



## **Terminen ruiskutus – menetelmät, pinnoitteet ja teolliset sovellukset**

Tommi Varis ja Petri Vuoristo, TTY

### *1. Yleistä*

Termisellä ruiskutuksella (SFS-EN 657) tarkoitetaan sellaisia pinnoitusprosesseja, joissa pinnoitteen valmistamiseen käytettävä jauheena, lankana tai puikkona oleva pinnoiteaine kuumennetaan kokonaan tai osittain sulaan tilaan ruiskun sisä- tai ulkopuolella ja ruikutuspartikkelit kiihdytetään nopean kaasuvirtauksen avulla esikäsitellylle pinnalle.

Termisesti ruiskutettu pinnoite muodostuu sulapisaroiden törmätessä pinnoitettavan materiaalin pintaan, jossa ne litistyvät ja jäähtyvät suurella nopeudella. Lopullinen pinnoitekerros muodostuu useista päällekkäisistä pyyhkäisyistä. Pinnoitteen rakenteeseen vaikuttaa merkittävästi em. sulapisaroiden termien (lämpötila) ja kineettinen energia (nopeus). Pinnoitepaksuudet ovat tyypillisesti luokkaa 0,1 - 1 mm.

Kaikkia materiaaleja, jotka kuumennettaessa muodostavat stabiilin sulatilan (poikkeuksena kylmäruiskutus) ja jotka eivät sulatettaessa hajoa, voidaan ruiskuttaa termisesti. Termistä ruiskutusta voidaankin pitää kaikista pinnoitusteknologioista kaikista monipuolisimpana teollisena pinnoitusmenetelmänä hyvin laajan pinnoitemateriaalivalikoiman ansiosta. Termisen ruiskutuksen voimakkaaseen suosioon ovat vaikuttaneet mm. seuraavat tekijät:

- käytettävissä on hyvin laaja valikoima erilaisia pinnoitemateriaaleja sisältäen mm. useita puhtaita metalleja, metalliseoksia, kovametalleja, keraameja, muoveja ja monia näiden erilaisia yhdistelmiä
- pinnoitteiden ominaisuudet, kuten kulumiskestävyys, kovuus ja tartuntalujuus ovat erinomaisia moniin teollisiin sovelluksiin
- pinnoitteen valmistusnopeus suuri; sopii myös laajoille pinnoille
- lämmöntuonti työkappaleeseen on yleensä hyvin alhainen (poikkeuksena ns. sulautuspinnoitus)
- pinnoituksen kustannukset ovat riittävän alhaiset useimpien sovellusten kannalta

Monipuolisuutensa ansiosta termien ruiskutus on levinnyt hyvin monelle teollisuuden alueelle. Kuvassa 1 on esimerkki paperikoneen telan pinnoituksesta HVOF-menetelmällä. Tyypillisimpiä termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden käyttötarkoituksia ovat:

- kuluneiden tai väärin koneistettujen koneenosien kunnostus
- kulumiskestävyuden parantaminen (abraasio, eroosio, adheesiokuluminen jne.)
- osien painon pienentäminen (esim. alumiininen perusaine ja kulutusta kestävä pinnoite)
- korroosionesto (ilmastollinen ja märkäkorroosio)
- pintaominaisuuksien muuttaminen
- korkeissa lämpötiloissa tapahtuvan hapettumisen ja korroosion estäminen
- lämmöneristys korkeissa lämpötiloissa

- lämmönjohtokyvyn parantaminen
- sähkönjohtokyvyn parantaminen
- sähköneristys
- pinnan kitkakertoimen muuttaminen (pienentäminen tai nostaminen)
- välyksen säätö kuluvilla pinnoitteilla
- bioinerti tai bioaktiivinen pinnoite
- koristepinnoitus.



*Kuva 1. Paperikoneen keskitelan HVOF-ruiskutusta korroosiokestäväällä metalliseoksella.  
Lähde: MetsoPaper Inc.*

## **2. Termisen ruiskutuksen valmistusmenetelmät**

Terminen ruiskutus pitää sisällään useita erityyppisiä prosesseja, jotka eroavat toisistaan lämmöntuontitavan ja/tai ruiskutuslisäaineen kiihdytystavan mukaan. Ruiskutusmenetelmästä riippuen lämmönlähteenä sulatukseen voidaan käyttää polttoliekestä (Esim. liekkiruiskutus, High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) -ruiskutus, High Velocity Air Fuel (HVOF) -ruiskutus) tai sähköpurkauksesta (esim. kaariruiskutus, plasmaruiskutus) saatavaa energiaa. Sulapisaraille saatava liikenopeus saadaan polttoliekin tai plasmaliekin kaasunvirtauksesta, tai erillisen paineilmapuhalluksen avulla (kaariruiskutus). Uusimmassa termisen ruiskutuksen menetelmässä, kylmäruiskutuksessa (cold spray), ei materiaalia sulateta, vaan pinnoitteen muodostukseen käytetään pelkästään ruiskutettavan jauhepartikkelin kineettistä energiaa.

Terminen ruiskutuspinnoitus voidaan toisaalta jaotella kahteen selkeään alaryhmään: Kylmäpinnoitukseen ja kuumapinnoitukseen (sulautuspinnoitus). Kylmäpinnoituksessa eli ns. tavanomaisessa termisessä ruiskutuksessa pinnoitettavan työkappaleen lämpötila pyritään pitämään selvästi lämpötilan 200 °C alapuolella; menetelmästä riippuen pinnoitettavan kappaleen pinnan lämpötila on tavallisesti välillä 50-150 °C. Alhaisen pinnoituslämpötilan ansiosta perusaineessa ei tapahdu rakenne- tai mittamuutoksia. Alhainen pinnoituslämpötila sallii myös joissain tapauksissa pinnoituksen myös monien lämpöherkkien materiaalien päälle (puu, muovi, komposiitit). Sen sijaan sulautuspinnoituksessa ruiskutusta seuraa aina pinnoitteen sulautuskäsittely eli sintraus noin 1000 - 1100 °C lämpötilassa, mikä samalla tiivistää pinnoiterakenteen.

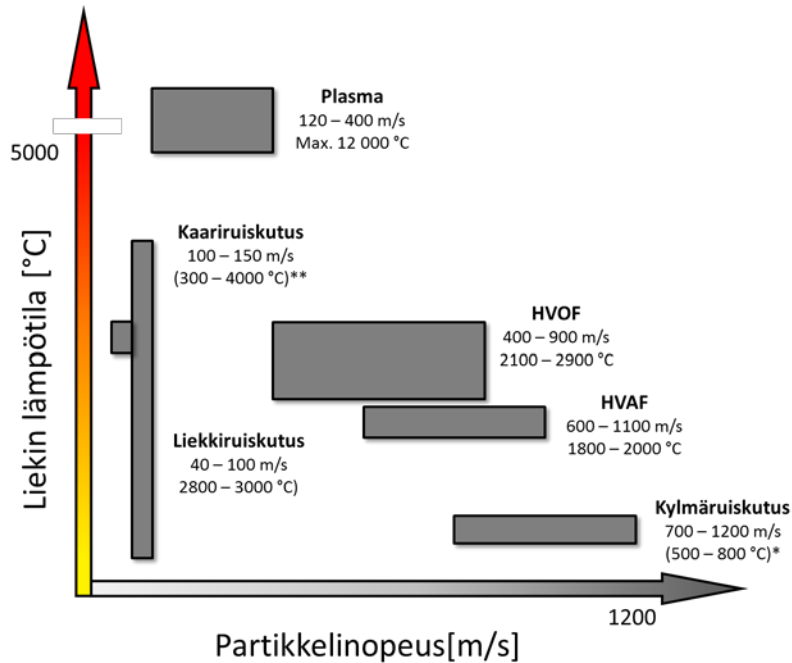
Termisessä ruikutuksessa sekä menetelmien että menetelmän sisällä ruiskutuslaitteistojen valikoima on suuri. On huomioitava, että pinnoitteiden ominaisuudet ovat aina kombinaatio materiaalista ja valmistusprosessista. Samaa materiaalia voidaan valmistaa useilla eri menetelmillä, mutta sen ominaisuudet riippuvat käytetystä prosessista. Tämän vuoksi pinnoitteita ei voida valita pelkästään materiaaliperusteisesti vaan suunnittelussa on huomioitava pinnoiterakenteen erityispiirteiden tuomat muutokset pinnoitemateriaaliin. Pinnoiterakenteiden erityispiirteet kuten tiiveys ja happipitoisuus, riippuvat suuresti käytetystä pinnoitusprosessista.

### 3. Menetelmien vertailu

Eri menetelmät eivät useinkaan kilpaile toistensa kanssa vaan täydentävät toisiaan, sillä jokaisella menetelmällä on omat erikoispiirteensä. Eri menetelmät eroavat toisistaan toimintaperiaatteen lisäksi investointi- ja käyttökustannuksiltaan sekä saavutettavilta pinnoiteominaisuuksiltaan. Kullakin menetelmällä on omat käyttöalueensa, joihin vaikuttavat pinnoitteen valmistuksesta muodostuvat hinta, valmistettavissa oleva pinnoitemateriaalivalikoima, pinnoiteominaisuudet sekä menetelmän saatavuus. Taulukkoon 1 on koottu termisten ruiskutusmenetelmien tärkeimmät ominaispiirteet. Termisesti ruiskutetuille pinnoitteille on tyypillistä tietty jäännöshuokospitoisuus, jota oleellisesti pienentää suuri sulapisaroiden partikkelinopeus. Metalliset pinnoitteet saattavat lisäksi sisältää mm. osittaista hapettumista, koska ruiskutus yleensä tapahtuu vapaassa ilma-atmosfäärissä. Käytetyllä ruiskutusmenetelmällä on tähänkin oleellinen vaikutuksensa.

*Taulukko 1. Tärkeimpien termisten ruiskutusmenetelmien vertailu.*

	Lämpötila [°C]	Partikkeli- nopeus [m/s]	Tartunta- lujuus [MPa]	Oksidi- määrä [%]	Huokoi- suus [%]	Ruiskutus- nopeus [kg/h]	Suht. hintaa	Tyypillinen pinnoite- paksuus [mm]
Liekki	3000	40	8	10-15	10-15	2-6	1	0,1-15
Kaari	4000	100	12	10-20	10	10-25	2	0,1-50
HVOF	3000	800	>70	1-5	1-2	2-8	3	0,1-2
HVAF	2000	900	>70	1-2	<0,5	6-12	3	0,05-2
Plasma	12000	200 - 400	10...>70	1-3	1-5	2-10	4	0,1-1
Tyhjiöplasma	12000	400 - 600	>70	0	<0,5	2-6	5	0,1-1
Kylmäruisku	<500	550 - 1000	20...>70	0	<0,5	6-8	3	0,1-2



Kuva 2. Termisen ruiskutuksen prosessien tuottama liekin lämpötila ja ruiskutuspartikkelinopeus. (\* kaasuvirran lämpötila, \*\*langan sulamislämpötila)

Termisen ruiskutuksen prosesseja vertaillaan usein niiden tuottaman liekin lämpötilan/ sulatustehon ja partikkelinopeuden perusteella. Kuvassa 2 on vertailtu eri prosesseja T-v -ikkunassa. Peruseriaatteena voidaan todeta, että mitä suurempi partikkelinopeus sitä suurempi on pinnoitteen tiiveys. Liekin lämpötila saattaa kuitenkin rajoittaa materiaaleja, joita ko. menetelmällä voidaan ruiskuttaa.

Yhteenvetona voidaan eri ruiskutusmenetelmistä mainita mm. seuraavaa:

- jauheruiskutuslaitteet ovat halpoja, ne on helppo siirtää ja lisäainevalikoima on laaja
- lankaruiskutuslaitteisto on yksinkertaisempi ja halvempi kuin kaariruiskutuslaitteisto
- kaariruiskutus on lankaruiskutusta tehokkaampi menetelmä
- kaariruiskutetuissa pinnoitteissa tartuntalujuus on suurempi kuin lankaruiskutetuissa
- plasmaruiskutuksella saadaan tiiviitä, lujia ja hyvin kulutusta kestäviä pinnoitteita
- plasmaruiskutus soveltuu erityisesti keraamisten pinnoitteiden valmistukseen
- HVOF-ruiskutus soveltuu kovametalli- ja metalliseospinnoitteiden valmistukseen
- HVOF-pinnoitteet ovat tiiviitä ja käyttöominaisuuksiltaan erinomaisia (kulumis- ja korroosiokestävyys)
- tyhjiöplasmaruiskutus on kallis menetelmä ja sitä käytetään erikoissovelluksiin (turbiinisiipien suojapinnoitteet)



#### **4. Teolliset käyttösovellukset**

Termisesti ruiskutettuja pinnoitteita käytetään teollisesti hyvin monella sovellusalueella. Tärkeimmät termistä ruiskutuspinnoitusta hyödyntävät teollisuusalat ovat seuraavat:

- yleinen koneenrakennus
- energia- ja ydinvoimateollisuus
- lentokone- ja avaruustekniikka
- terästeollisuus
- puunjalostus- ja paperiteollisuus
- prosessi- ja kemianteollisuus
- petrokemian teollisuus
- moottorivalmistus
- autoteollisuus
- elektroniikkateollisuus
- laivanrakennus- ja off-shore –teollisuus
- paino- ja graafinen teollisuus
- rakennusteollisuus
- lasiteollisuus
- valumuottien valmistus

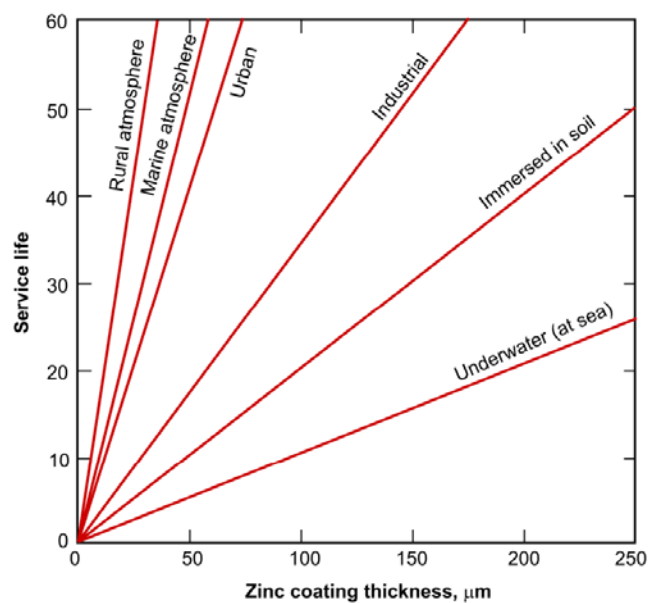
Ruiskutettujen pinnoitteiden tärkeimpiä käyttötarkoituksia esitetään seuraavissa kappaleissa.

##### **4.1. Korroosiosuojaus**

Korroosiosuojapinnoitteet voidaan jaotella kahteen osaan: suojaavat pinnoitteet (barrier coatings) ja uhrautuvat pinnoitteet (sacrificial coatings). Suojaavan pinnoitteen on pystyttävä muodostamaan suojaava kerros, joka suojaa alustaa reagoimasta ympäristön kanssa. Edellytyksenä pinnoitteen toimimiselle suojana on, että kerros pysyy ehjänä eikä päästä korroosiomediaa lävitseen. Tyypillisesti termisesti ruiskutetut pinnoitteet eivät ole täysin tiiviitä. Termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden rakenteessa on runsaasti vikoja ja lamellirajoja, jotka saattavat päästää nestettä lävitseen. Tämä johtaa nopeasti alustan korroosioon ja pinnoitteen irtoamiseen. Usein käytetäänkin esim. epoksipohjaisia tiivistäaineita, joilla pinnoitteista saadaan täysin nestetiiviitä. Tiivistäaine imeytetään juoksevassa tilassa pinnoitteen huokosiin, jonne se kovettuu. Näin voidaan lisätä merkittävästi ruiskutetun kulumiskestävän materiaalin käyttökelpoisuutta korroosioympäristössä. On myös huomattava, että uudet termisen ruiskutuksen prosessit (esim. HVAF) ovat kehittyneet paremmiksi ja saattavat tarjota mahdollisuuden valmistaa täysin nestetiiviitä pinnoitteita, jolloin tiivistystä ei tarvita.

Uhrautuvat pinnoitteet ovat sinkki (Zn) tai sinkkiseospinnoitteita kuten ZnAl ja ZnMg. Alumiini- ja sinkkilankoja käytetään pääasiassa teräsrakenteiden suojaamiseen ilmastolliselta korroosiolta. Niitä käytetään tyypillisesti teräsrakenteissa joko sellaisenaan tai maalausjärjestelmän osana. Pinnoitteet toimivat uhrautuvana, jotka syöpyvät ollessaan teräsalustaa epäjalompia.

Alumiinin tai magnesiumin seostuksella pyritään pienentämään korroosipotentiaali eroa ja näin ollen uhrautuvan pinnoitteen korroosionopeutta erityisesti vaikeissa ilmastollisissa korroosio-olosuhteissa. Esimerkiksi merivesiympäristössä, kloridipitoisessa kosteassa ympäristössä, sinkin syöpyminen on nopeampaa kuin sisämaassa. Tyypillisesti sisämaassa sinkkipinnoitteen syöpyminen nopeus on maksimissaan 1  $\mu\text{m}/\text{vuodessa}$  kun merivesiympäristössä korroosionopeus voi olla 2-3  $\mu\text{m}/\text{vuosi}$ . Kuvassa 3 on esitetty sinkkipinnoitteiden käyttöikä paksuuden funktiona erilaisissa altistusympäristöissä. Sinkkipinnoitteista löytyy suunnitteluohjeita ja standardeja (SFS EN-ISO 12944-2).



Kuva 3. Sinkkipinnoitteen käyttöikä (vuosia) erilaisissa altistusympäristöissä paksuuden funktiona.

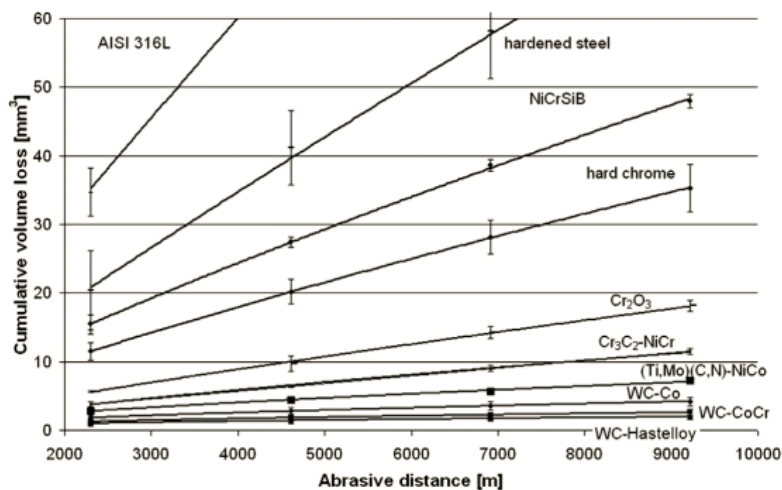
Lähde: <http://www.kuumasinkitys.fi/kesto.html>

Kastosinkityksessä kappale on sinkityksen valmistamiseksi vietävä sinkkipataan, jolloin käytettävissä olevan sinkityspadan koko asettaa rajoituksia kappalekoolle. Termisen ruiskutuksen etuna on, että kokorajoitusta sinkin valmistamiselle ei periaatteessa ole, jolloin komponentin suuri koko ei rajoita menetelmän käyttöä. Ruiskutus voidaan toteuttaa myös kohteeseen paikan päällä esim. silta, tuki tai kaiderakenteisiin. Sinkityksessä termisen ruiskutuksen etuna voidaan pitää myös sitä, että se ei, toisin kuin kastosinkitys, aiheuta kuumahaurausriskiä (säröilyriskiä) korkealujuusteräksille.

Yksi tyypillinen pinnoitteiden käyttöalue on korkealämpötilasovellukset, joissa halutaan suojata perusmateriaalia hapettumiselta, aggressiivisten kaasujen (esim. Cl ja S) ja suolasulien aiheuttamalta korroosiolta. Tällaiset kohteet löytyvät esim. energiakattiloista, joissa poltetaan jätteitä tai biomassaa. Mahdollisia suojapinnoitteita ovat Ni-, tai Fe-pohjaiset seokset, joissa on korkea Cr- tai Al-pitoisuus. Usein kattilasovelluksissa pinnoitteen on kestävä myös voimakasta korkealämpötila eroosiota.

#### 4.2. Kulumiskestävyys

Monien rakennemateriaalien kulumiskestävyyttä voidaan lisätä merkittävästi kovilla pinnoitteilla. Yleisimpiä pinnoitteista ovat kovametallit, jotka sisältävät kovaa kardia ja sitkeää metallista sideainetta. Tavallisia termisessä ruiskutuksessa käytettäviä kovametallikoostumuksia ovat esimerkiksi WC-12Co ja WC-17Co, joista jälkimmäinen on hieman sitkeämpää. WC-Co kovametallipinnoitteiden kovuudet ovat suhteellisen suuria 1200 - 1500 HV. Pelkän WC/Co-kovametallien korroosionkestävyys on melko vaatimaton, mutta kromiseostuksella (Cr) niille saadaan parempi korroosionkestävyys vaativiin sovelluksiin esimerkiksi prosessiteollisuuden laitteissa. WC-Co -tyyppisten kovametallien hapettumiskestävyys heikkenee voimakkaasti lämpötilan 450 °C yläpuolella. Toinen tyyppinen kulumista kestävien pinnoitteiden ryhmä on Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr -pinnoitteet, joiden kovuus on välillä 1000 – 1100 HV ja maksimikäyttölämpötilasuositus on 800 °C. Muita kulumiskestäviä materiaaleja ovat esim. keraamit ja sulautuspinnoitteet. Kulumiskestäviä materiaaleja ja niiden koostumuksia on esitetty Taulukossa 2 ja joidenkin ruiskutettujen materiaalien kulumiskestävyksiä Kuvassa 4.



Kuva 4. Joidenkin termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden kuiva-abraasiokulumiskestävyys kulumis-matkan funktiona. Lähde: Houdkova, S.; Zahalka, F.; Kasparova, M.; Berger, L. -M. Tribol. Lett. 2011, 43, 139–154.

*Taulukko 2. Termisen ruiskutuksen lisäaineita kulutuksen estoon.*

Pinnoitetyyppi	Lisäaine	Koostumusesimerkki	Pinnoitteen kovuus	Pinnoitepaksuus (mm)	Käyttökohteita
Kromiteräs	Jauhe	Fe+13%Cr+0,35%C	360...400 HB	1...25	telat, männänvarret, puhaltimen siivet
Ni-pohjaiset sulautuspinnoitteet	Jauhe	Ni+16%Cr+4%B+4%Si+0.3%C NiCrBSi+35%WC	30...62 HRC 62...70 HRC	0,5...3,5 0,5...3,5	kulutusosat, mm. holkkitiivisteet
Co-pohjaiset sulautuspinnoitteet	Jauhe	Co+26%Ni+18%Cr+6%Mo+3,5%Si+3,6%B+0,2%C	50 HRC	0,5...3,5	kulutusosat, tiivisteholkit
Molybdeeni ja Mo-pohjaiset seokset	Jauhe	Mo 99,5% 75%Mo/NiCrBSi-seos	300 HB 45 HRC	0,5...5 0,2...1,5	liukupinnat männänrenkaat
Kovametallit	Jauhe	WC-12%Co WC-10%Co-4%Cr WC-20%Cr-7%Ni Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -25%NiCr	800...1400 HV 800...1200 HV 800...1200 HV 600...1100 HV	0,1...0,5 0,1...0,5 0,1...0,5 0,1...0,7	abraasio-, eroosio- ja fretting-kestävyys, telat, pumput, venttiilit, jne.
Oksidikeraamit	Jauhe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +3...40%TiO <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> TiO <sub>2</sub> ZrO <sub>2</sub> +7%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	800...1200 HV 700...1200 HV 1000...1400 HV 600...800 HV 400...800 HV	0,1...0,5 0,1...0,5 0,1...0,5 0,1...0,5 0,2...2	sähk.eristys, kuluminen kulutuskesto, abraasio kulutuskesto, abraasio kulutuskesto lämmöneristys, eroosio
Kromiteräs	Lanka	Fe+13%Cr+0,35%C	360...400 HB	1...25	telat, vetoakselit, männänvarret, puhaltimen siivet
Haponkestävä teräs	Lanka	Fe+17%Cr+12%Ni+2,5%Mo	140...200 HB	1...3	telat, pumpun akselit, kulutusvuoraukset
Hiiliteräkset	Lanka	Fe+0,1...1.1%C	150...550 HB a)	0,1...3	korjaus, lievät kulutusolosuhteet, puhaltimen siivet
Nikkelipohjaiset seokset	Lanka	Ni+20%Al+20%Fe+4%Cr	300...350 HB	0,1...0,8	tapit (männät, telat), liukulaakeripinnat
Molybdeeni	Lanka	Mo 99,9%	37...60 HRC	0,05...1,2	kuivat liukupinnat, männänrenkaat, synkronirenkaat, kampiakselit, puristustyökalut





#### *4.3. Lämmön ja sähkön eristys*

Yksi suurimmista termisen ruiskutuksen sovellusalueista on lämmöneristyspinnoitteet (Thermal Barrier Coatings, TBC). Lentokoneen moottorin kaasuturbiinien lämmöneristepinnoitteina käytetään tyypillisesti plasmaruiskutettua zirkoniumdioksidipinnoitetta ( $ZrO_2-24\%MgO$  tai  $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ ). Näiden pinnoitteiden erinomaisuus perustuu itse materiaalin huonoon lämmönjohtokykyyn sekä huokoiseen rakenteeseen. TBC pinnoitteilla saadaan turbiiniin siivekkeiden lämpötila laskemaan parhaimmillaan useita satoja asteita, minkä vuoksi superseoksen virumiskestävyys paranee merkittävästi. Pinnoitteiden käyttö sähköneristepinnoitteina on myös kasvanut ja tulee vielä korostumaan keraamisten sähköneristepinnoitteiden tiiveyden parantuessa.