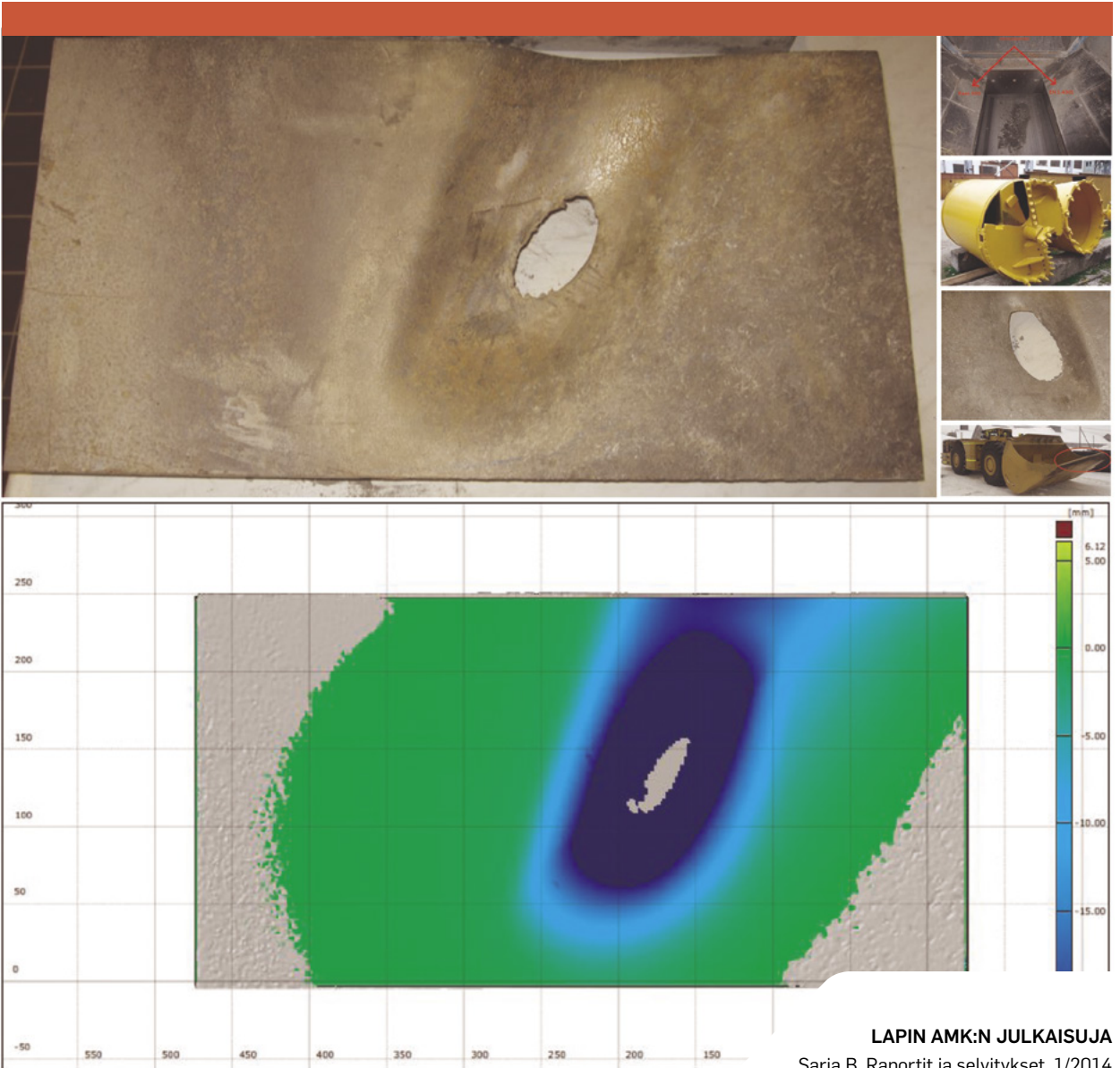


Kaivosteollisuuden teräkset

Tekninen raportti



Kaivosteollisuuden teräkset

Tiina Rissanen

Kaivosteollisuuden teräkset

Sarja B. Raportit ja selvitykset 1/2014

Lapin ammattikorkeakoulu
Rovaniemi 2014

© Lapin ammattikorkeakoulu ja tekijät

ISBN 978-952-316-000-2 (nid.)

ISSN 2342-2483 (painettu)

ISBN 978-952-316-001-9 (pdf)

ISSN 2342-2491 (verkkajulkaisu)

Lapin ammattikorkeakoulun julkaisuja
Sarja B. Raportit ja selvitykset 1/2014

Rahoittajat: Tekes, Euroopan Unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Kirjoittaja: Tiina Rissanen
Taitto: Lapin AMK, viestintäyksikkö

Kopijyvä, Jyväskylä 2014

Lapin ammattikorkeakoulu
Jokiväylä 11 C
96300 Rovaniemi

Puh. 020 798 6000
www.lapinamk.fi/julkaisut



Lapin korkeakoulukonserni LUC
on yliopiston ja ammattikorkeakoulun strateginen yhteenliittymä.
Konserniin kuuluvat Lapin yliopisto
ja Lapin ammattikorkeakoulu.
www.luc.fi

Sisällys

TIIVISTELMÄ	7
1 JOHDANTO	9
2 KULUMINEN	11
2.1 Abrasiivinen kuluminen	13
2.2 Adhesiivinen kuluminen	14
2.3 Väsymiskuluminen	15
2.4 Tribokemiallinen kuluminen	15
3 KULUTTAVIIN OLOSUHTEISIIN SOVELTUVIA HIILITERÄKSIÄ	17
3.1 Kulutusteräket	18
3.2 Austeniittiset mangaaniteräket	20
3.3 Muita hyvän kulumiskestävyden omaavia teräksiä	22
4 KAIVOSTEOLLISUUTEEN SOVELTUVIA RUOSTUMATTOMIA TERÄKSIÄ	25
4.1 Austeniittiset haponkestävät ruostumattomat teräket	25
4.2 Ferriittiset ruostumattomat teräket	27
4.3 Ruostumattomat duplex-teräket	28
4.4 Kuumalujat austeniittiset ja ferriittiset ruostumattomat teräket.	31
4.5 Ruostumattomien terästen kulumiskestävyys ja korroosionkestävyys	34
5 CASE: SYÖTTÖSUPPILON SIVUKULUTUSPALAT	39
6 CASE: KAUHAKUORMAAJAN HUULILEVYN KULUMISPROFIILI	45
LÄHTEET	49

Tiivistelmä

Materiaalit joutuvat kaivoksissa vaativiin olosuhteisiin, joissa raskas kuormitus ja valitsevat ympäristöolosuhteet altistavat ne syöpymiselle ja mekaaniselle kulumiselle. Valitsemalla eri käyttökohteisiin sopivimmat materiaalit, jotka kestävät esim. kuumia lämpötiloja, voimakasta kulumista ja korroosiota tai ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan tarpeeksi lujia, voidaan vaikuttaa esim. kohteiden käyttöikäen ja aikaansaada näin ollen kustannussäästöjä.

Selvityksessä esitellään eräitä kaivosolosuhteisiin soveltuvia hiiliteräksiä ja ruostumattomia teräksiä. Hiiliterästen osalta mukaan on otettu kulutusta kestävä teräksistä ja austeniittiset mangaaniteräksistä sekä myös ultralujia rakenneteräksiä että suojausteräksiä. Ruostumattomista teräksistä esitellään haponkestäviä austeniittisia teräksiä, duplex-teräksiä, kuumalujia austeniittisia ja ferriittisiä teräksiä sekä ferriittinen rakenneteräs.

Tyypillisesti terästen käyttö jakaantuu siten, että kuiviin olosuhteisiin, joissa teräkseen kohdistuu mekaanista kulumista, käytetään materiaalina soveltuvaa hiiliterästä ja kohteissa joissa kulumiseen liittyy tribokemiallinen kuluminen ja korrosio, materiaaliksi valitaan ruostumaton teräs. Selvityksen lopussa on esitelty MineSteel-projektin case-tapauksia, joissa yhteistyössä eri yritysten kanssa on testattu kulutusta kestävien ja ruostumattomien terästen käytettävyyttä erilaisissa kohteissa. Eräässä case-tapauksessa havaittiin, että ruostumatonkin teräs voi suoriutua mekaanisen kulutuksen alaisessa kohteessa varsin hyvin.

Tämä selvitys on tehty osana Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun MineSteel-projektia, jonka kesto-aika on 1.1.2012–31.06.2014. Projektia ovat olleet rahoittamassa Euroopan aluekehitysrahasto EAKR sekä teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus TEKES.

1 Johdanto

Kaivoksissa materiaalit joutuvat olosuhteisiin, joissa ne altistuvat syöpymiselle, kulumiselle sekä raskaalle kuormitukselle. Huomioimalla rakenteen käyttöolosuhteet materiaalinvalinnan yhteydessä, voidaan tehokkaasti ehkäistä vaurioitumista sekä pidentää rakenteiden elinikää.

Lähes jokaisessa kaivosprosessin vaiheessa materiaalit joutuvat kosteudelle alttiiksi, sillä louhinnan ja rikastuksen käyttöveden lisäksi louhoksista pumpataan pois sinne kulkeutunutta pohjavettä sekä valuma- ja suotovettä. Räjähäytysaineiden, kallioperässä olevien mineraalien ja muiden veteen joutuvien aineiden johdosta pumpattavat kaivosvedet ovat useimmiten pH-arvoiltaan happamia. Lisäksi niiden joukossa on usein irtoainesta, joka lisää esimerkiksi putkistomateriaalien kulumista. Malmista riippuen, kaivoksella käytettävä rikastusmenetelmä voi olla sellainen, joka vaatii toimiakseen erilaisia kemikaaleja kuten syanidia, kalkkia, rikkihappoa sekä lipeää. /1/

Louhitun malmin kovuus määrää kuinka paljon eri rakenteet kuluvat joutuessaan sen kanssa tekemisiin. Kuten malmin murskattavuutta myös sen kuluttavuutta voidaan arvioida testaamalla. Kuluvia kohteita onkin kaivoksessa runsaasti, sillä koko kaivosprosessin aikana malmia siirrellään eri laittein sekä murskataan ja hienonnetaan rikastusta varten. Kuljetuskaluston, kuten kauhat, autojen lavat ja kuljettimet, lisäksi iskevälle ja hankaavalle kulumiselle alttiita kohteita ovat syöttösuppiloiden reunat sekä murskaimet ja jauhinmyllyjen seinämät. Kulumiseen vaikuttavat malmin kovuuden lisäksi kulumistyyppi, ympäristötekijät, murskaimen käyttöparametrit sekä kulutusosien materiaaliominaisuudet. /2/

Syövyttävissä kohteissa, joissa teräkset joutuvat kosketuksiin esimerkiksi happamien kaivosvesien tai rikastuksessa käytettävien kemikaalien kanssa, yleisiä ovat haponkestävät teräkset ja ruostumattomat teräkset. Myös tavallisia rakenneteräksiä voidaan suojata syöpymistä vastaan erilaisilla pinnoitusmenetelmillä, kuten sinkityksellä. Louhinnan, materiaalinsiirron ja murskauksen yhteydessä rakenteet altistuvat kovalle kulutukselle, jolloin erityisten kulutusta kestävien terästen käyttö on kannattavaa.

Kaivoksissa käytetyimpiä kulutusteräksiä ovat hiovaa ja iskevää kulutusta kestävät mikrorätkäiset sekä mangaaniterätkäiset. /3/

Tässä selvityksessä esitellään erilaisia mekanismeja, jotka ovat kulumisilmiöiden taustalla. Lisäksi käydään läpi eräitä hiiliteräksiä ja ruostumattomia teräksiä, jotka soveltuvat ominaisuuksiltaan parhaiten kaivosten vaativiin olosuhteisiin. Selvitys on tehty osana Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun MineSteel-projektia, jossa tutkitaan kaivosten vaikeiden olosuhteiden materiaaleja ja kehitetään niiden elinkaar-hallintaa. Projektin kesto-aika on 1.1.2012–31.06.2014 ja sitä ovat olleet rahoit-tamassa Euroopan aluekehitysrahasto EAKR sekä teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus TEKES.

2 Kuluminen

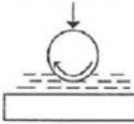
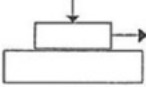
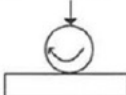
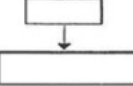
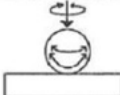
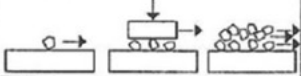
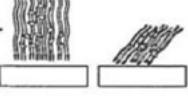
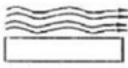
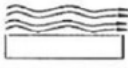
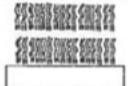
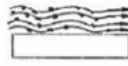
Kuluminen on tribologinen ilmiö, joka on seurausta toisiinsa nähden liikkeessä olevien pintojen aiheuttamasta materiaalin irtoamisesta ja aiheuttaa näin ollen materiaalihukkaa. Kulumista voi tapahtua monin eri tavoin ja hyvin erilaisissa olosuhteissa, jonka vuoksi kulumismekanismien luokittelu on haastavaa ja vuosien saatossa erilaisia luokittelutapoja on syntynyt runsaasti. Erään määritelmän mukaan kulumismekanismit voidaan jaotella seuraavasti:

- adhesiivinen kuluminen
- abrasiivinen kuluminen
- väsymiskuluminen
- tribokemiallinen kuluminen.

Kulumismekanismien lisäksi voidaan myös jaotella erilaiset kulumisen tyypit, joiden seurauksena jokin edellä mainituista kulumismekanismeista aktivoituu:

- liukuminen
- vierintä
- isku
- värähtely
- eroosio
- kaasuerosio
- kavitaatio
- pisaraerosio
- korroosioerosio.

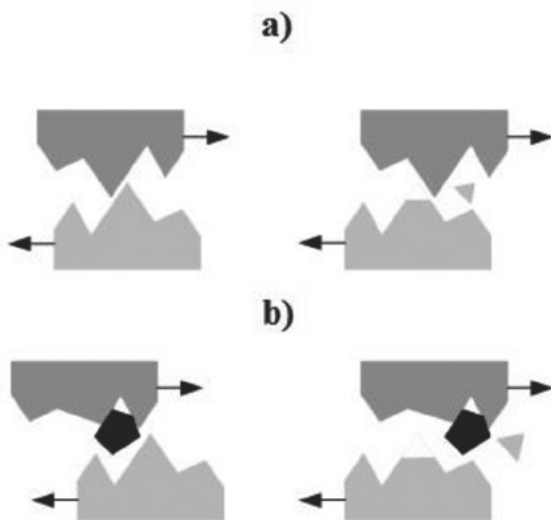
Vaikka kulumismekanismit esitetäänkin edellä mainittuun tapaan erillisinä, useissa käytännön kulumistilanteissa on toiminnassa monia mekanismeja peräkkäin, vuorotellen tai samanaikaisesti (kuva 1). Koska kulumistapahtumaan vaikuttavia parametreja on useita, on kulumisen yksiselitteinen määrittäminen fysikaalisesti ja matemaattisesti hankalaa. Eräänä nyrkkisääntönä voidaan kuitenkin pitää, että materiaalin kovuus vaikuttaa kulumiskestävyyteen parantavasti. /4,5/

Systeemin rakenne	Kulumisen aiheuttava rasitustyyppi	Kulumistyyppi	Kulumismekanismi			
			Adheesio	Abraasio	Pinnan väsyminen	Tribo-kemiallinen
Kiinteiden pintojen välissä voiteluaine	Liukuminen Vierintä Isku Sysäykset 				X	X
Kiinteät pinnat toisiaan vasten	Liukuminen 	Liukumis-kuluminen	X	X	X	X
	Vierintä 	Vierintä-kuluminen	X	X	X	X
	Iskukuormitus 	Isku-kuluminen	X	X	X	X
	Värähtely 	Värähtely-kuluminen	X	X	X	X
Kiinteät pinnat ja kulumispartikkeli	Hionta 			X		
Kiinteät pinnat ja partikkelit	Partikkeli-suihku 	Erosio		X	X	X
Kiinteä pinta ja kaasu	Virtaus 	Kaasu-erosio				X
Kiinteä pinta ja neste	Virtaus Värähtely 	Kavitaatio			X	X
	Virtaus Isku 	Pisara-erosio			X	X
Kiinteä pinta ja nesteessä kuluttavia partikkeita	Virtaus 	Erosio		X	X	
		Korroosio-erosio		X	X	X

Kuva 1. Kulumismekanismit eri kulumistyypeillä /5/

2.1 ABRASIIVINEN KULUMINEN

Abrasiivinen eli hiontakuluminen on vastinpinnan tai pintojen välissä olevan partikkelin tai pintojen topografian ulokkeiden aiheuttamaa naarmuuntumista ja sen seurauksena syntyvää materiaalin poistumista kappaleen pinnasta. Kulumismekanismi voidaan jakaa kahteen eri tapaukseen: kahden kappaleen abraasioon (kuva 2a) sekä kolmen kappaleen abraasioon (kuva 2b). Kahden kappaleen abraasiossa kova pinta liikkuu pehmeämpää pintaa vasten, jolloin kovan materiaalin pinnan karheus kuluttaa toista pintaa. Kolmen kappaleen abraasiossa puolestaan kahden pinnan välissä on kovia ja teräviä partikkeleita, jotka vastinpintojen materiaaliominaisuuksista riippuen kuluttavat niitä. Käytännössä kuluminen alkaa usein kahden kappaleen abraasiiona edeten kolmen kappaleen abraasioksi, kun pintojen väliin irtoaa partikkeleita. /4,5/



Kuva 2. Abrasiivinen kuluminen: a) kahden kappaleen abraasio, b) kolmen kappaleen abraasio. /6/

Abrasiivinen kuluminen voi tapahtua periaatteessa kolmella eri mekanismilla:

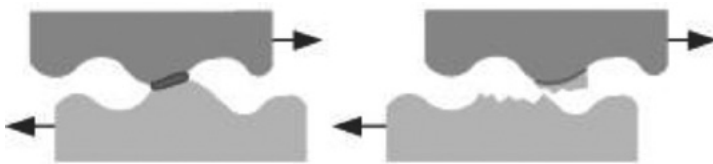
- kovertamalla
- hioutumalla
- naarmuuntumalla.

Abrasiivisesti kuluneessa pinnassa esiintyy naarmuja, uurteita ja uria sekä kovilla materiaaleilla myös murtumasäröjä. Kulumistuotteena syntyy lastuja tai hauraasti irronneita partikkeleita. Hiovaa abraasiokulumista eli abraasion ja paineen yhdistelmää esiintyy tyypillisesti kohteissa, joissa pienet ja kovat partikkelit murskaantuvat jauhamalla. Tällaisia ovat esimerkiksi myllyt, murskaimet, sekoituslavat ja kaavinterät. Näihin kohteisiin sopivia materiaaleja ovat esimerkiksi kulutusteräiset sekä karbideja sisältävät seokset. Kohteissa, joissa esiintyy iskumaista kulutusta, voidaan käyttää myös austeniittisia mangaaniteräksiä. /2,7/

Abrasiivisen kulumisen eräs muoto on eroosiokuluminen, jossa ainetta poistuu pintakerroksesta kiinteiden tai nestemäisten partikkeleiden törmäyksen seurauksena. Eroosiokulumista esiintyy usein pumpuissa ja putkistoissa, joissa nesteen sekaan on sekoittunut kiinteitä partikkeleita, kuten maa-ainesta. Kulumisnopeus riippuu kuluttavien partikkeleiden iskeytymiskulmasta, jolloin esimerkiksi sitkeillä materiaaleilla vinosti 20 ° kulmassa pintaan iskeytyvät partikkelit aiheuttavat nopeaa kulumista. /5/

2.2 ADHESIIVINEN KULUMINEN

Adhesiivinen eli tartunta- tai hitsauskuluminen perustuu atomi- ja kitkaliitosten sekä pinnankarheuden ulokkeiden leikkautumiseen (kuva 3). Siinä kaksi pintaa liukuu toisiaan vasten, jolloin pinnankarheuden huiput tarttuvat toisiinsa kiinni atomisidosten ja kitkalämmön vaikutuksesta syntyvien kitkaliitosten avulla. Puhdasta adhesiivista kulumista ei välttämättä esiinny kovinkaan pitkää ajanjaksoa, vaan se toimii muiden kulumismekanismien alkuunpanijana. Esimerkiksi, adhesiivisen kulumisen seurauksena kappaleiden väliin saattaa irrota partikkeleita, jotka kiihdyttävät kulumista muiden kulumismekanismien, kuten abraasion, välityksellä. /5/



Kuva 3. Adhesiivinen kuluminen /8/

Adhesiivisesti kuluneen pinnan tuntomerkkejä ovat

- hioutuneiden ja muokkautuneiden alueiden esiintyminen
- kuopat ja kohoumat
- pinnalla olevat irtonaiset partikkelit
- materiaalin siirtyminen komponentista toiseen.

Kulumista esiintyy tyypillisesti toisiaan vasten pyörivissä tai laahaavissa metallikappaleissa. Tällaisia ovat esim. akselit laakeripintoja vasten, ketjun rengas rullaa vasten sekä terästehtaan valssit. /7/

Eräs adhesiivisen kulumisen muoto on värähtelykuluminen, jossa vastakkaisten pintojen välillä on edestakaista liikettä normaalivoiman alaisena. Pieniamplitudinen liike aikaansaa ensin pintojen hitsautumisen yhteen, jonka jälkeen jatkuva värähtely repii liitoksen irti ja pintojen väliin syntyy irtonainen partikkeli. Tämä puolestaan voi jatkaa pintojen kuluttamista edelleen abraasiomekanismin välityksellä. Värähtelykulumista voidaan tehokkaasti ehkäistä pintojen voitelulla, jolloin adhesiivisia liitoksia ei pääse syntymään. /5/

2.3 VÄSYMISKULUMINEN

Väsymiskuluminen edellyttää vaihtelevansuuruista tai -suuntaista sekä pitkäaikaista mekaanista rasitusta. Kun kappaleen pinnankarheuden uloke deformatuu plastisesti tarpeeksi montaa kertaa peräkkäin, irtoaa siitä väsymismurtuman seurauksena kulumispartikkeli. Väsymismurtuma saa alkunsa murtumissäröstä, jonka läheisyyteen syntyy toistuvasta veto-puristus-rasituksesta johtuva jännityskenttä. Murtuma etenee tämän jälkeen joka kuormanvaihdolla, kunnes partikkeli lopulta irtoaa. Usein, mikäli kuluminen ei selvästi ole abrasiivista tai adhesiivista on kyse pintakerroksen väsymisestä. /5,7/

Kavitaatio on yksi väsymiskulumisen muoto, joka on seurausta metallipintaan kohdistuvista jännitysiskuista, kun sen ohi virtaavan nesteeseen paine muuttuu siten, että nesteessä olevat kaasukuplat luhistuvat. Kun kupla luhistuu, vapautuu sen pinta-energiaa vastaava energiamäärä, joka aiheuttaa kulumista. Metallin pinta muodostuu kavitaation seurauksena yleensä hyvin rosoiseksi. Myös eroosio voi aiheuttaa väsymiskulumista sitkeiden materiaalien yhteydessä. Tällöin kohtisuoraan iskeytyvät partikkelit aiheuttavat hidasta kulumista, jolloin materiaali ehtii muokkautua sekä mahdollisesti muokkauslujittua vähitellen, kunnes partikkeli irtoaa väsymisen seurauksena. /5/

2.4 TRIBOKEMIALLINEN KULUMINEN

Metallien pinnalla on normaalisti oksidikerros, joka pienentää kulumisnopeutta ja kitkaa sekä suojaa korroosiolta. Tribokemialliseksi kulumiseksi kutsutaan oksidikerroksen kulumista suhteellisen liikkeen seurauksena, jolloin oksidikerros rikkoutuu ja paljastunut metallipinta reagoi uudelleen ympäristönsä kanssa. /5/

Eräs tribokemiallisen kulumisen muoto on korroosiokuluminen, jossa materiaalin pinta on samanaikaisesti tai vuorotellen alttiina sekä korroosiolle että kulumiselle eri mekanismeilla. Korroosiokuluminen alkaa tyypillisesti kemiallisena tai sähkökemiallisena prosessina mutta melko usein myös mekaanisena kulumisena, jolloin mekaanisesti irronneen pintakerroksen alta paljastuu uutta korroosiolle altista pintaa. /4,5/

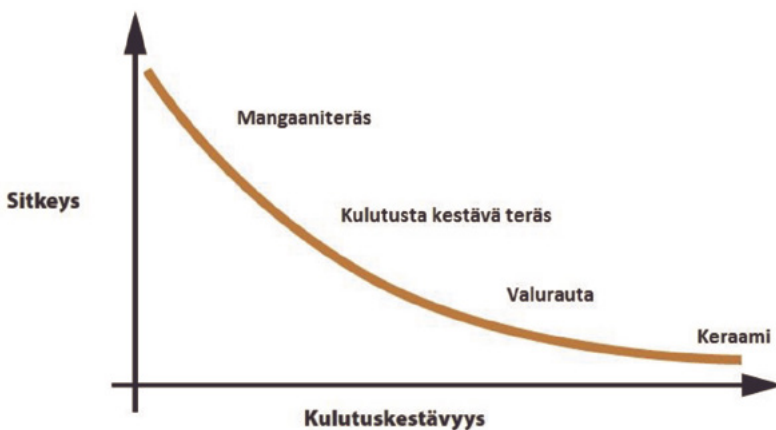
Korroosioalttiissa kohteissa hyvä materiaalivalinta on ruostumaton teräs, johon hapettavissa olosuhteissa muodostuu rikkoutumisen jälkeen suhteellisen nopeasti uusi, korroosiolta suojaava, kromioksidikalvo. Teräksiä on olemassa eri lajeja, jolloin oikean materiaalin valinta riippuu mm. käyttöympäristöstä sekä teräkseltä vaadittavista mekaanisista ominaisuuksista. Esimerkiksi putkiin hyvin soveltuva materiaali on ruostumaton duplex-teräs, joka on materiaalina austeniittista ruostumatonta terästä lujempaa sekä kovempaa ja kestää näin ollen myös partikkeleiden kulutusta paremmin.

3 Kuluttaviin olosuhteisiin soveltuvia hiiliteräksiä

Varsinaisiksi kulutusteräksiksi on kehitetty kromi- ja booriseosteisia teräksiä, jotka karkaistuna ovat kovia, mutta vähäisen hiilipitoisuutensa vuoksi kuitenkin hyvin hitsattavissa. Kulutusteräksissä on tyypillisesti martensiittinen mikrorakenne, jonka seurauksena teräs on lujaa sekä kovaa ja kestää kulutusta. /9,10/

Myös austeniittisia mangaaniteräksiä käytetään kaivosteollisuuden sovelluksissa, sillä ne kestävät iskumaista kulutusta erittäin hyvin ja ovat samalla myös sitkeitä (kuva 4). Mangaaniteräkset valmistetaan valamalla ja sen jälkeen suoritettavalla lämpökäsittelyllä, jossa teräkseen saadaan austeniittinen mikrorakenne, joka on muokkauslujittuva. /2/

Toisaalta myös erittäin lujat rakenneteräkset, joiden myötölujuus voi olla jopa 1100 MPa kestävät kulutusta kohtuullisen hyvin. Tällaisia ovat esimerkiksi Ruukin Optim QC- tuoteperheen teräkset, joiden mikrorakenteeksi suorasammutuksen jälkeen muodostuu bainiitin ja martensiitin yhdistelmä. Myös suojausteräksiä, joilla on hyvän kulumiskestävyyden lisäksi myös ballistisia ominaisuuksia, voidaan soveltaa kaivosteollisuuden kohteisiin. /11,12/



Kuva 4. Eri materiaalien kulutuskestävyyden ja sitkeyden riippuvuus toisistaan. /2/

3.1 KULUTUSTERÄKSET

Kulutusterästen tyypillisiä käyttökohteita ovat muun muassa:

- kippilavat
- poraustyökalut (kuva 5)
- kaivinkoneiden kauhat (kuva 6)
- murskaus- ja seulontalaitteistot
- kontit.

Näissä kohteissa teräkset joutuvat alttiiksi iskumaiselle ja hiovalle kulutukselle. Valitsemalla abrasiivin kuluttavuuden perusteella kohteeseen kulutusteräs, joka on tarpeeksi kova, voidaan rakenteiden elinikää pidentää merkittävästi. Koska kulutusteräket ovat karkaistuja, eivät ne sovellu kuitenkaan kaikkiin käyttökohteisiin, sillä mekaaniset ominaisuudet muuttuvat jo yli 200 °C lämpötiloissa. /13/

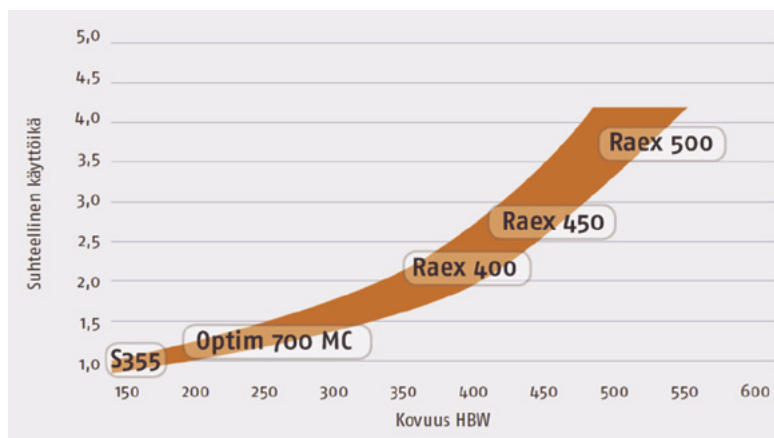


Kuva 5. Porauslaitteisto /10/



Kuva 6. Kaivinkoneen kauha /14/

Kulumiskestävyydellä on usein selvä yhteys aineenkoetuksessa mitattuun kovuuteen. Tämä voidaan havaita myös kuvasta 7, jossa on esitetty materiaalin suhteellisen käyttöiän kasvamista kovuuden kasvaessa abrasiivisesti kuluviissa kohteissa. Esimerkiksi korvaamalla tavallinen S355-rakenneteräs kovuudeltaan 450 HBW materiaalilla, voidaan kohteen käyttöikää pidentää kolminkertaiseksi.



Kuva 7. Suhteellisen käyttöiän riippuvuus materiaalin kovuudesta /14/

Kulutusteräksissä nimessä mukana oleva luku kertoo yleensä teräksen tyypillisen kovuuden Brinell-asteikolla ilmaistuna. Taulukossa 1 on esitetty eräiden markkinoilla olevien kulutusterästen tyypillisiä mekaanisia ominaisuuksia. Näiden lisäksi markkinoilla on myös kulutusteräksiä, joiden kovuudet ylittävät jopa 600 HBW. Kulutusterästen myötölujuudet alkavat 900 MPa:sta ja kasvavat kovuuden mukana. Tämä mahdollistaa ohuempien rakenteiden käytön esimerkiksi kauhojen sekä lavojen valmistuksessa ja parantaa näin ollen energiatehokkuutta. Terästen paksuudet vaihtelevat tyypillisesti 2 mm nauhalevyistä aina 80 mm paksuihin kvarttolevyihin, jotka ovat erityisesti kaivosteollisuuden eri kohteisiin tarkoitettuja. Valmistajasta riippuen myös 160 mm levynpaksuuksia on myös saatavilla. /13,15,16/

Taulukko 1. Eräiden kulutusterästen tyypillisiä mekaanisia ominaisuuksia. /13/

	Myötölujuus Rp0,2 [MPa]	Murtolujuus Rm [MPa]	Murtovenymä As [%]	Iskusitkeys Charpy V [J]	Kovuus [HBW]	Levyn paksuus [mm]
HBW 300	900	1000	11	20 (-40 °C)	270-390	2-8 (nauha)
HBW 400	1000	1250	10	20 (-40 °C)	360-440 360-440 360-460	2-8 (nauha) 6-30 (kvartto) 30-80 (kvartto)
HBW 450	1200	1450	8	20 (-40 °C)	420-500 420-500	2,5-8 (nauha) 6-80 (kvartto)
HBW 500	1250	1600	8	20 (-30 °C)	450-540 450-540	3-6,5 (nauha) 6-80 (kvartto)

Taulukko 2. Kulutusterästen kemiallisia koostumuksia /13,15/

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
HBW 300	0.18	0.80	1.70	0.025	0.015	1.50	1.00	0.50	0.005
HBW 400	0.25	0.80	1.70	0.025	0.015	1.50	1.00	0.50	0.005
HBW 450	0.26	0.80	1.70	0.025	0.015	1.50	1.00	0.50	0.005
HBW 500	0.30	0.80	1.70	0.025	0.015	1.50	1.00	0.50	0.005
HBW 600	0.47	0.70	1.00	0.015	0.010	1.20	2.50	0.70	0.005

Runsas seostus (taulukko 2) sekä korkea lujuus ja kovuus (taulukko 1) tekevät kulutusteräksen työstämisestä vaativampaa verrattuna tavalliseen rakenneteräkseen. Työstäminen konepajaolosuhteissa onnistuu kuitenkin suhteellisen helposti, tietyin, lähinnä materiaalin vahvuuteen liittyvin, rajoituksin. Esimerkiksi hitsatessa huomiota tulee kiinnittää oikeisiin hitsausarvoihin, suositusten mukaisesti työlämpötiloihin sekä oikeanlaisiin hitsauslisäaineisiin. Lastuavassa työstössä huomiota tulee kiinnittää työstönopeuksiin sekä oikeanlaisiin työvälineisiin, jotka soveltuvat kovalle materiaalille. Korkea lujuus asettaa haasteita myös kulutusterästen särmäykselle, sillä taivutusvoiman tarve, takaisinjouston suuruus ja pienin sallittu taivutussäde kasvavat teräksen lujuuden kasvaessa. Kovimpien kulutusterästen ja yli 20 mm paksuisten levyjen taivutuksessa valmistajan antama ohjeistus on tarpeen. /13,17–19/

3.2 AUSTENIITTISET MANGAANITERÄKSET

Austeniittiset mangaaniteräkset ovat valuteräksiä, jotka sisältävät tyypillisesti 0,7-1,45 % C ja 11–14 % Mn sekä muita seosaineita, kuten kromia, nikkeliä ja molybdeenia (taulukko 3). Nykyään joissain kaupallisissa teräslajeissa on myös yli 20 % Mn-seostus. Terästen austeniittinen mikrorakenne saadaan aikaan austenitointiuhkutuk-

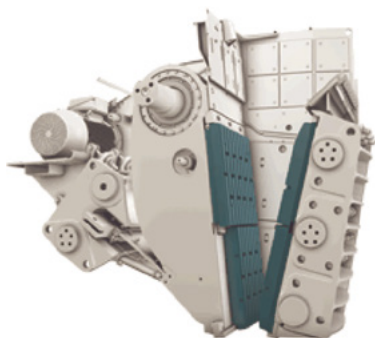
sella ja sen jälkeisellä sammutuksella. Mangaaniterästen hyvä kulumiskestävyys perustuu niiden työstökarkenemiseen eli muokkauslujittumiseen iskumaisen rasituksen tai kovan puristuskuormituksen alla. /2,20,21/

Taulukko 3. Austeniittisten mangaaniterästen kemiallisia koostumuksia /20/

ASTM A128	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si (max)	P (max)
A	1.05-1.35	min 11.0				1.00	0.07
B-1	0.9-1.05	11.5-14.0				1.00	0.07
B-2	1.05-1.2	11.5-14.0				1.00	0.07
B-3	1.12-1.28	11.5-14.0				1.00	0.07
B-4	1.2-1.35	11.5-14.0				1.00	0.07
C	1.05-1.35	11.5-14.0	1.5-2.5			1.00	0.07
D	0.7-1.3	11.5-14.0			3.0-4.0	1.00	0.07
E-1	0.7-1.3	11.5-14.0		0.9-1.2		1.00	0.07
E-2	1.4-1.35	11.5-14.0		1.8-2.1		1.00	0.07

Mangaaniteräkset ovat iskusitkeydeltään hyviä sekä melko pehmeitä materiaaleja, joiden alkukovuus on 220–250 HV luokkaa. Terästen myötölujuus on 345–415 MPa. Kun austeniittiseen pintakerrokseen kohdistuu isku tai puristus, joka ylittää austeniitin myötörajan, pintakerros muokkauslujittuu mutta pohjamateriaali säilyy sitkeänä. Muokkauslujittuneen pinnan paksuus voi olla 10–15 mm ja kovuudeltaan jopa 600 HV. /2,20/

Mangaaniteräksiä käytetään muun muassa murskainten kulutusosissa (kuva 8) sekä kaivinkoneiden kauhan kärjissä. Parhaiten ne soveltuvat kohteisiin, joissa kulutus on iskumaista, sillä pintakerroksen kuluessa, sen alla oleva vyöhyke karkeenee uudelleen iskujen voimasta ja kulutuskestävyys säilyy. Jauhavan kulutuksen alaisissa kohteissa, kuten pumppujen ja putkistojen osissa, mangaaniteräkset eivät ole juuri normaalia rakenneterästä kestävämpiä, sillä voimat jäävät niin pieniksi ettei muokkauslujittumista tapahdu. /9/



Kuva 8. Leukamurskaimen seinämät /22/

Mangaaniterästen työstö on haastavampaa niiden muokkauslujittumisominaisuuden vuoksi. Hitsaus suositellaan tehtäväksi kaarihitsaamalla, jolloin lämmötuonti on pienempää ja haitallisten karbidien erkautumista voidaan näin välttää. Koneistuksessa suositellaan käytettäväksi alhaisia nopeuksia sekä täyskovametalliteriä. /20/

3.3 MUITA HYVÄN KULUMISKESTÄVYYDEN OMAAVIA TERÄKSIÄ

Nykyään markkinoilla on saatavilla myös ultralujia rakenneteräksiä, joiden myötölujuus ylittää jopa 1300 MPa asti (taulukko 4). Korkean lujuuden myötä terästen kovuus on parhaimmillaan kulutusterästen minimikovuusluokkaa 300–400 HBW (vrt. taulukko 1), ollen siis vähintään kaksinkertainen tavalliseen rakenneteräkkeen S355 verrattuna. /11/

Taulukko 4. Ultralujien rakenneterästen tyypillisiä mekaanisia ominaisuuksia /11,23,24/

	Myötölujuus R _{p0.2} [MPa]	Murtolujuus R _m [MPa]	Murtovenymä A _s [%]	Iskusitkeys Charpy V [J/cm ²]	Kovuus [HBW] *	Levyn paksuus [mm]
900	900	950	8	34 (-40 °C)	280	2.5-8.0
960	960	1000	7	34 (-40 °C)	300	2.5-8.0
1100	1100	1250	6	34 (-20 °C)	370	2.5-7.0
1300	1300	1400	8	27 (-40 °C)	415	4.0-10.0

* arvioituja

Rajanveto ultralujan rakenneteräksen ja kulutusteräksen välillä on nykyään häilyvä, sillä molempia voidaan soveltaa kohteisiin, joissa korkealla lujuudella/hyvällä kulumiskestävyydellä mahdollistetaan kevyempien rakenneratkaisujen käyttö ja näin ollen hyötykuorman kasvattaminen. Ultralujien rakenneterästen tyypillisiä käyttökohteita ovat muun muassa:

- syöttö- ja purkaussuppilot
- kontit (kuva 9)
- hyötyajoneuvojen runko- ja päällysrakenteet.

Nämä teräkset eivät sovellu käytettäväksi korkeissa lämpötiloissa, sillä karkaistujen terästen lujuusominaisuudet alentuvat oleellisesti yli 450 °C lämpötilassa. /11,25/



Kuva 9. Ultralujasta rakenneteräksestä valmistettu kontti /26/

Taulukko 5. Ultralujien rakenneterästen kemiallisia enimmäiskoostumuksia /11,24/

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	Ti	B
900	0.10	0.25	1.15	0.020	0.010					0.070	
960	0.11	0.25	1.20	0.020	0.010					0.070	
1100	0.16	0.30	1.25	0.020	0.010					0.070	
1300	0.25	0.50	1.40	0.020	0.005	0.80	0.10	3.0	0.70		0.005

Ultralujien terästen kehittämissä on panostettu niiden hitsattavuuteen ja työstettävyyteen, jotka runsaasta seostuksesta (taulukko 5) huolimatta ovat hyviä. Noudattamalla annettuja erikoisohjeita, voidaan teräsiä hitsata kaikilla tavanomaisilla menetelmillä. Hitsauksessa erityishuomiota on kiinnitettävä kohtuullisiin lämmöntuontiarvoihin sekä oikeiden hitsauslisäaineiden valintaan. Korkeaan lujuuteen nähden ultralujien terästen kylmämuovattavuus on hyvä. Taivutusvoima ja -säde sekä takaisinjousto ovat suurempia verrattuna tavalliseen rakenneteräksen korkean lujuuden vuoksi. /11/

Kulutusterästen lisäksi myös suojausteräksillä on korkea kovuus (360–640 HBW) ja näin ollen erittäin hyvä kulumisenkestävyys. Taulukossa 6 on esitetty eräiden suojausterästen mekaanisia ominaisuuksia. Kulutusteräksiin verrattuna (taulukko 1) suojausteräksillä on hieman korkeammat lujuusarvot, joita voidaan hyödyntää eri rakenteissa. Valmistajasta ja halutusta kovuusluokasta riippuen suojausteräksiä on saatavilla 2,5–140 mm levynpaksuuksilla. /12,27/

Taulukko 6. Suojausterästen tyypillisiä mekaanisia ominaisuuksia /12,27/

	Myötölujuus R_{p0,2} [MPa]	Murtolujuus R_m [MPa]	Murtovenymä A₅ [%]	Iskusitkeys Charpy V [J]	Kovuus [HBW]
400	1100	1300	8	20 (-40 °C)	360-450
500	1450	1700	7	20 (-40 °C)	480-560
600	1500	2000	7	12 (-40 °C)	570-640

Nimensä mukaisesti suojausteräkset on tarkoitettu käyttökohteisiin, joissa terästä tarvitaan antamaan suojaa räjähdys- ja paineaalloilta sekä kohteisiin, joissa tarvitaan suojaa lentävien kappaleiden liike-energiaa vastaan (ballistinen suojaus). Käyttöolosuhteissa, jossa kiviainesta räjäytetään runsaasti, tällaisia kohteita ovat esimerkiksi:

- suojatut kontit
- ovet
- ikkunankarmit
- seinät.

Koska teräkset ovat karkaistuja, ei niitä suositella käytettäväksi korkeissa lämpötiloissa, sillä karkaisemalla aikaansaadut ominaisuudet heikkenevät oleellisesti lämpötilan noustessa. /12/

Taulukko 7. Suojausterästen kemiallisia koostumuksia /12, 28/

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
400	0.24	0.70	1.50	0.020	0.015	1.00	1.00	0.70	0.005
500	0.32	0.70	1.50	0.020	0.015	1.00	2.00	0.70	0.005
600	0.47	0.70	1.00	0.010	0.005	1.50	3.0	0.70	0.005

Kulutusteräksiin verrattuna (vrt. taulukko 2) suojausterästen kemiallinen koostumus on hyvin samankaltainen (taulukko 7). Kohtuullisesta seostuksesta johtuen terästen hitsattavuus ja työstettävyydet ovat hyvät. Hitsaus onnistuu kaikilla tavallisilla hitsausmenetelmillä. Särjäytymisen ja lastuavan työstön osalta pätevät samat suositukset kuin kulutusteräksilläkin. /12/

4 Kaivosteollisuuden soveltuvia ruostumattomia teräksiä

Kuluminen ja kaivosten vaativat olosuhteet (kosteus, lämpötila, pH, kloridi- ja sulfaattipitoiset liuokset, biologinen kasvusto jne.) altistavat materiaaleja myös korroosiolle. Hiiliterästen korroosiokestävyyttä voidaan parantaa erilaisilla pinnoitteilla, mutta vaativiin ja kriittisiin kohteisiin ruostumaton teräs on hyvä valinta. Ruostumattomien terästen korroosionkesto perustuu hapettavissa olosuhteissa uusiutuvaan kromioksidi-passiivikerrokseen, joka erottaa teräksen syövyttävästä ympäristöstä. Niiden etuna ovat myös laajat käyttölämpötilat. /29/

Kaivosteollisuuden soveltuvimmat ruostumattomat teräkset voidaan ryhmitellä austeniittisiin, ferriittisiin sekä duplex-teräksiin, joiden joukossa on korroosionkestoltaan hyviä rakenne-, kuumalujia sekä haponkestäviä teräksiä. Seuraavassa on esitelty eräitä kaivosteollisuudessa käytettyjä ruostumattomia teräksiä näistä ryhmistä.

4.1 AUSTENIITTISET HAPONKESTÄVÄT RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Haponkestävillä ruostumattomilla teräksillä, kuten EN 1.4401 ja EN 1.4404, on tavallisia ruostumattomia teräksiä paremmat korroosionkesto-ominaisuudet erityisesti piste- ja rakokorroosiota vastaan kloridipitoisissa ympäristöissä molybdeeni-seostuksen vuoksi (taulukko 8). Lisäämällä seostusta saadaan valmistettua haponkestäviä ruostumattomia teräksiä vaativiin kohteisiin, kuten rikkihappoa ja muita epäorgaanisia sekä orgaanisia happoja sisältäviin ympäristöihin. Tällaisia ovat esimerkiksi runsasseosteiset EN 1.4539 ja EN 1.4547. /30,31/

Taulukko 8. Haponkestävien terästen kemiallisia koostumuksia /30/

EN	ASTM	C	Cr	Ni	Mo	Cu	N
1.4401	316	0.04	17.2	10.2	2.1		
1.4404	316L	0.02	17.2	10.1	2.1		
1.4539	904L	0.01	20.0	25.0	4.3	1.5	
1.4547	S31254	0.01	20.0	18.0	6.1	1.0	0.2

Eräiden haponkestävien ruostumattomien terästen tyypillisiä mekaanisia ominaisuuksia huoneenlämpötilassa ja korotetuissa lämpötiloissa on esitetty taulukoissa 9 ja 10. Erot kuuma- ja kylmävalssattujen levyjen lujuuksissa taulukossa 9 johtuvat teräksen muokkauslujittumisesta kylmävalssauksen aikana. Myötölujuudet vaihtelevat kuumavalssatussa tilassa 260–320 MPa:n välillä huoneenlämpötilassa ja 200 °C lämpötilassa 137–190 MPa:n välillä.

Taulukko 9. Haponkestävien terästen tyypillisiä mekaanisia ominaisuuksia +20 °C /30,31/

EN	ASTM	Myötölujuus	Murtolujuus	Murtovenymä	Iskusitkeys	Kovuus
		R _{po.2} [MPa]*	R _m [MPa]*	A _s [%]*	Charpy V [J]	
1.4401	316	280/290	570/590	55/55	60 (+20 °C)	160 HB
1.4404	316L	280/290	570/590	55/55	60 (+20 °C)	165 HB
1.4539	904L	260/340	600/655	50/38		82 HRB
1.4547	S31254	320/375	680/735	50/41		87 HRB

* kuumavalssattu levy/kylmävalssattu nauha

Taulukko 10. Haponkestävien terästen lujuusominaisuuksia +100...+500 °C /30,31/

EN	ASTM	Myötölujuus R _{po.2} [MPa]					Murtolujuus R _m [MPa]				
		100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
1.4401	316	166	137	118	108	100	430	390	380	380	360
1.4404	316L	177	147	127	115	110	430	390	380
1.4539	904L	205	175	145	125	110	500	460	440
1.4547	S31254	230	190	170	160	148	615	560	525	510	495

Haponkestävien ruostumattomien terästen tyypillisiä käyttökohteita ovat sovellukset, jotka joutuvat kosketuksiin erilaisten kemikaalien kanssa, kuten:

- säiliöt
- paineastiat
- lämmönvaihtimet
- pumput
- hydrometallurgian sovellukset.

Runsaasta seostuksesta huolimatta haponkestävät teräkset ovat hitsattavuudeltaan hyviä ja niitä voidaan hitsata kaikilla tavallisimmilla menetelmillä käyttäen alhaista lämmöntuontia. Teräkset ovat myös hyvin kylmämuovattavissa, tosin esimerkiksi eräiden lajien korkeampi lujuus voi aiheuttaa suurempaa takaisinjoustoja sekä suurempien työvoimien tarpeen kuin tavallisilla ruostumattomilla teräksillä. Austeniittiset ruostumattomat teräkset muokkauslujittuvat nopeasti, jonka vuoksi varsinkin lujimpien materiaalien koneistus on koettu usein hankalaksi. Kuitenkin, valitsemalla oikeanlaiset työkalut ja työstönopeudet sekä -asetukset, teräkset ovat koneistettavissa. /30,31/

4.2 FERRIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Ferriittiset ruostumattomat teräokset eivät sisällä normaalisti lainkaan kallista seosainetta nikkeliä ja ovat edullisuutensa vuoksi houkutteleva vaihtoehto moniin eri sovelluksiin. Kaivosteollisuuteen soveltuvim on Eurocode-3:n sisällytetty vähäkrominen ferriittinen rakenneteräs EN 1.4003, joka sisältää ferriittisistä teräksistä poiketen myös nikkeliä sekä mangaania (taulukko 11). Teräksen tyyppillisiä käyttökohteita ovat erilaiset rakennesovellukset. Sen korroosionkestävyys vahvoissa haapoissa on kuitenkin rajoittunutta, jonka vuoksi teräs soveltuu sinällään parhaiten käytettäväksi kevyesti korrosoivissa ympäristöissä. Hiiliteräsiin verrattuna korroosionkestävyys on kuitenkin hyvä. /32/

Taulukko 11. EN 1.4003 kemiallinen koostumus /29,32/

EN	C	Cr	Ni	Mn
1.4003	0.02	11.5	0.5	1.4

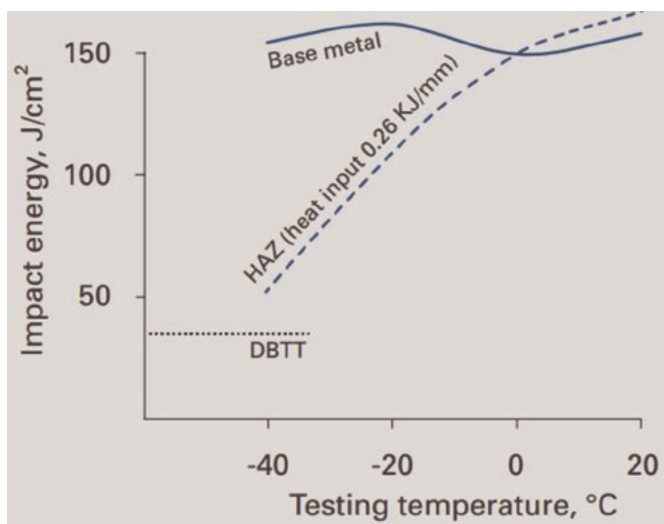
Ferriittiset ruostumattomat teräokset (taulukko 12) ovat jonkin verran tavallisimpia austeniittisiä teräksiä lujempia (vrt. taulukko 9). Huoneenlämpötilassa myötölujuus on 340 MPa:n luokkaa ja korotetuissa lämpötiloissa se vaihtelee 215–240 MPa:n välillä lämpötilasta riippuen (taulukko 13). EN 1.4003 -teräksen iskusitkeys on samalla tasolla modernimpien hiiliterästen kanssa ja on näin ollen muihin ferriittisiin ruostumattomiin teräsiin verrattuna omaa luokkaansa (kuva 10).

Taulukko 12. EN 1.4003 tyyppilliset mekaaniset ominaisuudet +20 °C /32/

EN	Myötölujuus R _{p0.2} [MPa]	Murtolujuus R _m [MPa]	Murtovenymä [%]
1.4003	340	500	25

Taulukko 13. EN 1.4003 myötölujuus +100...+300 °C /32/

EN	Myötölujuus R _{p0.2} [MPa]				
	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C
1.4003	240	235	230	220	215



Kuva 10. EN1.4003-teräksen iskusitkeys /32/

Ferriittiset ruostumattomat teräkset ovat muovattavuudeltaan samankaltaisia kuin niukkaseosteiset hiiliteräkset ja ne soveltuvat hyvin käytettäväksi tavallisimmissa kylmämuovausprosesseissa. Verrattuna austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin, jotka muokkauslujittuvat työstettäessä, ovat ferriittiset teräkset helposti työstettävissä ja yleisesti niukkaseosteisten hiiliterästen työstössä käytettyjä parametrejä sekä työkaluja voidaan käyttää myös niille. Ferriittisiä teräksiä voidaan hitsata tavallisimmilla hitsausmenetelmillä. EN 1.4003 -teräksen hyvä iskusitkeys säilyy hitsattaesakin, eikä sillä näin ollen esiinny vielä -40 °C lämpötilassakaan transitiota sitkeästä haurasmurtumaan (kuva 10). /32/

4.3 RUOSTUMATTOMAT DUPLEX-TERÄKSET

Duplex-teräksissä yhdistyvät ferriittisten ja austeniittisten terästen parhaimmat puolet muodostaen lujia ja korroosionkestoltaan hyviä teräksiä erilaisiin sovelluksiin. Austeniittisiin teräksiin verrattuna duplex-terästen lujuudet ovat lähes kaksinkertaiset, jonka lisäksi myös niiden korroosionkesto-ominaisuudet piste-, rako- ja jännityskorroosiota vastaan ovat erittäin hyvät. Korkea lujuus johtuu ferriittis-austeniittisen mikrorakenteen lisäksi typpiseostuksesta ja hyvät korroosionkesto-ominaisuudet korkeasta kromipitoisuudesta sekä molybdeenistä (taulukko 14). Alhaisen nikkelpitoisuuden vuoksi duplex-terästen hinta on myös austeniittisiä ruostumattomia teräksiä stabiilimpi. /33,34/

Taulukko 14. Duplex-terästen kemiallisia koostumuksia /34/

	EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn
2205	1.4462	0.02	22.0	5.7	3.1	0.17	
2507	1.4410	0.02	25.0	7.0	4.0	0.27	
LDX 2101	1.4162	0.03	21.5	1.5	0.3	0.22	5.0
LDX 2404	1.4662	0.02	24.0	3.6	1.6	0.27	3.0

Monipuolisten ominaisuuksien vuoksi teräksiä voidaan käyttää useilla eri teollisuuden aloilla sekä sovelluksissa. Tyypillisiä käyttökohteita ovat muun muassa:

- säiliöt
- paineastiat
- lämmönvaihtimet
- vedenlämmittimet
- rakenteet. /34/

Taulukoissa 15 ja 16 on esitetty duplex-terästen mekaanisia ominaisuuksia eri lämpötiloissa. Niistä havaitaan, että teräkset ovat huoneenlämpötilassa huomattavasti lujempia kuin esimerkiksi tavallinen S355-rakenneteräs - kylmävalssatussa tilassa jopa kaksinkertaisesti lujempia. Terästen murtovenymät ovat austeniittisia ruostumattomia teräksiä alhaisemmat, johtuen nimenomaan korkeasta lujuudesta. Myös korotetuissa lämpötiloissa terästen lujuusominaisuudet ovat niiden käyttöalueella varsin hyvät. /34/

Austeniittisiin teräsiin verrattuna duplex-teräkset ovat taipuvaisempia haitallisen sigma-faasin erkaantumiselle, joka aiheuttaa haurautta sekä heikentää korroosionkestoa. Haitalliset faasimuutokset tapahtuvat tyypillisesti lämpötila-alueella 350–950 °C, jonka vuoksi duplex-teräksiä ei suositella käytettäväksi yli 250–325 °C lämpötilassa teräslajista riippuen. /34/

Taulukko 15. Duplex-terästen mekaanisia ominaisuuksia +20 °C /33/

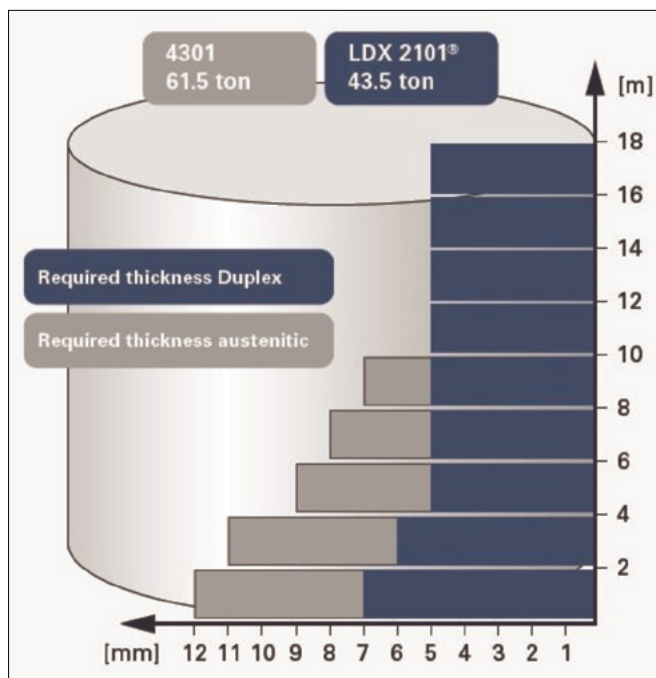
	EN	Myötölujuus Rp0.2 [MPa]*	Murtolujuus Rm [MPa]*	Murtovenymä As [%]*	Iskusitkeys Charpy V [J]	Kovuus [HB]*
2205	1.4462	510/635	750/835	35/35	60 (+20 °C), 40 (-40 °C)	350/350
2507	1.4410	550/665	820/895	35/33	60 (+20 °C), 40 (-40 °C)	250/255
LDX 2101	1.4162	480/600	700/800	38/35	60 (+20 °C), 27 (-40 °C)	220/230
LDX 2404	1.4662	540/640	750/850	33/30	60 (+20 °C), 40 (-40 °C)	230/-

* kuumavalssattu levy/kylmävalssattu nauha

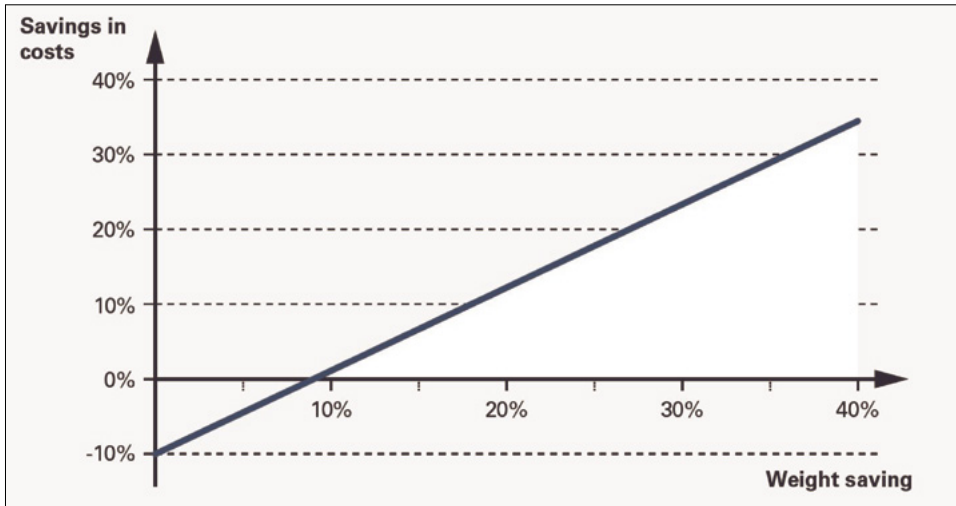
Taulukko 16. Duplex-terästen mekaanisia ominaisuuksia +100...+250 °C /34/

	2205	2207	LDX 2101	LDX 2404
	EN 1.4462	EN 1.4410	EN 1.4162	EN 1.4662
	R_{p0.2}/R_m	R_{p0.2}/R_m	R_{p0.2}/R_m	R_{p0.2}/R_m
100 °C	360/590	450/680	380/590	385/615
150 °C	335/570	420/660	350/560	345/590
200 °C	345/550	400/640	330/540	325/575
250 °C	300/540	380/630	320/540	310/560

Käyttämällä duplex-teräksiä erilaisissa rakenteissa, voidaan niiden hyvät mekaaniset ominaisuudet hyödyntää parhaiten. Korkean lujuuden vuoksi materiaalivahvuuksia voidaan pienentää, jolloin rakenteista tulee kevyempiä ja aikaansaadaan kustannussäästöjä. Kuvassa 11 on vertailtu austeniittista ruostumatonta terästä ja duplex terästä säiliömateriaalina. Siitä havaitaan, että esimerkiksi duplex-teräksestä valmistetun, 6 m korkean säiliön, seinämävahvuus on 45 % ohuempi verrattuna tavallisesta austeniittisesta teräksestä valmistettuun säiliöön. Kuvassa 12 on vastavasti esitetty painon alentamisen vaikutusta kustannussäästöihin. /33,34/



Kuva 11. Seinämän vahvuuden riippuvuus käytetystä materiaalista /33/



Kuva 12. Kevyempien sovellusten aikaansaama kustannussäästö. /33/

Duplex-terästen hitsattavuus on yleensä hyvä ja niitä voidaan hitsata samoilla hitsausmenetelmillä kuin austeniittisia ruostumattomia teräksiäkin. Tasapainotetun koostumuksen vuoksi HAZ-alueen austeniittipitoisuus säilyy tarpeeksi korkeana ja korroosionkesto on näin ollen hyvä. Teräksiä voidaan myös muovata tavallisilla ruostumattoman teräksen muovaustavoilla. Lujuuden ja kovuuden vuoksi tarvittavat työstövoimat ovat yleensä korkeammat ja teräs voi käyttäytyä muovatessa hieman eri lailla kuin tavallinen ruostumaton teräs. Varsinkin runsaimmin seostetut duplex-teräslajit on koettu haasteellisiksi koneistaa niiden kovuuden vuoksi. /34/

4.4 KUUMALUJAT AUSTENIITTISET JA FERRIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Kuumalujilla ruostumattomilla teräksillä on erinomainen kuumakorroosionkestävyys ja virumiskestävyys mekaanisessa rasituksessa, sillä ne pystyvät säilyttämään suojaavan oksidikalvon korkeissakin lämpötiloissa. Teräksiä on saatavilla niin austeniittisella kuin ferriittisellä mikrorakenteella. Kosteiden olosuhteiden aiheuttaman korroosion sijaan, teräkset on optimoitu kestämaan korkeissa lämpötiloissa esiintyvien kuivien kaasuatmosfäärien rasitusta ja ne ovatkin lähinnä tarkoitettu käytettäväksi yli 550 °C lämpötiloissa. /35/

Kuumalujien terästen pääseosaineet ovat kromi ja pii, jotka molemmat parantavat teräksen hapettumiskestävyyttä ja nostavat terästen käyttölämpötiloja. Kuumalujuteen voidaan vastaavasti vaikuttaa nikkeli-, hiili- ja tyypiseostuksella. Joissain lajeissa teräksiin on seostettu myös cerumia tai alumiinia, jotka yhdistettynä piihin parantavat mm. teräksen hapettumis- sekä eroosikorroosionkestävyyttä (taulukko 17). /35-37 /

Taulukko 17. Eräiden kuumalujien ruostumattomien terästen kemiallisia koostumuksia /35/

	EN (ASTM)	C	Cr	Ni	Si	N	Muut	Max. käyttölämpötila
4724	1.4724	0.07	12.5		0.8		0.8 Al	850 °C
4762	1.4762	0.08	23.5		1.0		1.5 Al	1150 °C
4948	1.4948 (304H)	0.05	18.1	8.2				800 °C
153 MA	1.4818 (S30415)	0.05	18.5	9.5	1.3	0.15	Ce	1000 °C
4833	1.4833 (309S)	0.06	22.3	12.6				1000 °C
253 MA	1.4835 (S30815)	0.09	21.0	11.0	1.6	0.17	Ce	1100 °C
4845	1.4845 (310S)	0.05	25.0	20.0				1100 °C

Vaikka kuumalujien terästen kehittämissä on ensisijaisesti pyritty optimoimaan oksidaatio- ja kuumakorroosionkesto-ominaisuuksia on niillä myös kohtuullisen hyvät mekaaniset ominaisuudet. Huoneenlämpötilassa ferriittisten terästen lujuudet ovat hyvin samankaltaiset austeniittisten terästen kanssa, myötölujuuksien vaihdella 210–310 MPa:n välillä, riippuen teräksen seostuksesta (taulukko 18). Yli 600 °C lämpötiloissa mitoituksessa käytetään keskimääräisiä virumismurtumis- ja muodonmuutoslujuuksia, joita on esitetty taulukossa 19. Ferriittisten kuumalujien terästen virumislujuuksien tippuvat yli 600 °C lämpötilassa noin neljännekseen verrattuna austeniittisiin kuumalujiin teräksiin, joka suunnittelussa tulee ottaa huomioon. /36/

Taulukko 18. Kuumalujien ruostumattomien terästen mekaanisia ominaisuuksia +20 °C /36,38/

	EN (ASTM)	Myötölujuus R _{p0.2} [MPa]	Murtolujuus R _m [MPa]	Murtovenymä A ₅ [%]	Kovuus [HB]
4724	1.4724	250	450-650	15 (pit.) /11(poik.)	192
4762	1.4762	280	520-720	10 (pit.) /7 (poik.)	223
4948	1.4948 (304H)	210	510-710	45	
153 MA	1.4818 (S30415)	290	600-800	40	210
4833	1.4833 (309S)	210	500-700	35	192
253 MA	1.4835 (S30815)	310	650-850	40	210
4845	1.4845 (310S)	210	500-700	35	192

Taulukko 19. Kuumalujien ruostumattomien terästen virumisominaisuuksia +500...+1100 °C /38/

EN (ASTM)	500 °C	550 °C	600 °C	650 °C	700 °C	750 °C	800 °C	850 °C	900 °C	950 °C	1000 °C	1050 °C
1.4948 (304H)	250	191	132	87	55	34						
1.4818 (S30415)		250	157	98	63	41	25	16	10	6,5	4	
1.4833 (309S)			120	70	36	24	18	13	8,5			
1.4835 (S30815)		250	157	98	63	41	27	18	13	9,5	7	5,5
1.4845 (310S)			130	65	40	26	18	13	8,5			

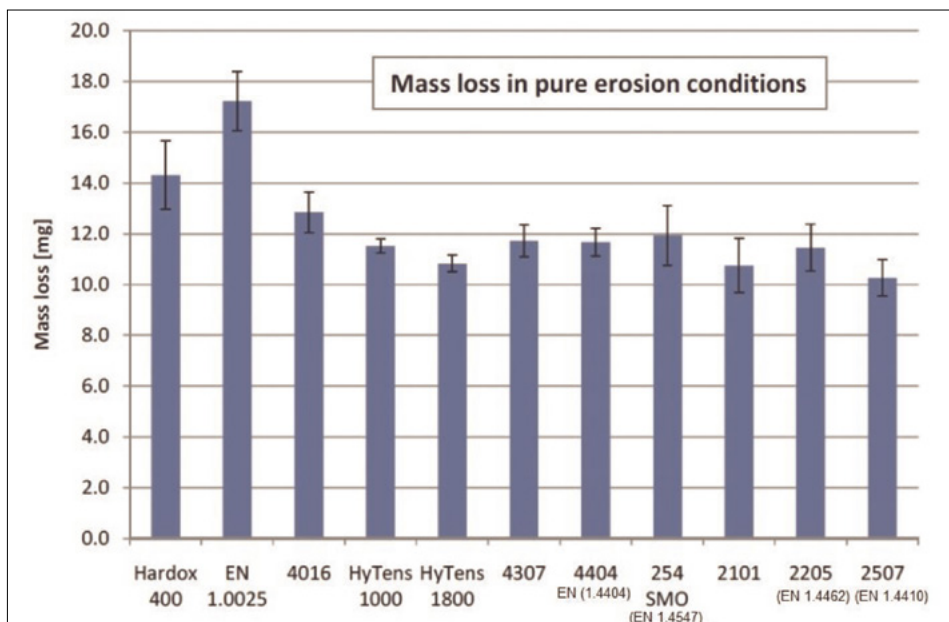
EN (ASTM)	Virumismuodonmuutoslujuus RA _{1,10000} [Mpa]											
	500 °C	550 °C	600 °C	650 °C	700 °C	750 °C	800 °C	850 °C	900 °C	950 °C	1000 °C	1050 °C
1.4948 (304H)	147	121	94	61	35	24						
1.4818 (S30415)		200	126	74	42	25	15	8,5	5	3	1,7	
1.4833 (309S)			70	47	25	15,5	10	6,5	5			
1.4835 (S30815)		230	126	74	45	28	19	14	10	7	5	3,5

Tarpeeksi korkeissa lämpötiloissa diffuusio aiheuttaa kuumalujiin teräksiin faasi-muutoksia, kuten ei-toivottujen faasi-erkautumista. Nämä heikentävät korroosionkestoa sekä mekaanisia ominaisuuksia erityisesti materiaalin jäähtyessä. Erkautumat ovat usein metallienvälisiä yhdisteitä kuten sigma-, chi- ja Lavesin faaseja. Mikro-seostetut austeniittiset MA-teräkset sekä vähiten seostetut ferriittiset teräkset ovat kuumalujien terästen joukossa stabiileimpia. /36,38/

Runsaasta seostuksesta huolimatta kuumalujien ruostumattomien terästen hitsattavuus on hyvä. Ferriittisten kuumalujien terästen kohdalla suositellaan samoja varotoimenpiteitä kuin hiiliteräksiä hitsatessa. Koneistettavuuden ja kylmämuovattavuuden osalta näiden terästen suhteellisen korkea kovuus, lujuus sekä austeniittisten kuumalujien terästen muokkauslujittuminen pitää huomioida työstämistä suunniteltaessa. /36,38/

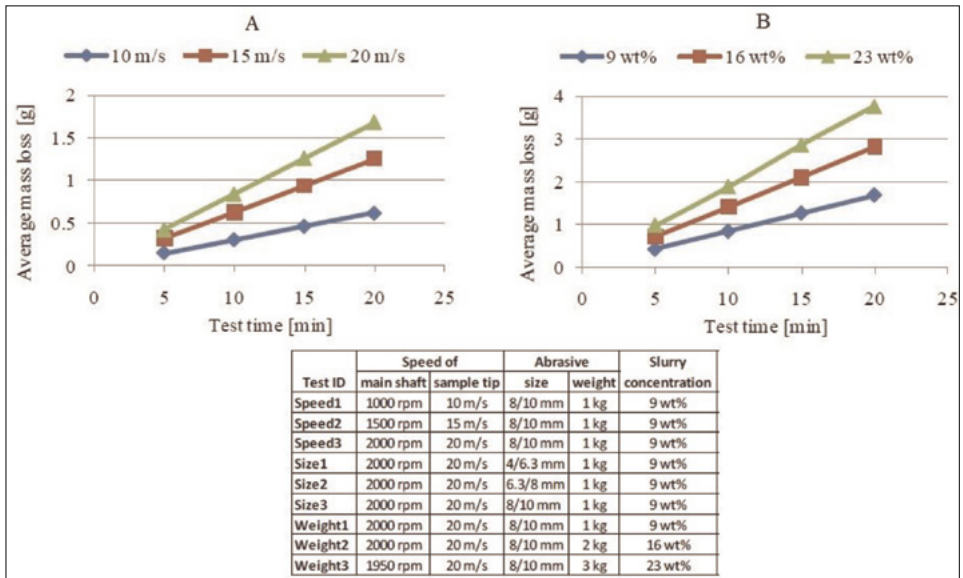
4.5 RUOSTUMATTOMIEN TERÄSTEN KULUMISKESTÄVYYS JA KORROOSIONKESTÄVYYS

Alhaisemmasta lujuudesta ja kovuudesta huolimatta ruostumattomien terästen kulumiskestävyys on suhteellisen hyvä verrattuna hiiliteräksiin. Kuvassa 13 on esitetty tuloksia eräästä kuivissa olosuhteissa suoritetusta ASTM G-65 mukaisesta abraasiotestistä. Siinä erilaisten ruostumattomien terästen kulumiskestävyyttä verrattiin mm. kulutusteräkseen Hardox 400, jonka mekaaniset ominaisuudet vastaavat hyvin paljon taulukon 1 HBW 400 -teräksen ominaisuuksia. Kuvasta havaitaan, että tässäkin selvityksessä esiteltyjen ruostumattomien terästen kulumiskestävyudet ovat noin 14–28 % alhaisemmat teräslajin mekaanisista ominaisuuksista riippuen. /29/



Kuva 13. Eri terästen kulumiskestävyksiä abraasiotestissä. /29/

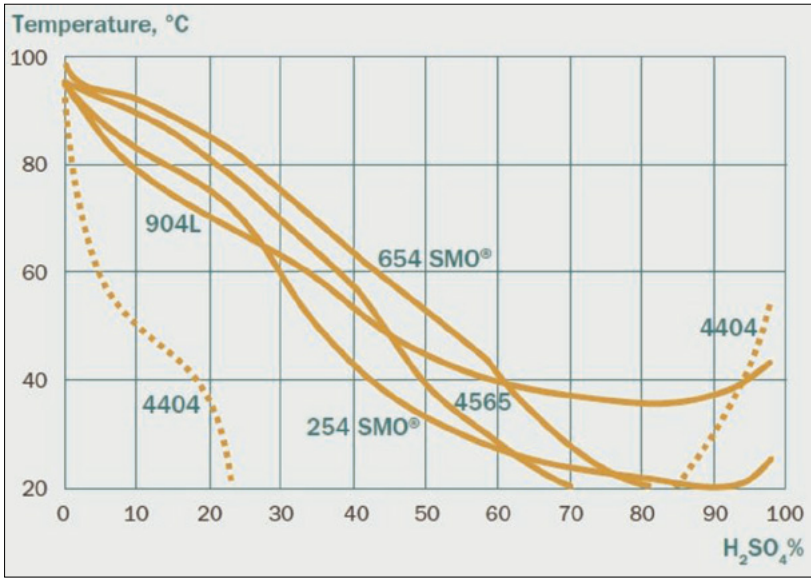
Kaivosteollisuudessa ruostumatonta terästä käytetään materiaalina usein putkistoissa ja pumppuissa, joissa kuljetetaan esim. rikastusprosessissa lietettä. Liette sisältää erikokoisia partikkeleita, joiden vaikutuksesta putkistojen ja pumppujen seinämiin kohdistuu kulumista – pienemmillä partikkeleilla eroosiota ja suuremmilla partikkeleilla iskukulumista. Materiaalin kulumiseen näissä olosuhteissa vaikuttavat suuresti partikkelikoon lisäksi myös nesteen virtausnopeus sekä lietteen partikkelpitoisuus, kuten kuvista 14a ja 14b voidaan havaita. Kuvien 14 a ja b testeissä AISI 316 (EN 1.4401) ruostumatonta terästä testattiin lietetestissä, jossa testausparametreja vaihdeltiin kuvassa esitetyn taulukon mukaisesti. /39/



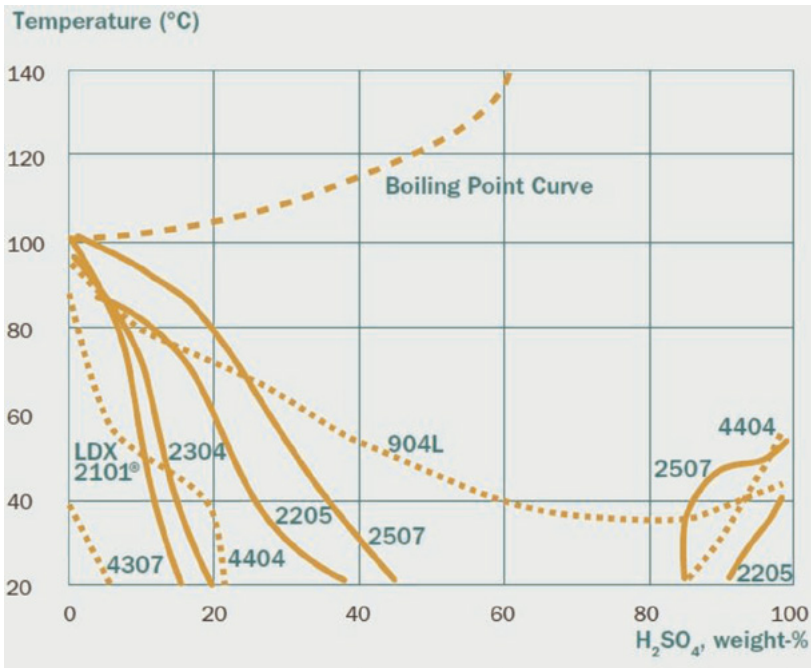
Kuva 14. AISI 316 teräksen kulumisen lietteessä: a) kulumisen riippuvuus testiajasta ja -nopeudesta ja b) kulumisen riippuvuus testiajasta ja -lietteen partikkelipitoisuudesta. Kaaviot on laadittu keskimääräisistä tuloksista koko testaussarjan ajalta. /39/

Teräslajista riippuen ruostumattomien terästen korroosionkesto erilaisia korroosio-
muotoja vastaan vaihtelee. Yleisesti ottaen kromi- ja molybdeeniseostus kasvattavat
terästen korroosionkestoja, jonka vuoksi niukasti kromia sisältävän EN 1.4003 -fer-
riittisen teräksen korroosionkesto ei yllä vahvoissa happoliuoksissa yhtä hyväksi kuin
austeniittisilla ja duplex-teräksillä. Kuvissa 15 ja 16 on esitetty austeniittisten ja duplex-
terästen kestävyyttä tasaista korroosiota vastaan puhtaassa rikkihapossa kulumis-
nopeudella 1mm/vuosi. Kuvista havaitaan, että nämä teräkset kestävät korroosiota
varsin hyvin duplex-terästen sijoituessa kestävyudessa tavallisimman haponkestä-
vän teräksen EN 1.4404 ja runsasseosteisen EN 4539 (AISI 904L) teräksen väliin.

Kloridipitoisessa ympäristössä teräkset ovat alttiita myös piste- ja rakokorroo-
sionkestoille. Eri materiaalien korroosionkestävyyttä näitä vastaan voidaan arvioida kar-
keasti PRE-luvun avulla, joka lasketaan kemiallisten koostumusten perusteella. Tau-
lukossa 20 on esitetty eri terästen PRE-lukuja, joiden perusteella runsaasti seostetut
austeniittiset ja duplex-teräkset kestävät piste- ja rakokorroosiota tavallista hapon-
kestävää austeniittistä sekä ferriittistä terästä huomattavasti paremmin. /31/



Kuva 15. Austeniittiset teräkset rikkihapossa, isokorroosiokäyrä 1mm/vuosi. /30/



Kuva 16. Duplex-teräkset rikkihapossa, isokorroosiokäyrä 1mm/vuosi. /34/

Taulukko 20. Ruostumattomien terästen PRE-lukuja /31,32/

Teräs	PRE
EN 1.4003	12
EN 1.4404	24
EN 1.4462	35
EN 1.4539	34
EN 1.4410	43
EN 1.4547	43

Korkeissa lämpötiloissa (> 60 °C) sekä kloridipitoisissa ympäristöissä teräkset ovat alttiita jännityskorroosiolle. Korroosionkestävyys kloridipitoisissa ympäristöissä on riippuvainen materiaalin nikkelpitoisuudesta, jolloin sen ollessa todella alhainen tai suuri, kestävyys on parhaimmillaan. Tämän vuoksi ferriittiset ja runsasseosteiset austeniittiset sekä jossain määrin myös duplex-teräkset kestävät jännityskorroosiota paremmin kuin tavanomaisimmat austeniittiset ruostumattomat teräkset. Sulfiittipitoisissa ympäristöissä jännityskorroosiota voi esiintyä jo alhaisemmissakin lämpötiloissa. Näihin olosuhteisiin sopivat parhaiten austeniittiset haponkestävät teräkset, kuten EN 1.4539, sekä eräät duplex-teräkset, kuten EN 1.4462. /31,32,34/

5 Case: syöttösuppilon sivukulutuspalat

Eräissä MineSteel-projektin tapaustutkimuskohteissa testattiin kulutusta kestävien terästen ja ruostumattoman teräksen käytön soveltuvuutta hihnakuljettimen syöttösuppilon sivukulutuslevyiksi erään metallimalmikaivoksen murskaamon risteysasemalla (kuva 17). Kohteessa erikokoiset, esimurskatut malmikappaleet tippuvat suppilosta pitkin hihnakuljettimelle. Sivukulutuspalat joutuvat siis partikkelisuihkusta johtuvalle eroosiokulumiselle alttiiksi. Testauskohteen ongelmana onkin kulutuslevyjen nopea kuluminen, jolloin levyjen vaihtovälit muodostuvat lyhyiksi. Tutkimuksessa kohteeseen asennettiin eri materiaaleja, joiden kulumista kyseisessä kohteessa tutkittiin. /40/



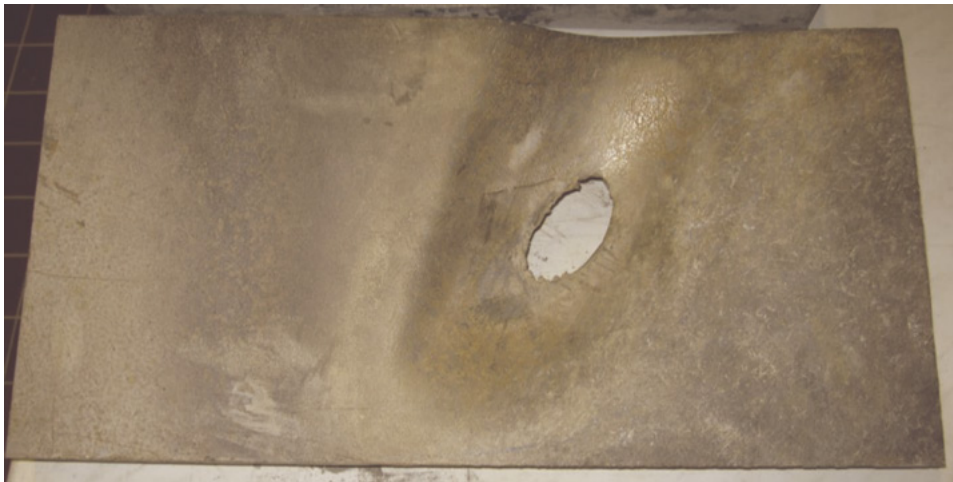
Kuva 17. Testauskohteet syöttösuppilossa /40/

Kohteessa testattavat materiaalit olivat Ruukki Metals Oy:n toimittama Raex 500-kulutusteräs sekä Outokumpu Stainless Oy:n toimittama EN 1.4301 austeniittinen ruostumaton teräs, joka on perinteinen 18 % kromia ja 8 % nikkeliä sisältävä teräs. Näiden mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 21, josta havaitaan, että testatun ruostumattoman teräksen lujuus on huomattavasti kulutusterästä alhaisempi, kun taas sitkeys on yli 7-kertainen kulutusteräkseen verrattuna. Alhaisesta lujuudesta johtuen ruostumattoman teräksen kovuus on myös huomattavasti kulutusterästä alhaisempi.

Taulukko 21. Testattujen materiaalien mekaaniset ominaisuudet /13,41,42/

Teräs	Myötölujuus R _{p0.2} [MPa]	Murtolujuus R _m [MPa]	Murtovenymä [%]	Kovuus
RAEX 500	1250	1600	8	450-540 HBW
EN 1.4301	270	572	60	81 HRB (n. 152 HBW)

40 mm paksuiset testilevyt asennettiin kohteeseen M20x35 tappien avulla, jotka hitsattiin levyihin kaaritappihitsaamalla. Levyt olivat paikoillaan 19.12.2012–7.5.2013 välisen ajan eli lähes 5 kk (20 viikkoa). /40/ Käytöstä poistetut kulutuslevyt on esitetty kuvissa 18 ja 19, joista silmämääräisesti voi havaita Raex 500-levyn kuluneen ruostumatonta EN 1.4301-levyä vähemmän.

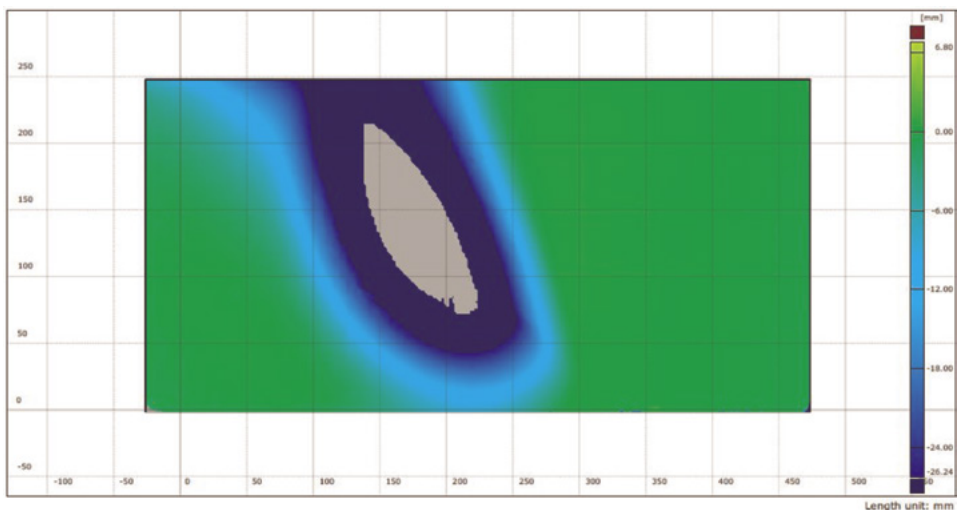


Kuva 18. Käytöstä poistettu Raex 500-levy /40/

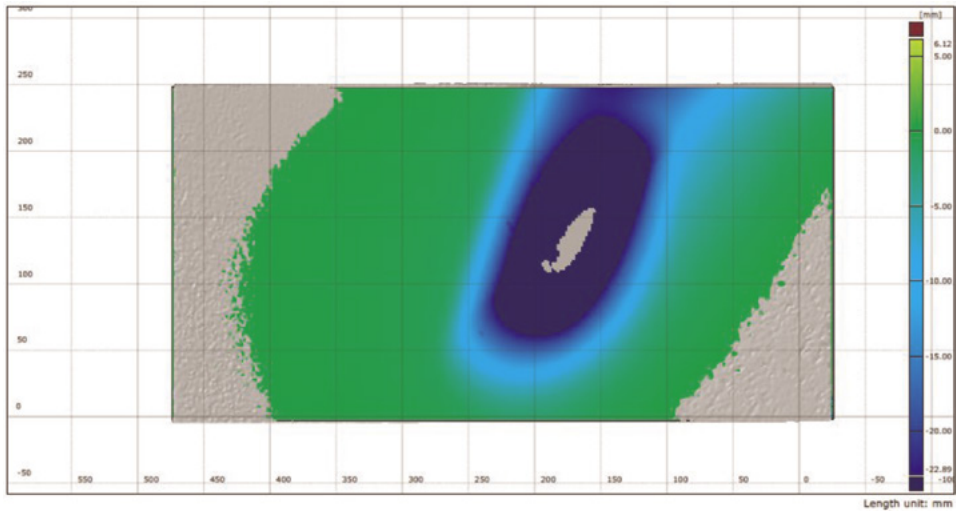


Kuva 19. Käytöstä poistettu EN 1.4301-levy /40/

Kuluneet levyt kuvattiin ATOS 3D-skannerilla, jolla dokumentoitiin levyjen kulumisprofiilit. Kulumisprofiilit on esitetty kuvissa 20 ja 21. Kuvista havaitaan selkeästi mihin kohtaan levyä murske osuu tullessaan hihnakuuljettimelta. EN 1.4301 -levy on selkeästi kulunut Raex 500 -levyä enemmän ja laajemmalta alueelta. Täysin puhki kulunut alue on myös huomattavasti suurempi EN 1.4301 -levvyssä. Voimakkaimmin kuluneista kohdista laskettuna Raex-levyn paksuus on pienentynyt 57 % ja EN 1.4301 -levyn 66 % alkuperäisestä 40 mm paksuudesta. Eroavaisuus on siis 13 % luokkaa kulutusteräksen hyväksi, joka mukaillee kuvassa 13 esitettyjen kulutustestien tuloksia. Painossa mitattuna Raex 500 oli kulunut 5,35 kg (13,8 %) ja EN 1.4301 -levy 9,3 kg (23,3 %).



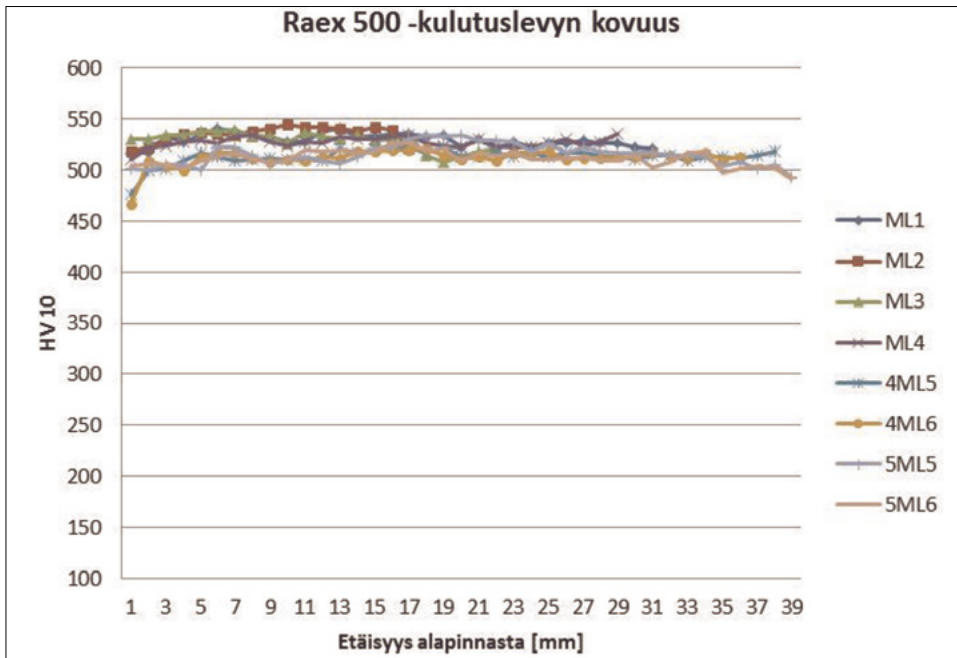
Kuva 20. EN 1.4301 -kulumisprofiili /40/



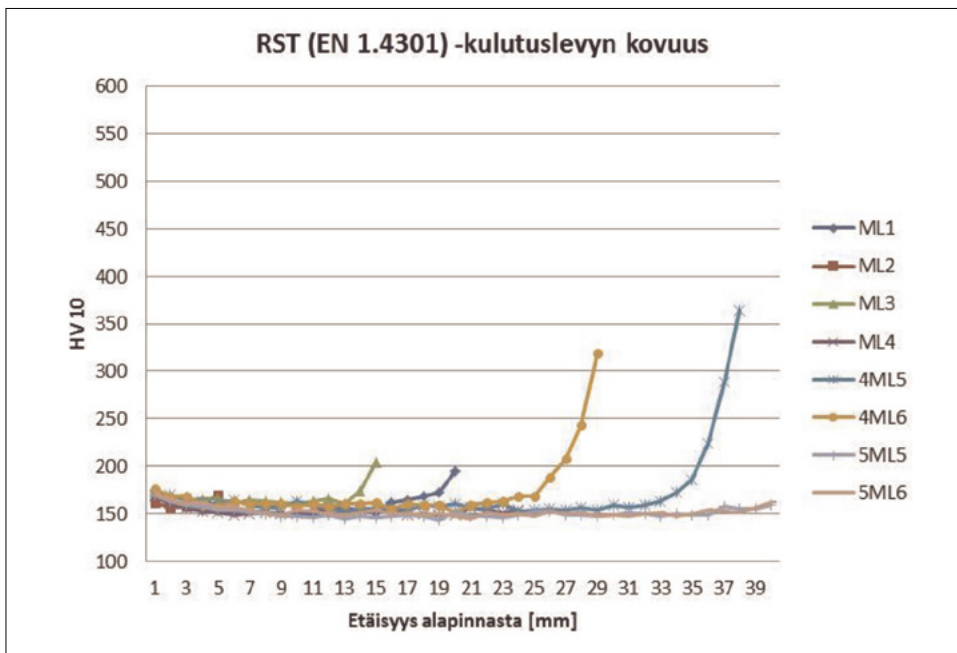
Kuva 21. Raex 500 -kulumisprofiili /40/

Lähtökohtaisesti EN 1.4301 -ruostumaton teräs on 3 kertaa pehmeämpää kuin Raex 500- kulutusteräs, joten sen suurempi kuluminen testauksen aikana oli odotettavissa. Kuvassa 22 on esitetty Raex 500 -teräksen kovuuden vaihtelu eri mittapaikoista mitattuna. Kuvan perusteella voidaan todeta, ettei kulutus ole aiheuttanut Raex 500 -teräksen kovuuteen muutoksia, vaan kovuudet vaihtelevat 467–545 HV₁₀ välillä keskiarvon ollessa 520 HV₁₀, joka on ko. teräksen nimelliskovuuden rajoissa. /40/

Kuvassa 23 on vastaavasti esitetty EN 1.4301 -ruostumattoman teräksen kovuuden vaihtelu eri mittapaikoista mitattuna. Siitä havaitaan, että paikoitellen materiaalin kulutuspinna on paikoitellen selkeästi muokkauslujittunut jopa 1-4 mm syvyydelle asti. Kovuudet vaihtelivat 143–364 HV₁₀ välillä, keskiarvon ollessa 160 HV₁₀. /40/



Kuva 22. Raex 500 kovuuden vaihtelu /40/



Kuva 23. EN 1.4301 kovuuden vaihtelu /40/

6 Case: kauhakuormaajan huulilevyn kulumisprofiili

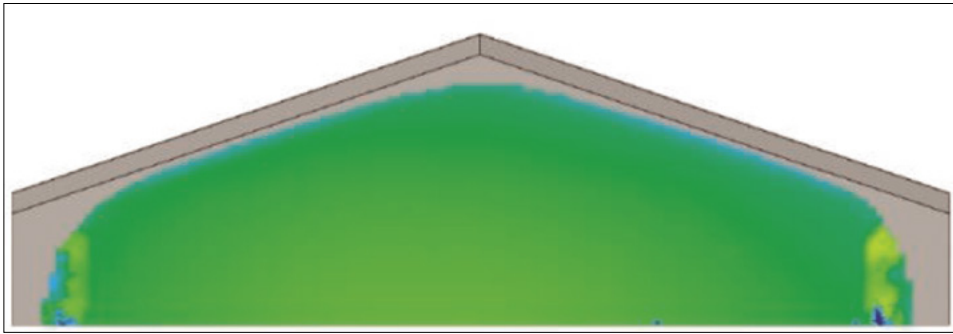
Eräässä MineSteel-projektin tapaustutkimuskohteessa tutkittiin kauhakuormaajan huulilevyn kulumisprofiilia. Tutkimuskohteena oli maanalaisessa kaivoksessa ope-roiva pyöräkuormaaja (kuva 24), jolla lastataan louheksiä (kromialmia, graniit-tia ja muodostelmakiveä eli raakkua). Tutkimuskohteen ongelmana on huulilevyn voimakas kuluminen sen ylä- ja alapuolelta käytön aikana. /43/

Kohteessa testattiin 60 mm paksua huulilevyä, jonka Ruukki oli valmistanut Raex 500 - kulutusteräksestä. Teräksen mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 21. Huulilevy oli käytössä 928 h, jonka jälkeen se poistettiin kulumisprofiilitutkimuksia varten. Painohävikki testausjakson jälkeen oli noin 335 kg (27,1 %). /43/

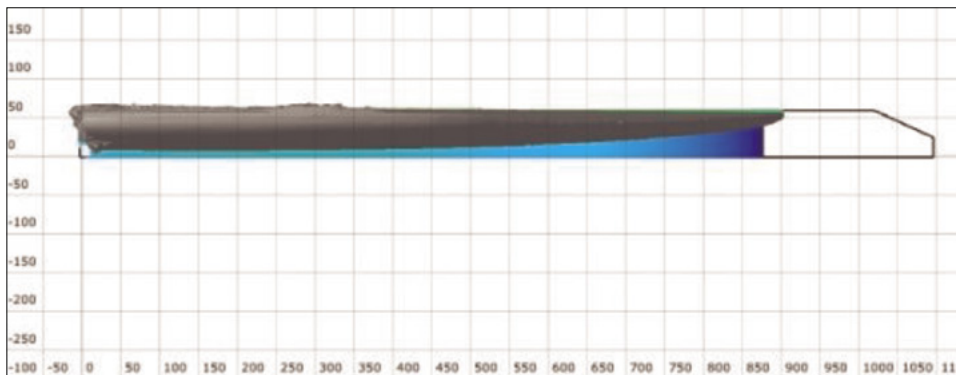
Kulunut huulilevy kuvattiin ATOS 3D-skannerilla, jolla dokumentoitiin levyn kulumisprofiili. Kuvissa 25 ja 26 kulunut levy on sovitettu CAD-malliin. Sovitus yksi yhteen osoittautui hankalaksi, sillä levy oli kulunut huomattavan paljon ylä- ja alapuoleltaan sekä pyöristynyt useasta kohdasta. /43/



Kuva 24. Tutkimuskohde /43/

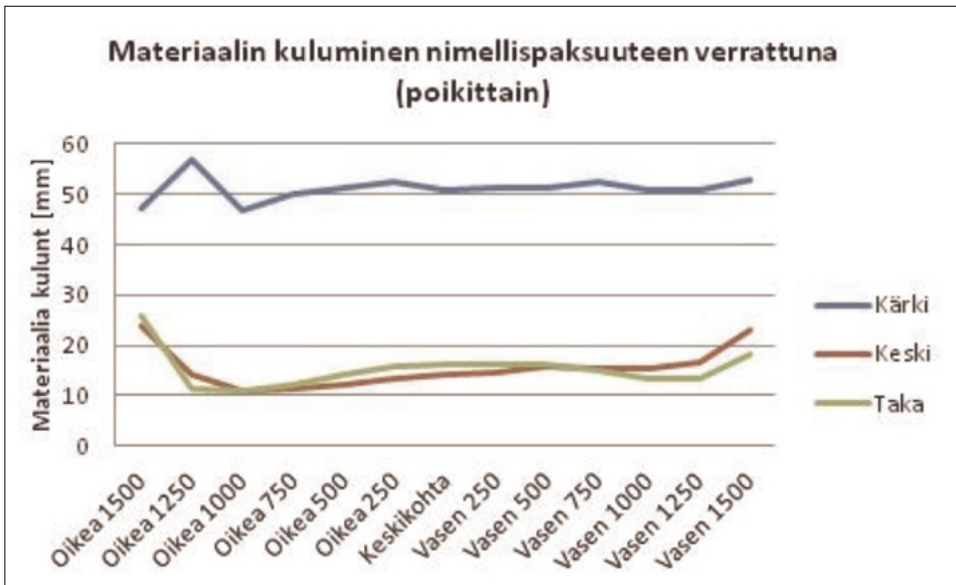


Kuva 25. Kulunut huulilevy yläpuolelta sovitettuna CAD-malliin /43/

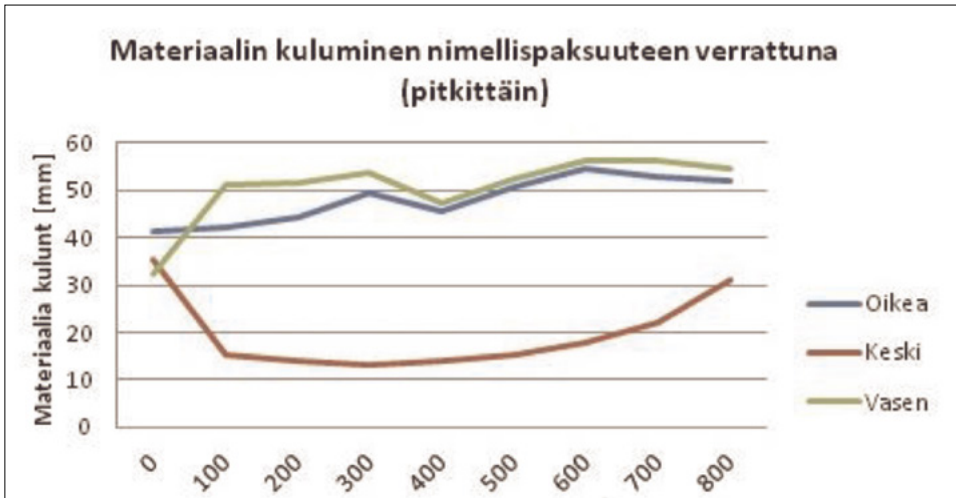


Kuva 26. Kuluneen huulilevyn poikkileikkaus sovitettuna CAD-malliin. /43/

Kulumisprofiilin selvittämiseksi huulilevy jaettiin poikittain ja pitkittäin osioihin, joista otettujen mittapisteiden perusteella selvitettiin miten paljon materiaalia oli kulunut verrattuna levyn nimellispaksuuteen. Poikittaiset osiot (13 kpl) sijoitettiin 250 mm välein kappaleen keskilinjalta ja pitkittäiset osiot (9 kpl) 100 mm välein nollassa ollessa polttoleikatussa takareunassa. Jokaisesta osiosta mitattiin kuusi mittapistettä, joiden perusteella lasketut materiaalihäviöt on esitetty kuvissa 27 ja 28. /43/



Kuva 27. Materiaalin kuluminen poikittaisosioista mitattuna /43/



Kuva 28. Materiaalin kuluminen pitkittäisosioista mitattuna /43/

Kuvista 25–28 havaitaan, että kuluminen on ollut voimakkainta huulilevyn kärjessä ja molemmilla sivuilla. Poikittain mitattujen mittapisteiden perusteella levyn kärjessä jäljellä olevan materiaalin paksuus vaihteli 3,25–13,23 mm välillä, keskellä 36,03–48,88 mm välillä ja takaosassa 34,19–49,04 mm välillä. Pitkittäin mitattujen mittapisteiden perusteella jäljellä olevan materiaalin paksuudet vaihtelivat puolestaan 5,32–18,76 mm välillä oikealla, 29,13–46,86 mm välillä levyn keskellä ja 3,88–27,6 mm välillä vasemmalla. /43/

Huulilevyn kulumisprofiilin lisäksi tutkimuksen aikana saatiin tietoa myös kulutusterästen hitsattavuudesta, sillä huulilevy kiinnitetään kauhaan hitsaamalla. Kovien kulutusterästen hitsausohjeisiin ja niiden perille vientiin myös asentajatasolle kannattaa panostaa, sillä monet hitsaajat perustavat eri materiaalien hitsauksen kokemukseen. Uudet ultralujat ja kovat kulutusteräokset ovat kuitenkin erilaisia hitsata kuin perinteinen S355-rakenneteräs, jolloin hitsausikkuna onnistuneen hitsauksen kannalta on pienempi. /43/

Lähteet

- /1/ Kauppila P., Räisänen M.L. & Myllyoja S. (toim.) Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristö 29/2011. Suomen ympäristökeskus, 2011.
- /2/ Kuluminen ja materiaalit -kulutusosaopas. Metso Mining and Construction Technology, 2011.
- /3/ Hakapää A. & Lappalainen P. (toim.) Kaivos- ja louhintatekniikka. Kaivannais-teollisuusyhdistys ry ja Opetushallitus, 2008.
- /4/ Parikka L. & Lehtonen J. Kulumismekanismit ja niiden merkitys vierintälaake-reiden eliniälle. Raportti BVAL73-001074. VTT Valmistustekniikka, Espoo, 2000.
- /5/ Kivioja S., Kivivuori S. & Salonen P. Tribologia - kitka, kuluminen ja voitelu.2. painos. Otatiето, 1998.
- /6/ Abrasiivinen kuluminen. SubsTech-verkkosivusto. http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/detail.php?id=mechanisms_of_wear&cache=cac he&media=abrasive_wear.png&DokuWiki=cbe188a290972436070bd2225413f7 ad
- /7/ Keltamäki K. Kulumisalttiiden kohteiden eri pinnoitusmenetelmiä. Kemi-Tor-nion ammattikorkeakoulu, julkaisusarja B, 2013.
- /8/ Adheesiivinen kuluminen. SubsTech-verkkosivusto. http://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/detail.php?id=mechanisms_of_wear&cache=cac he&media=adhesive_wear.png&DokuWiki=odcf3370ae69621c25184db67 od17440
- /9/ Koivisto K., Laitinen E., Niinimäki M., Tiainen T., Tiilikka P. & Tuomikoski J. Konetekniikan materiaalioppi.12. painos. Edita, 2008.
- /10/ Mikkonen P., Ruukki Metals Oy. Raex - kulutuksen kestävät teräkset kaivoksis-sa. Esitys Kaivostoiminnan materiaalit ja mahdollisuudet -seminaarissa. Kemi, 7.5.2013.
- /11/ Rautaruukki Oyj. Optim QC-verkkosivusto. <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Rakenneterakset/Optim-QC>
- /12/ Rautaruukki Oyj. Ramor-verkkosivusto. <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Ramor-suojasteras/Ramor-karkaistu-terassuojaukseen>

- /13/ Rautaruukki Oyj. Raex-verkkosivusto. <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Kulutusterakset/Raex-kulutusteras>
- /14/ Rautaruukki Oyj. Ruukin kulutuksen kestävä Raex - voittamaton teräs -esite. PDF- tiedosto saatavilla: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Kuumavalssatut%20terakset%20esitteet/Ruukki-Raex-referenssit-esite.pdf>
- /15/ SSAB. Hardox-verkkosivusto. <http://www.hardox.com/en/About-Hardox/Tailor-Made/>
- /16/ Rautaruukki Oyj. Lehdistö tiedote. 27.5.2013. <http://www.ruukki.fi/Uutiset-ja-tapahtumat/Uutisarkisto/2013/Ruukki-Raex-kulutusterasten-valikoima-on-laajentunut---nyt-saatavana-jopa-80-mm-paksuisia-levyja-kaivosteollisuuden-tarpeisiin>
- /17/ Rautaruukki Oyj. Raex-kulutusterästen hitsaus ja terminen leikkaus -ohjelehti. PDF- tiedosto saatavilla: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Kuumavalssatut%20-%20okasittelyohjeet/Ruukki-Raex-kulutusterasten-hitsaus-ja-terminen-leikkaus-06-2013.pdf>
- /18/ Rautaruukki Oyj. Kuumavalssatut teräslevyt- ja kelat. Lastuaminen -ohjelehti. PDF- tiedosto saatavilla: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Kuumavalssatut%20-%20okasittelyohjeet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4kset-Lastuaminen.pdf>
- /19/ Rautaruukki Oyj. Särmäys, Raex-kulutusteräkset, ultralujat Optim QC-teräkset - ohjelehti. PDF-tiedosto saatavilla: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Kuumavalssatut%20-%20okasittelyohjeet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4kset-S%C3%A4rm%C3%A4ysohje.pdf>
- /20/ Subramanyam D.K. Austenitic manganese steel. Metals Handbook vol 1- Properties and selection: stainless steels, tool materials and special purpose. 10th edition. ASM International, 1995
- /21/ Haakonsen F. Optimizing of Stromhard austenitic manganese steel. Doctoral thesis. Norwegian University of Science and Technology, 2009
- /22/ Leukamurskain. Metso Oyj. http://www.metso.com/miningandconstruction/mm_crush.nsf/WebWID/WTB-111004-2256F-054A1?OpenDocument&mid=6BoDD94392D28081C225791F00320869
- /23/ Rautaruukki Oyj. Teräksen murtolujuuden ja kovuuden likimääräinen vastavuus. <http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Layer-pages/Fyysikaaliset-ominaisuudet-seka-murtolujuus-vs-kovuus>
- /24/ SSAB. Weldox 1300 -verkkosivusto. <http://www.ssab.com/en/Brands/Weldox/Products/Weldox-1300/>
- /25/ Lämsä J. & Kiuru H. Ultralujat rakenne- ja kulutusteräkset - tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle. Raahen Seudun Teknologikeskus Oy & Oulun Yliopisto, 2012.
- /26/ Rautaruukki Oyj. Ruukin erikoisluja Optim: teräs vaativiin tarpeisiin -referenssiesite. PDF-tiedosto saatavilla: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/>

- Terastuotteet/Kuumavalssatut%2oterakset%2oe sitteet/Ruukki-Optim-referenssejä.pdf
- /27/ SSAB. Armox - the steel you want between you and risk -site. PDF-tiedosto saatavilla: http://www.ssab.com/Global/ARMOX/Brochures/en/700_Armox%20The%20steel%20you%20want%20between%20you%20and%20risk.pdf
- /28/ SSAB. Armox 600T-verkkosivusto. <http://www.ssab.com/en/Brands/Armox/Products/Armox-600T/>
- /29/ Säynäjäkangas J., Outokumpu Oyj. Kaivostoiminnan materiaalit ja mahdollisuudet. Esitys Kaivostoiminnan materiaalit ja mahdollisuudet -seminaarissa. Kemi, 8.5.2013
- /30/ Outokumpu Oyj. Cr-Ni-Mo stainless steels -tuotelehti. PDF-tiedosto saatavilla: http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Standard_Cr-Ni- Mo_ Stainless_ Steels_ Datasheet.pdf
- /31/ Outokumpu Oyj. High performance stainless steel -tuotelehti. PDF-tiedosto saatavilla: <http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Outokumpu-high-performance-austenitic-stainless-steel-data-sheet.pdf>
- /32/ Outokumpu Oyj. Ferritic stainless steel 1.4300 1.4512, 1.4016, 1.4510, 1.4509, 1.4521 -tuotelehti. PDF-tiedosto saatavilla: http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Ferritic_Stainless_Steel_1.4300_1.4512_1.4016_1.4510_1.4509_1.4521_Datasheet.pdf
- /33/ Outokumpu Oyj. Material for Winning Ideas - Outokumpu Duplex Stainless Steel - esite. PDF-tiedosto saatavilla: http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Duplex_Stainless_Brochure.pdf
- /34/ Outokumpu Oyj. Duplex stainless steel -tuotelehti. PDF-tiedosto saatavilla: <http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Outokumpu-Duplex-Stainless-Steel-Data-Sheet.pdf>
- /35/ Outokumpu Oyj. High Temperature Stainless Steels - MA grades -site. PDF-tiedosto saatavilla: <http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Austenitic-High-Temperature-153MA-253MA-stainless-brochure.pdf>
- /36/ Outokumpu Oyj. High Temperature Ferritic Grades -tuotelehti. PDF-tiedosto saatavilla: http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/High_temperature_ferritic_grades_Datasheet.pdf
- /37/ Outokumpu Oyj. Heat resistant grades -verkkosivusto. <http://www.outokumpu.com/en/stainless-steel/grades/heat-resistant/Pages/default.aspx>
- /38/ Outokumpu Oyj. Austenitic high temperature grades -tuotelehti. PDF-tiedosto saatavilla: http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Austenitic_High_Temperature_Grades_Datasheet.pdf
- /39/ Ojala N., Valtonen K., Siitonen P. & Kuokkala V-T. The effect of test parameters on large particle slurry erosion testing. Proceedings of ITS 2013, Luleå, Sweden.
- /40/ Kalliosalo H., Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. Materiaalia MineSteel-projektin tapaustutkimuksesta. Saatavilla Kemi-Tornion AMK:n sisäisestä verkosta.
- /41/ Outokumpu Oyj. Materiaalitodistus toimitetulle EN 1.4301-teräslevylle. Saatavilla Kemi-Tornion AMK:n verkosta.

- /42/ Struers. Kovuudenmuuntotaulukko. http://www.struers.com/default.asp?top_id=5&main_id=25&doc_id=344
- /43/ Ylitolva M. & Keltamäki K. Ruukki huulilevyn kulumisprofiili tulokset - tekninen raportti nro 5. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2013

Materiaalit joutuvat kaivoksissa vaativiin olosuhteisiin. Raskas kuormitus ja vallitsevat ympäristöolosuhteet altistavat ne syöpymiselle ja mekaaniselle kulumiselle. Valitsemalla eri käyttökohteisiin sopivimmat materiaalit, voidaan vaikuttaa kohteiden käyttöikään ja aikaansaada kustannussäästöjä.

Selvityksessä esitellään eräitä kaivosolosuhteisiin soveltuvia hiiliteräksiä ja ruostumattomia teräksiä. Hiiliterästen osalta on otettu mukaan kulutusta kestävä teräksinen ja austeniittiset mangaaniteräkset sekä ultralujia rakenneteräksiä ja suojausteräksiä. Ruostumattomista teräksistä esitellään haponkestäviä austeniittisiä teräksiä, duplex-teräksiä, kuumalujia austeniittisiä ja ferriittisiä teräksiä sekä ferriittinen rakenneteräs.

Kuiviin olosuhteisiin, joissa teräkseen kohdistuu mekaanista kulumista, käytetään tyypillisesti materiaalina soveltuvaa hiiliterästä ja kohteissa, joissa kulumiseen liittyy tribokemiallinen kuluminen ja korroosio, materiaaliksi valitaan ruostumaton teräs. Selvityksen lopussa on esitelty MineSteel-projektin case-tapauksia, joissa on yhteistyössä eri yritysten kanssa testattu kulutusta kestävien ja ruostumattomien terästen käytettävyyttä erilaisissa kohteissa. Eräissä case-tapauksissa havaittiin, että ruostumattomien terästen voi suoriutua mekaanisen kulutuksen alaisessa kohteessa varsin hyvin.

Tämä selvitys on tehty osana Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun MineSteel-projektia, jonka kestoaika on 1.1.2012–31.6.2014. Projektia ovat olleet rahoittamassa Euroopan aluekehitysrahasto EAKR sekä Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus TEKES.

Tekes



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

LAPIN AMK

Lapland University of Applied Sciences

www.lapinamk.fi

ISBN 978-952-316-000-2