sobilikud.

Et kaitsta tagumised katsekehade küljed oksüdeerimise eest abrasiiv-erosioonkulumiskatsetes (kõrgendatud temperatuuril) oli sadestatud õhuke (mõned μm) keraamiline pinne ($\text{Al}_x\text{Ti}_{1-x}\text{N}/\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, kommers nimetus nACo®) füüsikalise aursadestamise meetodiga. Selline pinne kannatab kuni 900°C märkamisväärset oksüdatsiooni (uuritav $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ pinne ise jäi pindamata). Keraamilise pinde sadestus teostati seadme Platit $\pi 80$ (Platit AG, Šveits) peal, sadestamise parameetrid olid järgmised:

- Eelpinge $(-75) - (-150)$ V;
- Märklaua vool Ti-Al: 82 – 125 A;
- Märklaua vool AlSi: 65 – 100 A;
- Temperatuur: $435 - 475$ °C;
- Ar kulu $6 \text{ cm}^3/\text{min}$;
- N_2 kulu: $200 \text{ cm}^3/\text{min}$.

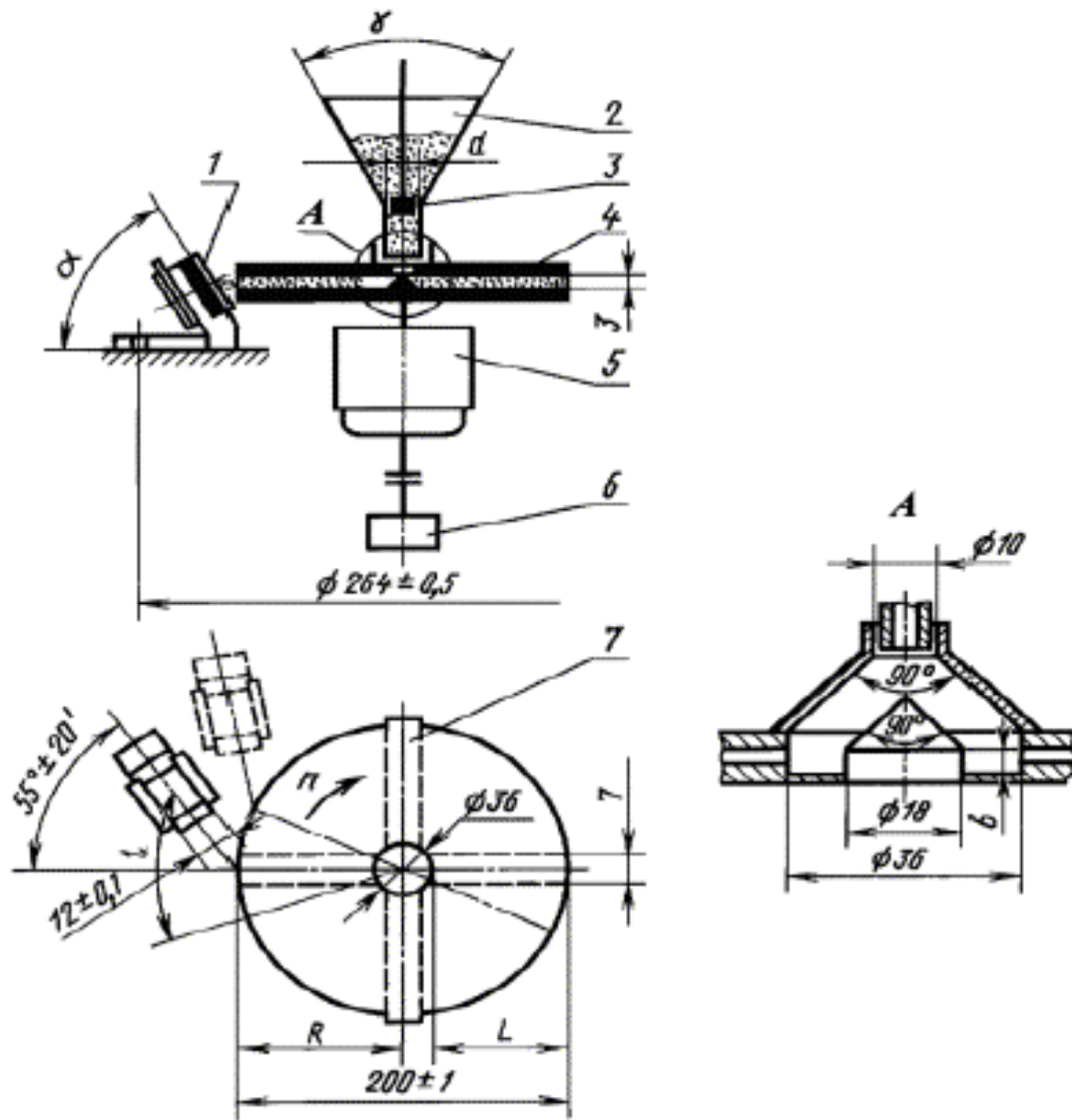
Peale selle et eelnevalt oksüdeerida paljastunud aluspinda uuritud pinde murdekohtadl, näidised olid kuumutatud ja jahutatud elektriahjus režiimidel:

- Katsekehad, mis pidid olema katsetatud 300°C juures: kuumutus kuni $300^\circ\text{C} - 1$ tund, hoidmine 300°C juures – 1 tund, jahutamine ahjus.
- Katsekehad, mis pidid olema katsetatud 650°C juures: kuumutus kuni $650^\circ\text{C} - 1$ tund, hoidmine 650°C juures -1 tund, aeglane jahutamine ahjus.

Kõrgtemperatuurse katse jaoks katsekehade poleerimine ei olnud teostatud. Oli katse teostada pinde poleerimist kõrgtemperatuurse katse jaoks peale ahjus oksüdeerimist, kuid pindes hakkasid ilmuma praod jääkpingete pärast, mis oli kogunenud pindes mitmete kuumutuste ja jahutamiste tulemusena, seega poleerimine oli peatatud.

4.2. Katseparaadi CAK-3M lühitutvustus.

Arvestades GOST 23.201-78 kasutusel on tsentrifugaaljõu kiirendi CAK. Masina skeem on ära toodud Selel 19 [3].



Sele 19. CAK masina skeem [3]

1 – katsekeha;

2 - punker;

3 - pelt;

4 - rootor;

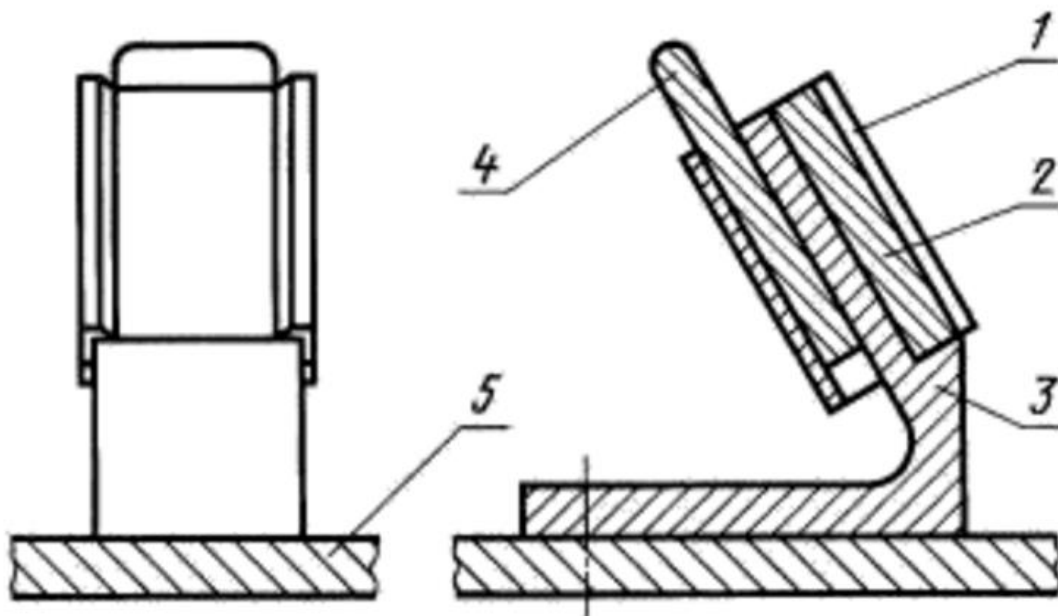
5 - mootor;

6 - pöörlemissageduse sensor;

7 - rootori radiaalsed kanalid.

Katsetavad katsekehad 1 paigaldatakse sümmeetriliselt rootori telje hoidjatesse 4. Punkerist 2 abrasiivsed osakesed avatud klappi 3 kaudu sattuvad rootori keskmisesse avasse 4, kust trentrifugaaljõu toimel satuvad nelja radiaalsekanaliga katsekeha 1 peale. Rootor kinnitatakse mootori võlli juurde 5 ning alumise võlli osaga on seotud võlli pöörlemissageduse sensor. On garanteeritud sujuvalt rootori pöörlemise kiiruse reguleerimine, pöörlemissageduse automaatilise hooldusega. Peale kokkupõrkeid katsekehadega, abrasiivsed osakesed ning nende killud kukuvad alumisse punkerisse, kust eemalduvad tolmuimeja abiga. CAK komplekt koosneb katsemasinast endast ja juhtpaneelist [3].

Katsekehade kinnikus katseadisel teostatakse spetsiaalsetes kinnistites kiilude abil, mis garanteerib kiiret proovide mahavõtmist ja pagaldamist. Skemaatiliselt katsekehad on näidatud Seel 20 [3].



Sele 20. Hoidjad CAK seadel (1–tõukejõu plaat, 2–katsekeha, 3–hoidja, 4–kiil, 5–toetusrõngas) [3].

Hoidjate seadmine, mis tagab katsekehade paigalolemist antud lööginurga all, toodetakse spetsiaalse seadme abil, mis tsentrifugeerib rootori teljel [3]

Tootmisel ning vahest ka katsetava masina ekspluatatsiooni protsessi käigus (näiteks, peale liigselt kulunud rootori radiaalse kanalide vahetamisel) teostatakse rootori stratistiline balansseerimine. Sel juhul vastukaaluna kasutatakse spetsiaalsed kruvid, mis kruvitatakse pinna rootori radiaalasendil asuvasse auku [3].

4.3. Katse parameetrid.

Katsete jaoks olid kasutatud metallist katsekead, mis olid pihustatud eksperimenteraalpulbrist (MATS) ja kommertspulbrist (Amperit), samuti kasutusel olid katskehad normaliseeritud roostevabast austeniitsest terasest AISI316L (DIN X2CrNiMo17-12-3; 0,02 wt% C, 16,3 wt% Cr, 11,7 wt% Ni, 2,6 wt% Mo, 0,05 wt% N; 155 HV30). Abrasiivina oli kasutatud kvartslüiv EST Lüiv IV (kõvadus 1100 HV0.05, osakeste suurus 0,2–0,3 mm). Katsed viidi läbi CAK - 3M seadmel, mis koosneb tsentrifugaalkiirendist ja juhtmepuldist.

Enne katsetamist kõik katskehad olid markeeritud, et edaspidi vältida segadust katsekehade kulumise mõõtmisel. Et saada kaalumisel täpsust nad olid pestud atsetoonis kasutades ultrahelivanniga apparaati, et maha pesta katsekehade pealispinnal olevad mikroskoopilised osakesed. Peale pesemist atsetoonis katskehad olid kuivatatud tahmapuhuritega toatemperatuuril. Seejärel katskehad olid kaalutud, et teada saada esialgne mass enne testimist.

Järgmisena toetava ringile olid paigaldatud kakskümmed hoiutit, 30° ja 90° nurkade all. Oli paigaldatud kümme hoidjat 30° nurga all ja kümme hoidjat 90° nurga all. Õige hoiutite seadmise jaoks oli kasutatud spetsiaalne kohandaja, et osakeste lendamise trajektoor rootorist oli täpselt kokkulangev esikülje proovi täpse projektsiooniga. Hoidjate paigaldus tänu ülaltoodud seadmega garanteerib kõikidele katsekehadele sarnased tingimused katsete ajal. Toetusringi ettevalmistamise ajal samuti olid ettevalmistatud sulud laiusega 11mm. Tänu nendele sulgudele testimise ajal näidiste pind kulub sarnasel pindalal ning see teeb paremaks saadud andmed.

Peale seda näidised paigaldati kasutades kinnistussulgusid ja kiile, hoidjatega 30 ja 90 kraadi nurga all. Oli paigaldatud 6 katsekeha eksperimenteraalse kattega: 3 30° nurga all ja 3 90° nurga all, 6 näidist kommertskattega: 3 30° nurga all ja 3 90° nurga all ning 8 näidist roostevabaterasest AISI 316L: 4 30° nurga all ja 4 90° nurga all.

Peale toetusringi ettevalmistust, valmistati ette kvartslüiva EST Liiv IV. Ühe testi jaoks võeti 10 kg liiva, mis oli sõelatud, et eemaldada suuri osakesi, mis võisid väga katse tulemusi mõjutada.

Edasi ettevalmistatud katsekehad paigaldati CAK aparati, peale paigaldati punker, vt . joonis (Sele 19), millesse pandi abrasiiv, antud katses kvartslüiv EST Liiv IV ning viidi läbi katse määratud kiiruse ja temperatuuriga.

Peale katset katsekehad võeti välja ning uuesti pesti atsetoonis, et maha pesta mikroosakesed, hiljem kaaluti, et edaspidi ära määrata nende kulumist. Kuna enamus materjale esimesel kulumisfaasil kuluvad vahelduva intensiivsusega katse (s.t. omab kohta nõ sissetöötamise efekt) korratakse samade katsekehadega katsed.

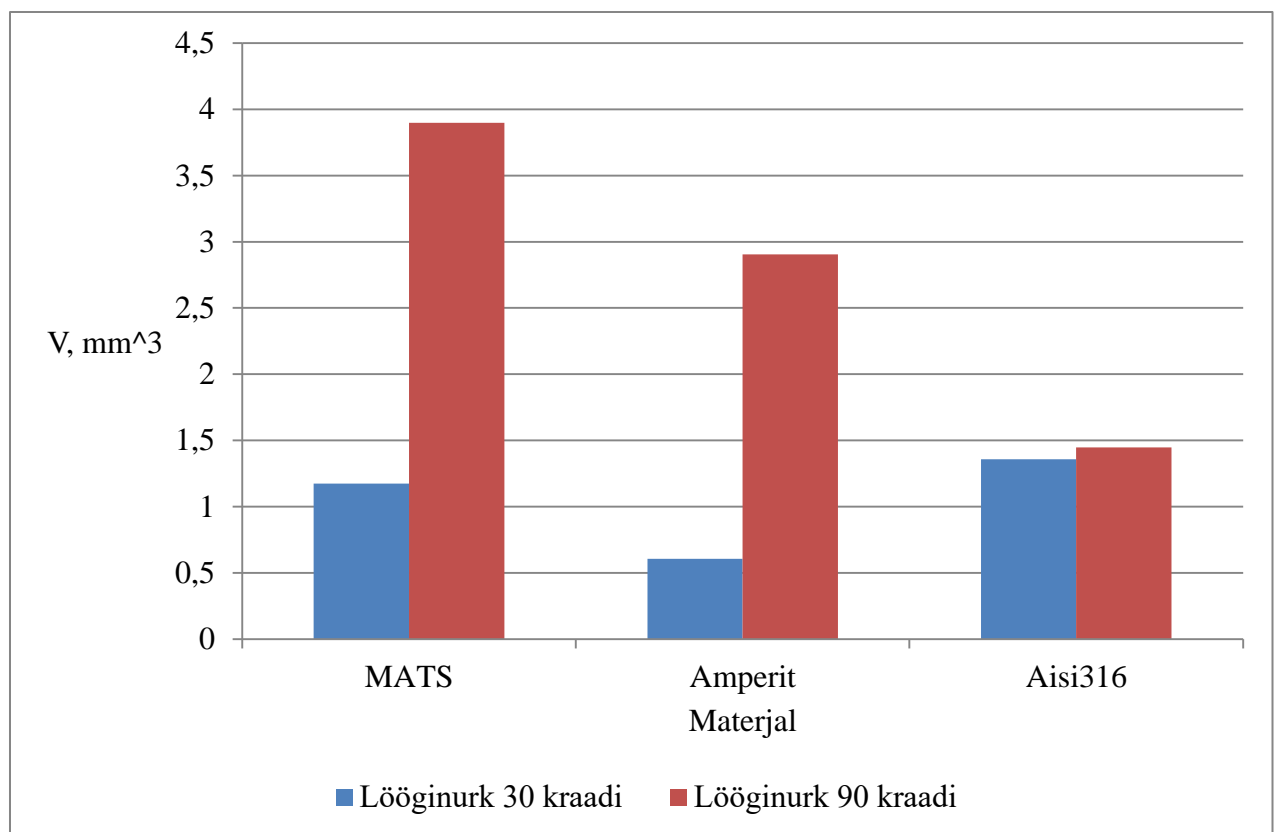
Antud töös oli teostatud 3 katset erinevatel kiirustel ja temperatuuril. Esimete test oli läbiviidud toatemperatuuril ja abrasiivi väljalennu kiirusel 50 m/s. Teine test oli läbiviidud kõrgendatud temperatuuril 300°C ning 20 m/s kiirusel. Kolmandal testil oli temperatuur 550°C ja osakeste väljalendamise kiirus oli 20 m/s. Abrasiivi etteandmise keskmine kiirus oli 600 g/min kõikidest katsetes.

III TULEMUSTE ANALÜÜS.

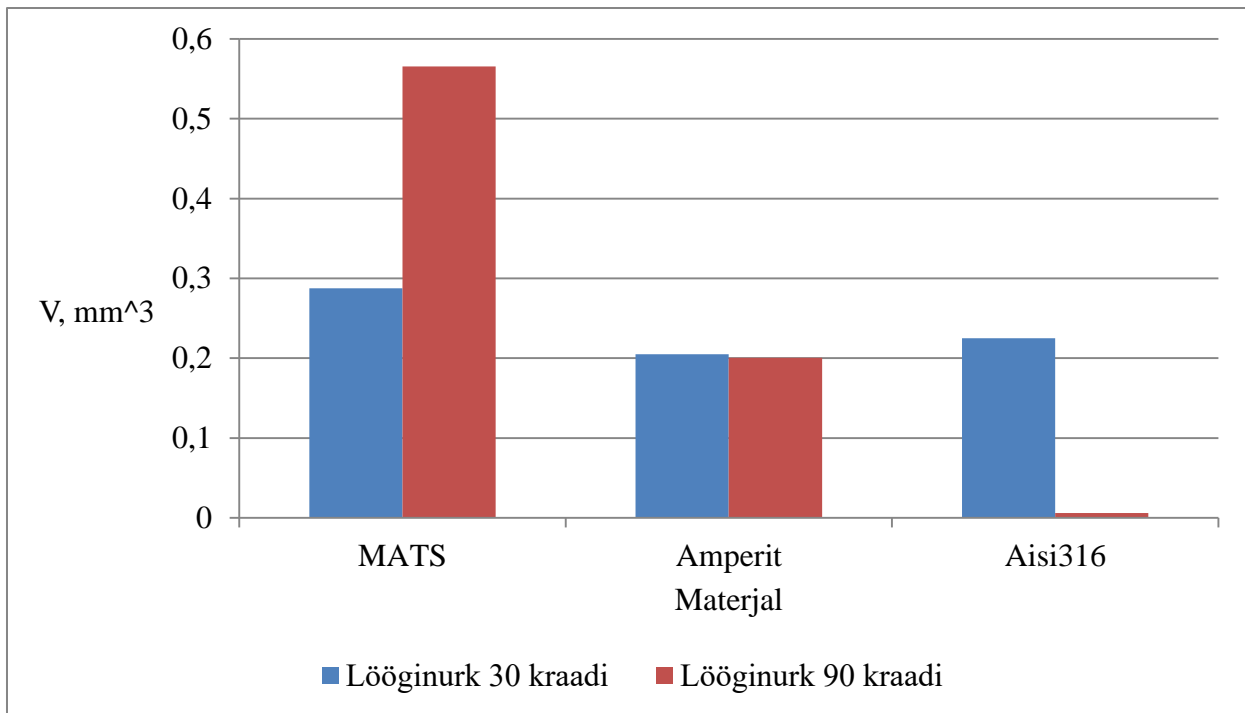
1. Abrasiiv-erosioonkatse tulemuste tutvustamine ja analüüs.

Katsekehade abrasiiv-erosioonkulumise uuringud suurekiiruselise hapnik-kütuspihustuse meetodil saadud pinnete ja roostevabast terasest katskehadega toimusid CAK-3M aparaadil vastavalt abrasiivsete katsete läbiviimise metoodikale, mis on põhjalikult kirjeldatud Peatükis II.

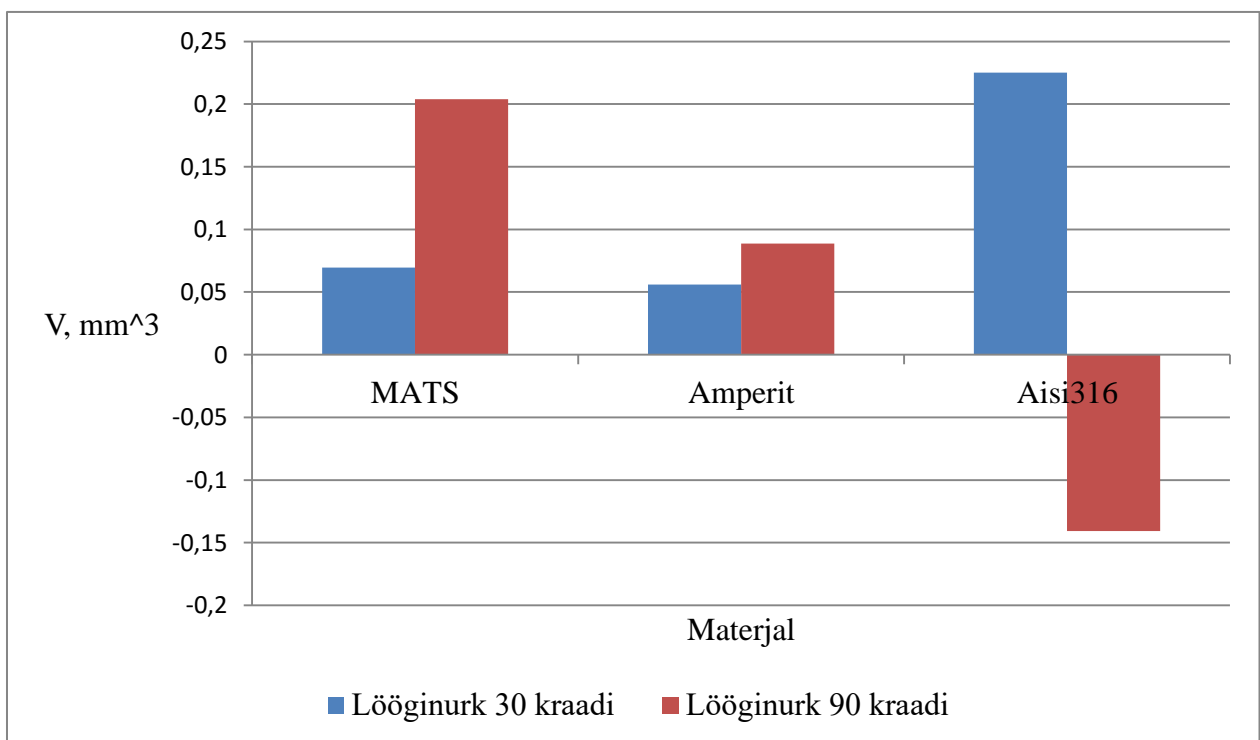
Antud töös läbiviidud eksperemetaalsest pulbrist pinnete MATS ning kommertspulbrist Amperit ja roostevabast terasest AISI 316L katsed abrasiiv-erosioonkulumisele näitasid, et abrasiiv-erosioon kulumise tingimustes madala lööginurga (30°) juures näitab kõige väiksemat kulumist pinne kommertspulbrist (Amperit) ning pinne eksperemetaalsest pulbrist (MATS). Abrasiiv-erosiooni katsete tulemused, mis olid läbiviidud pinnete ja roostevaba terasest katsekehade peal, on näidatud Selet 21, 22 ja 23.



Sele 21. Mahuline kulumine toatemperatuuril.



Sele 22. Mahuline kulumine temperatuuril 300 °C



Sele 23. Mahuline kulumine temperatuuril 550 °C

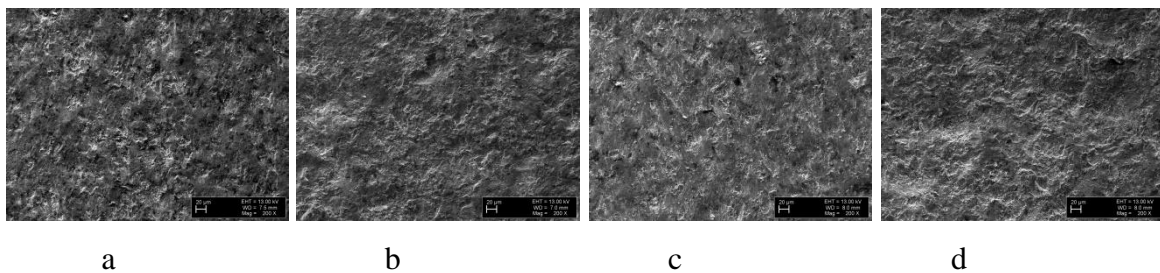
Toatemperatuuril ning madala lööginurga juures (30°) mõlemad pinnad näitasid 1,3-2 korda kõrgemat kulumiskindlust võrreldes roostevaba terasega. Kuid normaalse ründenurga korral

(90°) olukord on vastupidine ning pinnete kulumine oli 2-2.3 korda suurem kui roostevabal terasel. (Sele 21)

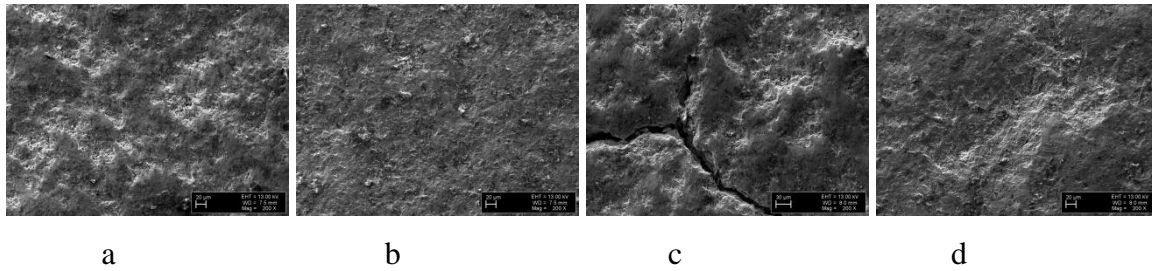
Katsetel temperatuuridel 300 °C ja 550 °C roostevaba teras näitas häid tulemusi, kui neid andmeid ei saa pidada tõelisteks, sellepärast et see materjal kõrge temperatuuri juures oksüdeerus ning tema kaal kasvas, seega edaspidi võrrelda tulemused selle materjaliga ei ole mõistlik. Päristel selle terase kulumine oli palju suurem kui on näidatud joonistel (Sele 22, 23). Katsetes temperatuuril 300 °C eksperimetaalne pinne MATS oli 2,5 korda rohkem kulunud normaalse lööginurga juures võrreldes kommertskattega Amperit. Peab tõdema, et väikse lööginurga juures (30°) MATS praktiliselt ei anna alla Amperit'ile ning kuluvuse vahe ei ole oluliselt suur (Sele 22).

Situatsioon on analoogne katsel temperatuuril 550 °C ja temperatuuril 300 °C. Kuid peab märkama, et kõrgema temperatuuriga mõlema pinde kulumine on väiksem võrreldes madalama temperatuuriga.

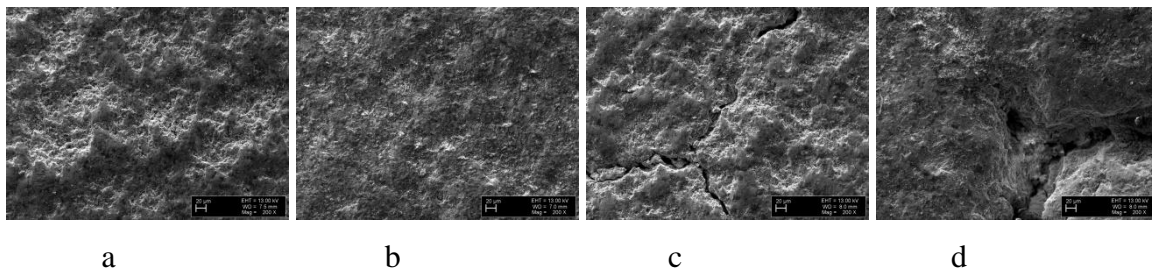
Kulumismehhanismid mõlema pinde puhul, kõikidel temperatuuridel olid mikrolõikamine madala lööginurga (30°) all ning pinnaväsimum normaalse lööginurga all (90°) (Sele 24, 25 ja 26). Kuna MATS pindel on märgatavalt rohkem pragusid, võrreldes Amperit pindega, siis esimene pinne oli hapram. Muudes aspektides nende kahe pinde vahel erinevusi ei tekki.



Sele 24. Toatemperatuuril kulutatud pinnete mikropildid, suurendusega 200 korda (a–Amperit 30°; b–Amperit 90°; c–MATS 30°; d–MATS 90°).



Sele 25. 300 °C juures kulutatud pinnete mikropildid, suurendusega 200 korda (a–Amperit 30°; b–Amperit 90°; c–MATS 30°; d–MATS 90°).



Sele 26. 550 °C juures kulutatud pinnete mikropildid, suurendusega 200 korda (a–Amperit 30°; b–Amperit 90°; c–MATS 30°; d–MATS 90°).

Saadud andmete põhjal, võib kinnitada, et vahe eksperimentaalse (MATS) ja kommertspinde (Amperit) vahel on pole eriti märgatav toatemperatuuril ja kõrgendatud temperatuuril madala lööginurga korral. Mõlemad pinded näitasid suhteliselt kõrget kulumiskindlust abrasiiv-erosioonkulumise tingimustes nii toa- kui kõrgetel temperatuuridel ning ületavad roostevabat terast.

KOKKUVÕTE

Abrasiiv-erosioonkulumine mõjutab negatiivselt masinate tööiga ja kulumist. Samuti materjalid, mis on ettenähtud töötamiseks abrasiiv-erosioonkulumise tingimustes, on väga kallid võrreldes tavaliste terastega. Kuid, tänapäeval tehnoloogiad paranevad iga päevaga ning, näitseks, erinevate pulbrite termiline pihustamine masinate detailide pindadele võimaldab suurendada nende kulumiskindlust erinevates tingimustes.

Detailide kaitsepinnete omadused sõltuvad paljusti selles, mis pulber oli peale kantud. Kulumiskindluse jaoks kasutatakse erinevaid WC-Co pulbreid, kui ajaga enam ja enam saavad tuntust pulbrid $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ baasil. Suurekiiruselise hapniku-kütuspihustamise tehnoloogiad võimaldavad saada tihedaid ja madala poorsusega pindeid, kasutades erinevaid pulbreid. Samuti see meetod erineb sellepolest, et ta omab võimaldab pihustatavate osakeste suurt kineetilist energiat ning madalat pihustamistemperatuuri.

Suuremat osa hinnast detaili pinna pindamisel pulberpindega annab pulber ise. Enamasti pulbrid saadakse aglomeeratsiooni ja pagutamise abil, ning samuti segamise ja purustamise abil. Kõige paremate näitajatega on pulbrid, mis on saadud paagutamise ja aglomeeratsiooni meetodiga, kuid nad on väga kallid. Pulbrid, mis on saadud segamise ja purustamise meetodiga on palju odavamad, kui nende osakesed omavad ebakorrapärast kuju ning nendes on habrad faasid, mis vähendavad vastupanu kulumisele.

Selles töös oli määratud, mis on abrasiiv-erosioon, kirjeldatud selle protsess ning selle tekkevaldkonnad. Olid kirjeldatud parameetrid, mis mõjutavad abrasiiv-erosioonkulumise kulgemist: lööginurk, abrasiivse voolu kiirus, kuju, abrasiivsete osakeste kuju ja tihedus, temperatuur. Esile on toodud materjalide valik abrasiiv keskkonnas töötamiseks. Samuti olid väljatoodud pulbriga pihustatud pinnete kasutamise põhjused ja eelised. Olid kirjeldatud enam levinud pulbrite pihustamise meetodid, nende eelised ja puudused. Töös oli esitletud informatsioon peamistest pulbrite saamise meetoditest, oli esitatud mehhaanoaktiveeritud termosünteesi meetod, mis oli kasutatud, et saada pulbrit katsekehade pihustamiseks. Esitletud ka töö eesmärk. Kirjeldatud kõik katsekehade ettevalmistamis etapid, sealhulgas ka: $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ pulbri saamine mehhaanoaktiveeritud termosünteesi meetodiga, pinde saamine katsekehadel, suurekiiruselise hapnik-kütuspihustamisega. Põhjalikult kirjeldatud abrasiiv-erosioonkulumise katse etapid, apparat, mis oli selle jaoks kasutatud. Esitlud antud töö tulemused ja antud nendele hinnang.

Antud töö on keskendunud pinde uurimisele, mis on saadud kaasaegse kaitsekihi pindamismeetodiga – suurekiiruselisele hapnik-kütuspihustamisega pulbrist, mis on toodetud mehhaaniline termosünteesiga (MATS), abrasiiverosioonkulumise tingimustes. Katsekehad eksperimetaalsest pulbrist pindega olid homogeense ja madala poorsusega pindega. Kulumiskindlus oli sarnane pulberpinde tugevusega, mis on tehtud analoogse koostisega kommertspulbrist, mis on tööstuses kasutatav. Pinne sünteesitud MATS pulbrist näitas ennast heast küljest kulumise valguses madala lööginurga (30°) juures. Selgus, et mida kõrgem on abrasiivsete osakeste lööginurk, seda väiksem on pinnete kulumiskindlus. Samuti eksperimetaalpinde kulumiskindlus oli peaaegu võrdne etaloonpindega, v.a. normaalsel lööginurgal (90°) kõrgendatud temperatuuril. MATS pinde uuring näitas, et selle kulumiskindlus temperatuuri suurendamisel läheb paremaks. Kuna MATS pindes on märgatud rohkem pragusid, võrreldes etalonpindega, siis esimene pinne on hapram. Teistes erinevust kahe pinde vahel ei ole.

Pinded, mis on tehtud tänu kõrgekiiruselisele hapnik-kütuspihustamisele võivad olla kasutatud ökonoomselt tundlikes valdkondades, nagu näiteks teehituse masinad, instrumentaalne tööstus, kõrgetemperatuursed tingimused.

Töö ülesannet võib pidada tehtuks. Antud töö katsete tulemused on kinnitatud teise uurimistööga [32].

SUMMARY

Wear damage from abrasive negatively affects the lifetime and performance of machines. In addition, materials designed to operate in conditions of abrasive wear are very expensive compared with ordinary steels. However, in our time, technology is improving every day and, for example, thermal spraying of powder on the surface of various machine parts, can increase their wear resistance in various conditions.

Properties of the surface of parts is mostly dependent on which powder is applied to it. For wear resistance different powder coatings, like WC-Co, are applied but in recent years becoming increasingly popular powder coatings, based on $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$. High velocity oxy-fuel (HVOF) spray process has proved itself in obtaining dense coatings using different powders. Also, this method is characterized by a high kinetic energy of the sprayed particles and low temperature.

The largest part of the price of the powder coating to the workpiece is constituted by the powder itself. In most cases, the powders are prepared by agglomeration and sintering, as well as crushing and mixing. The best indicators have powders obtained by agglomeration and sintering, but they are very expensive. Powders obtained by mixing and crushing are much cheaper, but their particles have an abnormal shape, and they contain brittle phases, which reduce the wear resistance.

In this work it was identified what was abrasive erosion wear, process and the area of its occurrence were described. Parameters affecting the flow of the abrasive erosion, such as: impact angle, the rate of abrasive flow, shape, size and density of abrasive particles, temperature were described. The criteria for the selection of materials to use in conditions of abrasive wear was given. Also it was shown, what the reasons and advantages of coatings sprayed with powder could be. The most common methods of spraying powders were described, as well as their advantages and disadvantages. The paper was provided with information about the main methods of obtaining powders for spraying, was represented a method of mechanically activated thermal synthesis, which was used to obtain a powder for spraying onto the samples. The purpose of the work was presented. All the stages of preparation of samples including: obtaining of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$ powder, using the method of mechanically activated thermal synthesis, obtaining the surface on the samples, using method of high velocity oxy-fuel spraying (HVOF) were described. The stages of experiments on the

abrasive wear, apparatus that was used for this were described in detail. The results of this work and their analyses were presented.

This work focuses on the study of coating, obtained by a method of applying a protective coating - high velocity oxy-fuel spraying (HVOF), from powder, that was produced by mechanical activated thermal synthesis (MATS), to resist abrasive wear. Samples with the experimental coating had a homogeneous structure and low porosity. Hardness was similar to hardness of similar powder coating made from a commercial powder with the analogous composition, used in the industry. Coating from the MATS powder proved to be resistant to wear at a small impact angle (30°). It was found that the larger was the angle of attack of the abrasive particles, the smaller was the wear resistance. Also wear resistance of the experimental coating was almost equal with the reference surface, except for the high temperature wear at the normal impact angle. Study of the MATS coating showed that its wear resistance improved with increasing of temperature. Since MATS coating had markedly more cracks than the reference coating from the commercial powder, the first coating was more brittle. In the rest there is no differences between the two coatings.

Coatings that are made by using high velocity oxy-fuel spraying can be applied in a cost-sensitive areas such as road construction machines, tool industry, high-temperature conditions.

Task of the work can be considered successful. The study of this work confirmed by another scientific work [32].

KASUTATUD KIRJANDUS

1. "Холодное" напыление металлических покрытий [WWW] <http://www.nkj.ru/archive/articles/991> (25.04.2016)
2. Клейс И.Р. Основы выбора материалов для работы в условиях газо-абразивного изнашивания / И.Р. Клейс // Трение и износ. — 1980. — № 2. — С. 263–271.
3. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов и покрытий на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя [WWW] <http://www.gosthelp.ru/gost/gost3663.html>
4. Н.К. Мышкин, М. И. Петроковец, Трибология. Принципы и приложения, 2002
5. М.М. Тененбаум, Сопротивление абразивному изнашиванию, 1976
6. М.М. Тененбаум, Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин, 1966
7. Тхабисимов, А. (2016). Повышение абразивной стойкости лопаточного аппарата первых ступеней цилиндров высокого и среднего давления мощных паровых турбин. Москва
8. Петров, Ю.В. О температурной зависимости пороговой скорости эрозийного разрушения / Петров Ю.В., Смирнов В.И. // Доклады академии наук. — 2007. - том 416. - № 6. - стр.766-768.
9. Aquaro, D. Erosion due to the impact of solid particles of materials resistant at high temperature / Aquaro D. // Meccanica. — 2006. — No 41. - pp. 539–551.
10. Klimpel, A. The abrasive and erosive wear resistance of cermet deposits / Klimpel A., Rzeźnikiewicz A., Kik T. // 3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure. - 20-24 July 2009. - pp. 1-9.
11. Manish, R. Elevated temperature erosive wear of metallic materials / Manish R. // Journal Of Physics D: Applied Physics. — 2006. - No 39. — pp. 101–124.
12. Kleis, I. Solid Particle Erosion: Occurrence, Prediction and Control / Kleis I., Kulu P. // 2008. - 203 p.
13. Kleis, I. Solid Particle Erosion: Occurrence, Prediction and Control / Kleis I., Kulu P. // 2008. — 184-194 p.
14. Разработка и применение порошковых проволок для газопламенного напыления [WWW] <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=22198>
15. Хасуи А., Моригаки О., Наплавка и напыление с.190
16. Газотермические методы напыления покрытий и металлизация [WWW] http://metallischekiy-portal.ru/articles/zashita_ot_korrozii_metalla/metallizacia/gazotermicheskie_metodi_napileni_a_pokritii/1
17. Порошковое напыление [WWW] <http://www.tspsc.ru/tech/HVOF.php>

18. Линник В. А., Пекшев П.Ю, под ред. Б.С. Митина. М. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. Металлургия, 1987
19. Газопламенное напыление покрытий [WWW] <http://laser-fti.narod.ru/spraying.htm>
20. Зиневич А.М., Глазков В.И., Котик В.Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии, М., «Недра», 1975, 288с(107с)
21. Плазменное напыление [WWW] <http://weldzone.info/technology/gas-sputtering/811-plazmennoe-napylenie>
22. Плазменное напыление порошковых покрытий [WWW] <http://www.plasmacentre.ru/technology/17.php>
23. Плазменное напыление порошковых покрытий [WWW] <http://www.electrolibrary.info/newtechnolog/20-plazmennoe-napylenie-pokrytiy.html>
24. Технология Детонационное напыление. Описание и возможность применения [WWW] <http://www.tspc.ru/tech/DET.php>
25. Перспективные способы высокоскоростного газотермического напыления покрытий [WWW] http://science-bsea.narod.ru/2011/mashin_2011_1/kuznecov_perspekt.htm
26. Порошковые материалы [WWW] <http://uas.su/books/newmaterial/111/razdel111.php>
27. Производство материалов методами порошковой металлургии [WWW] <http://www.metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/poroshkovaya-metallurgiya/653-fiziko-khimicheskie-metody-polucheniya-poroshkov.html#h1-7-metally>
28. Акулич Н.В. Процессы производства черных и цветных металлов и их сплавов, Гомель 2008
29. Davis, J.R. Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, 2004
30. Влияние механоактивации на структуру перовскита [WWW] <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/10050>
31. Сферы применения механоактивации [WWW] http://www.leotec.ru/catalog/detail.php?ID=14589&SECTION_ID=1188
32. Sarjas, H. Novel Synthesized and Milled Carbide-based Composite Powders for HVOF Spray. TUT PRESS 2016
33. Прис К. Эрозия: Пер. с англ. М.: Мир. - 1982. – 464 с.