

TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

Sähkömagneettisen kentän ja pst-projektiilin vuorovaikutuksen mallinnus

Reijo Kouhia¹, Timo Saksala¹, Lauri Kettunen², Tuomas Kovanen²

Tampereen teknillinen yliopisto

¹Kone- ja tuotantotekniikan laitos, ²Sähkötekniikan laitos

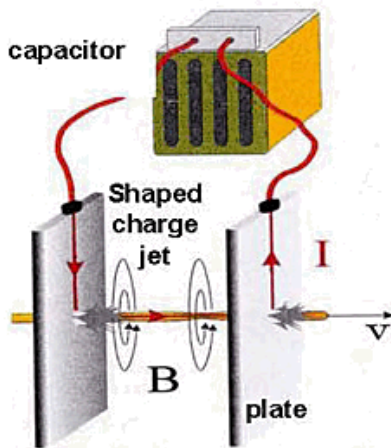
reijo.kouhia@tut.fi

Tiivistelmä

Tutkimushankkeessa tarkasteltiin teoreettisesti sähkömagneettisen kentän ja vaikutusta pst-projektiilin käyttäytymiseen. Erityisesti keskityttiin ontelopanosammuksen suihkun käyttäytymisen tutkimiseen. Häiriömenetelmällä johdettiin suihkun läpi kulkevan virranvoimakkuuden ja poikittaisen nopeuden välinen relaatio. Lisäksi tarkasteltiin sähkömagneettisen panssaroinnin vaatimuksia sähkötekniikan laitteiston osalta.

1. Johdanto

Ontelopanosammusten suuri läpäisykyky, joka teräksiselle yksikerrospanssarille on luokkaa 300-1200 mm, on johtanut reaktiivisten panssarointitekniikoiden kehittymiseen. Sähkömagneettinen (SM) panssarointi on eräs mahdollinen tulevaisuuden reaktiivinen panssarointitekniikka. SM-panssarointi toteutetaan kahden tai useamman sähköä johtavan panssarilevyn avulla, joiden välissä on tyhjä tila tai eristemateriaalia ja jolloin systeemi muodostaa suuritehoisen kondensaattorin. Projektiilin tunkeutuessa SM-panssariin se oikosulkee virtapiirin, tällöin panssariin varastoitunut sähkövaraus purkautuessaan särkee tunkeutuvan projektiilin, kuva 1.



Kuva 1. Sähkömagneettisen panssaroinnin periaate. Ontelolatauksen suihku (shaped charge jet) kytkee virtapiirin ja sähkömagneettiset voimavaikutukset muokkaavat ja mahdollisesti murtavat projektiilisuihkun. [Kuva Nyholm 1998]

Suojauksen teknisen toimivuuden kannalta panssaroinnin keskeisiä kysymyksiä ovat:

(i) Kuinka paljon energiaa panssarointiin tarvitaan? (ii) Minkälaisen sähkötekniikan laitteiston panssaroinnin vaatima energiamäärä edellyttää? (iii) Kuinka nopeasti energia saadaan purettua sähkökentästä, ja minkälaisia teknisiä järjestelyjä tämä vaatii? (iii) Onko panssarointi toimiva ensimmäisen osuman jälkeen ja jos niin ja kuinka nopeasti?

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimus on osin luonteeltaan teoreettis-laskennallinen ja alkoi kirjallisuustutkimuksella, jossa kartoitettiin aiheeseen liittyvät uusimmat julkaisut. Taistelukärjen käyttäytymistä kuvaamaan muodostettiin mahdollisimman yksinkertainen matemaattinen malli. Tarkastelu suoritettiin pääosin ontelopanoksen suihkulle. Nuoliammuksen käyttäytymistä sähkömagneettisessa kentässä tarkasteltiin lähteen Westerling & Lundberg 2013 mukaisen analyysin avulla. Läpäisevän projektiin deformaatio, sähkömagneettinen kenttä sekä sen aiheuttamat vuorovaikutusvoimat otaksuttiin pyörähdysymmetriseksi.

Ontelopanoksen suihkulle tyypillisestä kärjen ja perän nopeuserosta johtuva projektiin aksiaalinen venyminen, jonka seurauksena suihkun materiaali on plastisessa muodonmuutostilassa, altistaa suihkun magnetohydrodynaamiselle epästabiiliudelle, jossa suihku paikallisesti kuroutuu. Tätä kuroutumista analysoitiin häiriömenetelmällä. Analyysien avulla arvioitiin projektiin materiaalien ja mittojen vaikutusta SM-panssaroinnin ominaisuusvaatimuksiin. Ontelopanossammustekniikan lähteitä ovat mm. Walters & Zukas 1989 ja Shekhar 2012.

Tämän magnetohydrodynaamisen analyysin lisäksi tarkasteltiin sähkömagneettisen panssaroinnin keskeiset laitteistotekniset toimintaperiaatteet sekä tämän perusteella toteuttaa "feasibility study" järjestelmän toimivuudesta ja kriittisistä tekijöistä.

3. Aineisto ja menetelmät

3.1 Matemaattinen malli

Analyysin perustana on kytketty sähkömagneettinen ja mekaaninen systeemi, jota voidaan kuvata seuraavalla yhtälösystemillä

$$\rho(\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{v} \cdot \text{grad } \mathbf{v}) = -\text{grad } p + \text{div } \mathbf{s} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

$$\text{tr}(\text{grad } \mathbf{v}) = \text{div } \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{s} - p\mathbf{I} \quad (3)$$

$$\mathbf{d} = \text{sym grad } \mathbf{v} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}}, \quad f = \sqrt{\frac{3}{2} \text{tr}(\mathbf{s}^2)} - Y = 0 \quad (4)$$

$$\text{curl } \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}} \quad (5)$$

$$\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \dot{\mathbf{J}} \quad (6)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}' = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (8)$$

Yhtälö (1) on liikemäärän taseyhtälö, jossa \mathbf{v} on nopeus, ρ suihkun tiheys, p hydrostattinen paine, \mathbf{s} deviatorinen jännitystensori, \mathbf{J} sähkövirran voimakkuuden tiheys ja \mathbf{B} magneettivuon tiheys. Muodonmuutosnopeus, nopeusgradientin symmetrinen osa, otaksutaan täysin plastiseksi, yhtälöt (2) ja (4). Plastiselle käyttäytymiselle otaksutaan ideaaliplastinen von Misesin malli (4). Sähkömagneettiset materiaalivakiot otaksutaan vakioiksi: sähkönjohtavuus σ ja magneettiselle permeabiliteetille käytetään tyhjiön arvoa $\mu_0 = 4\pi \times$

10^{-7} Vs/Am. Täten Maxwellin yhtälöt voidaan esittää muodossa (5)-(8), jossa \mathbf{E} on sähkökentän voimakkuus. Materiaaliparametrien vakioisuusotaksuman avulla sähkökentän voimakkuus voidaan eliminoida systeemistä (5)-(8), jolloin päädytään redusoituun systeemiin

$$\rho (\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{v} \cdot \text{grad } \mathbf{v}) = -\text{grad } p + \text{div } \mathbf{s} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (9)$$

$$\text{div } \mathbf{v} = 0 \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{B}} - \frac{1}{\sigma \mu_0} \text{div}(\text{grad } \mathbf{B}) - \text{curl}(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0 \quad (11)$$

Otaksumaan nopeus ja magneettivuon tiheys pyörähdyssymmetrisiksi kentiksi. Otaksumaan lisäksi nopeuskentälle kokoonpuristumattomuusehdon (10) toteuttava yrite

$$v_r = -\frac{1}{2}\eta r + v_0(r/R_0) \sin(\pi z/a), \quad (12)$$

$$v_z = \eta z - \frac{2}{\pi} \frac{a}{R_0} v_0 \cos(\pi z/a) \quad (13)$$

jossa η on suihkun häiriöttömän tilan aksiaalinen muodonmuutosnopeus, joka on otaksumattu vakioksi, R_0 suihkun säde ja a on häiriömuodon puoliaallon pituus. Joidenkin välivaiheiden ja yksinkertaistusten jälkeen saadaan säteittäisen nopeuden lausekkeeksi

$$v_r = R_0 \left[(\Lambda - \Omega) \tau - \frac{1}{2} \right] \eta, \quad \eta = \frac{v_{\text{tip}} - v_{\text{tail}}}{L} \quad (14)$$

$$\Lambda = \frac{\mu_0 I^2}{\pi^2 \rho \eta^2 R_0^4}, \quad \Omega = \pi^2 \frac{\sqrt{2}}{3} \left(\frac{R_0}{a} \right) \frac{Y}{3 \rho \eta^2 R_0^2} \quad (15)$$

Yhtälöissä (12)-(15) τ on dimensioton aika, $\tau = \eta t$, ja dimensiottomat vakiot Λ ja Ω kuvaavat vastaavasti sähkövirran I aiheuttamien voimien ja hitausvoimien sekä plastisten voimien ja hitausvoimien suhdetta.

3.2 Sähkömagneettisen panssaroinnin laitteisto

SMG-panssarointijärjestelmän toimivuuteen liittyviin kysymyksiin haetaan vastausta kentäteorian sekä sähkömagneettisen järjestelmän tehotasapainon avulla. Tämä nk. Poyntingin teoreema määrittää, miten järjestelmässä tehtävä työ ja sähkömagneettiseen muotoon varastoitunut energia muuttuu ajan suhteen ja siirtyy järjestelmästä pois.

kuin tavanomaisilla kondensaattoreilla. (Sähkömagneettisessa panssaroinnissa kondensaattoreilta saatava teho on kriittinen tekijä.)

4. Tulokset ja pohdinta

4.1 Ontelopanosammus

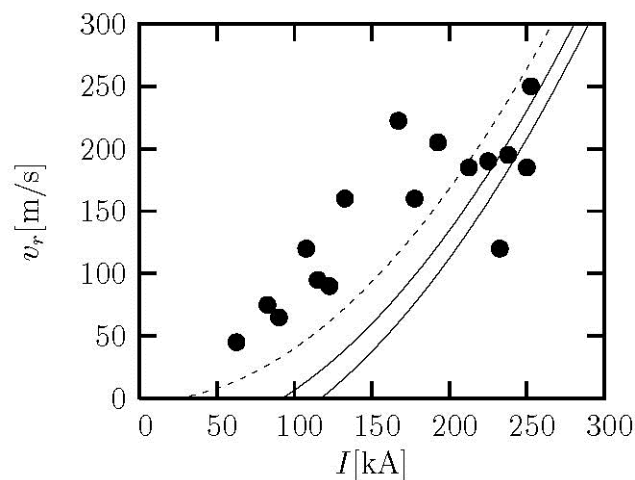
Kuvassa 2 on esitetty kuparisuihkun läpi kulkevan virranvoimakkuuden I vaikutus poikittaiseen nopeuteen. Ehyet viivat ovat yhtälön (14) mukaiset ratkaisut olettaen kuparin myötörajaksi 300 MPa (ylempi ehyt viiva) ja 500 MPa (alempi ehyt viiva). Katkoviiva

kuvaa ratkaisua (14) mikäli materiaalin myötölujuus jätetään kokonaan huomiotta. Pisteet ovat koetuloksia lähteestä [Appelgren 2010]. Materiaalin tiheydelle on käytetty arvoa 8960 kg/m^3 , muodonmuutosnopeudelle on käytetty arvoa 5000 1/s . Suihkun häiriötömälle säteelle on käytetty arvoa 1 mm .

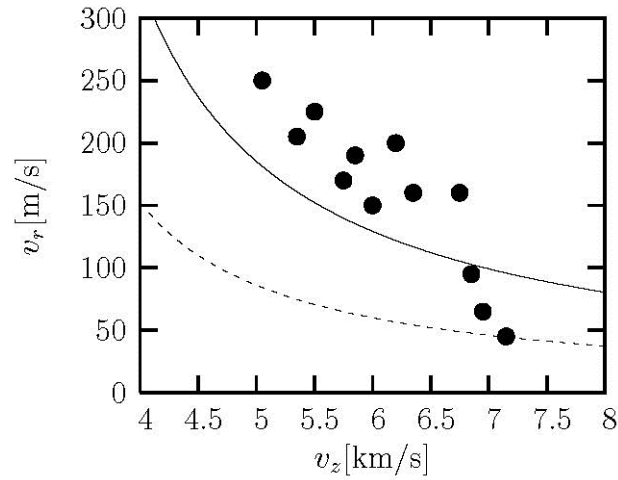
Kuvassa 3 on esitetty suihkun poikittaisen nopeuden riippuvuus suihkun kärjen nopeudesta. Tässä suihkun perän nopeudelle on käytetty vakioarvoa $2,7 \text{ km/s}$. Ehyt viiva kuvaa kuparisuihkua ja katkoviiva hypoteettista wolframista tehtyä ontelopanosammusta. Wolframin suuren tiheyden 19300 kg/m^3 vuoksi epästabiiliuden vaikutukset poikittaiseen nopeuteen ovat huomattavasti pienemmät kuin vastaavalla kuparista tehdyllä ammuksella.

Kuvassa 4 on vastaavasti esitetty yhtälön (14) mukaiset ratkaisut poikittaiselle nopeudelle virranvoimakkuuden funktiona kolmella eri hypoteettisella ammusmateriaalilla: kupari, kulta ja wolframi. Kulta ja wolframi ovat suuren tiheydensä vuoksi hyviä ontelopanosmateriaaleja. Wolframin käytön esteenä on mahdollisesti heikommät muovautuvuusominaisuudet.

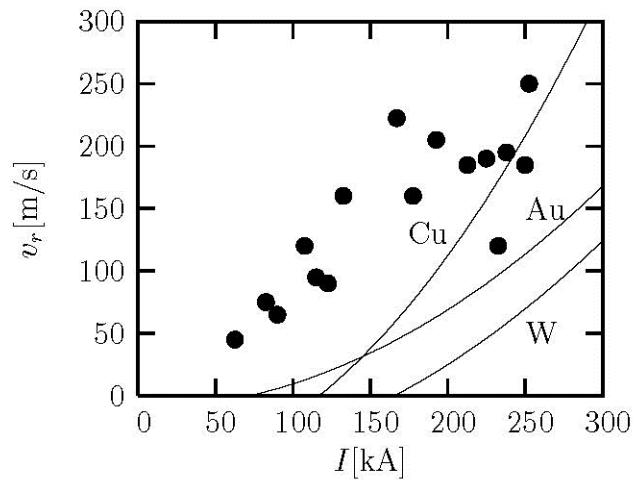
On syytä huomata, että kuvissa 2-4 esitetyt laskelmien tulokset on esitetty laboratoriomittakaavan suihkulle – halkaisija 2 mm . Poikittainen nopeus on verrannollinen käänteisesti säteen kolmanteen potenssiin. Täten myös suihkun häiritsemiseen tarvittava virranvoimakkuus kasvaa merkittävästi.



Kuva 2. Poikittainen nopeus v_r suihkun läpäisevän virranvoimakkuuden I funktiona.



Kuva 3. Poikittainen nopeus suihkun kärjen nopeuden funktiona.



Kuva 4. Suihkun materiaalin vaikutus suihkun poikittaiseen nopeuteen virranvoimakkuuden funktiona.

4.2 Nuoliammustarkastelu

Arvioidaan wolframista valmistetun nuoliammuksen häirintään tarvittavaa vähimmäisvirtaa perustuen analyyttisiin ratkaisuihin, joita on esitetty lähteessä [Westerling & Lundberg, 2013]. Vähimmäisvirralla tässä tarkoitetaan pienintä mahdollista virtaa, jolla nuoliammuksen materiaali plastisoituu paikallisesti von Mises-kriteerillä arvioituna.

Westerling ja Lundberg ovat esittäneet 2013 mallin, joka tarkastelee lineaarisesti kimmoista pitkää (ääretön) aksisymmetristä sylinteriä, joka liikkuu vakionopeudella elektrodilaattojen välissä. Yksinkertaistavia oletuksia ovat: (i) etäisyys elektrodilevyistä on suuri, jolloin muutokset aksiaali- eli z-suunnassa ovat pieniä; (ii) poikittaisinertia oletetaan mitättömäksi ja poikkileikkaukset säilyvät tasoina; (iii) projektiilin nopeus V on alle äänennopeuden ($c_w = 4615$ m/s) materiaalissa; (iv) lämpöefektejä ei huomioida; (v) sylinterin läpi virtaa vakiojännite.

Sylinterin poikkileikkauksen jännityksille on johdettu kaavat kahdessa tapauksessa. Ensimmäisessä tapauksessa oletetaan poikkileikkaukseen vakiovirtajakauma, joka seuraa

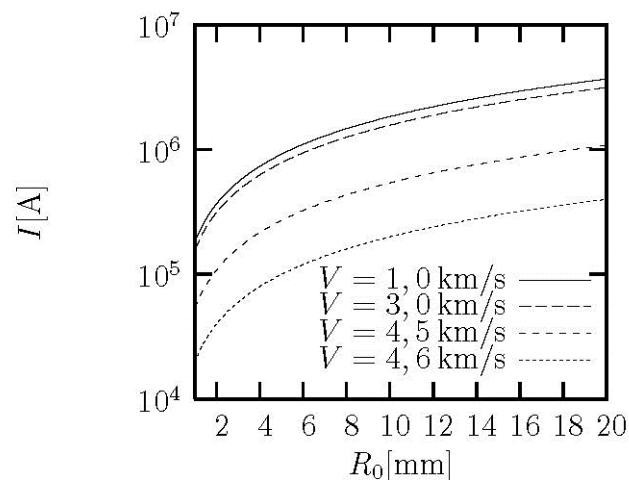
oletuksesta, että ammuksen nopeus V on niin pieni, että virta ehtii diffusoitua tasaisesti poikkileikkaukseen ($J_z = I/A$). Toisessa tapauksessa ammuksen nopeus on niin suuri, että virta ei ehdi diffusoitua poikkileikkaukseen vaan kulkee ohuessa kerroksessa sen pinnalla (small skin depth). Nuoliammuksen tapauksessa on yleensä kysymys jälkimmäisestä tapauksesta, koska ammuksen nopeus on niin suuri (> 1 km/s), että transiitioaika $T_{tr} = d/V$, jonka ammus on elektrodilevyjen välissä d , on paljon pienempi kuin magneettikentän radiaaliseen diffuusion karakteristinen aika $T_{rd} = \mu_0 \sigma_{mc} R_0^2$, σ_{mc} magneettinen johtavuus ja R_0 on ammuksen säde. Jos $V = 1000$ m/s, $d = 0.1$ m, $R_0 = 0.01$ m, $\sigma_{mc} = 1.79 \times 10^7$ 1/m Ω , saadaan $T_{tr} = 0.0001$ s ja $T_{rd} = 0.00225$ s. Siten tarkastellaan tässä vain small skin dept-tapausta. Tällöin sylinterin jännitykset ovat Westerling ja Lundbergin mukaan

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\phi\phi} = -p_0, \quad \sigma_{zz} = \frac{2(V/c_w)^2}{1 - (V/c_w)^2} \nu p_0, \quad p_0 = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 R_0^2}, \quad (16)$$

jossa p_0 on virran I aiheuttama paine ja ω on ammuksen nopeudesta riippuva funktio, joka kasvaa rajatta ammuksen nopeuden lähestyessä wolframien äänennopeutta. Myötäämiseen johtava minimipaine saadaan nyt ratkaistua von Mises-kriteeristä (4) ja vastaava minimivirta yhtälöstä (16). Saadaan arvio

$$I = 2\pi R_0 \sqrt{\frac{2Y}{\mu_0(1 + \nu\omega(V))}}. \quad (17)$$

Kun myötörajalalle käytetään arvoja $Y = 550$ MPa ja Poissonin vakiolle $\nu = 0.28$, saadaan tästä minimivirran tarpeeksi (kun $V = 1$ km/s) 1.8 MA. Koska virrantarve tämän tarkastelun mukaan riippuu lineaarisesti ammuksen säteestä ja epälineaarisesti ammuksen nopeudesta, kuvassa 5 on esitetty minimivirran tarve säteen funktiona ammuksen nopeuden ollessa parametrina.



Kuva 5. Minimivirrantarve nuoliammuksen paikalliseen plastisoitumiseen säteen funktiona eri ammuksen nopeuksien arvoilla.

Nähdään, että virran tarve vähenee voimakkaasti, kun ammuksen nopeus lähestyy wolframien äänennopeutta.

Näiden tarkastelujen relevanssia koskien on huomautettava, että myötäämisen alkaminen poikkileikkauksessa, johon nähden tämä tarkastelu on tehty, ei vielä tarkoita, että ammuksen läpäisykyky oleellisesti pienenee. Toisaalta Littlefieldin arvion [Littlefield, 1996] mukaan 2 cm teräs- tai wolframisynterille, jota tässäkin tarkasteltiin, plastisoitumiseen tarvittava virta on luokkaa 2-3 MA, joka on suuruusluokaltaan Westerlingin & Lundbergin mallin suuntainen.

4.3 SMG-panssaroinnin laitteisto

Sähkömagneettisen panssaroinnin lähtötilassa energiaa on aluksi varastoituna (kemiallisesti) akkuun. Tämän jälkeen akun energiaa varastoidaan panssarointiin sähkökenttään, joka synnytetään kytkemällä jännite kahden galvaanisesti erotetun metallilevyn välille.

Sähkökenttään varastoitavan energian määrä on suoraan verrannollinen levyjen ("yhteiseen") pinta-alaan sekä nelilöllisesti verrannollinen jännitteeseen. Tämä tarkoittaa, että teknisesti helpoin tapa varastoida lähtötilanteessa riittävästi energiaa sähkökenttään kannattaa toteuttaa suurella jännitteellä. Jännitteen suuruutta rajoittaa levyjen välisen sähkökentän voimakkuus; kentänvoimakkuus ei saa ylittää nk. läpilyöntilujuutta. (Läpilyönnin tapauksessa sähkökenttään varastoitunut energia muuttuu valokaaren kautta lämmöksi.)

Sähkökenttään varastoituvaa energiaa voidaan kasvattaa myös kytkemällä panssaroinnin levyjen rinnalle nk. superkondensaattori.

Superkondensaattoreita toteutetaan usein nk. nanomateriaalien avulla. Intuiivisen mielikuvan luomiseksi, esimerkiksi toteuttamalla nanohiiliputkilla hiusharjan kaltaisia piikkejä, ja asettamalla kaksi tällaista "harjaa" vastakkain piikkien koskettamatta toisiinsa, nanohiiliputkien pareihin saadaan varattua huomattavan suuri varaus. Tällöin piikkien välille syntyy suuri sähkökenttä. Lopputuloksena superkondensaattoreihin saadaan varattua suuri energia tilavuusyksikköä kohti, mutta vastaavasti tehotiheys saattaa olla pienempi - sähkömagneettisessa panssaroinnissa kondensaattoreilta saatava teho on kriittinen tekijä.

Superkondensaattorien energian varastointikyky on tällä hetkellä noin luokkaa 2-55 kJ/kg ja 18-30 kJ/dm³ ja tehotiheys on luokkaa 10-20 kW/kg. Sähkömagneettisen panssaroinnin vaatima energia osumaan kohti on noin 100-1000 kJ (arvio perustuu lähteeseen [Appelgren 2011], ja tätä vastaavat superkondensaattorin massa ja tilavuus on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Panssaroinnin superkondensaattorin koko ja tilavuus

<i>Superkondensaattori</i>	W=100 kJ, massa	W=1000 kJ, massa
Energiatiheys: 2 kJ/kg	50 kg	500 kg
Energiatiheys: 55 kJ/kg	1.8 kg	18 kg
	W=100 kJ, tilavuus	W=1000 kJ, tilavuus
Energiatiheys: 18 kJ/dm ³	5.5 dm ³	55 dm ³
Energiatiheys: 30 kJ/dm ³	3.3 dm ³	33 dm ³

Uusimpien Li-ion akkujen kapasiteetti on luokkaa 350-900 kJ/kg, joten panssarointiin tarvittava akkukapasiteetin yläraja on noin 1-3 kg/osuma.

Sähkömagneettinen panssarointi on toimiva, jos osumahetkellä sähkökenttään varastoitunut energia saadaan nopeasti purettua ontelohanoksen/projektiilin muodonmuutoksiin ja lämmittämiseen. Sähkötekniikassa tehon siirtymistä tarkastellaan impedanssien yh-

teensovituksen avulla. Tässä tapauksessa tämä tarkoittaa, että ennen osumaa panssarointi on nk. kapasitiivinen (eli energiaa sähkökenttään varastoiva) järjestelmä. Kun ammus lävistää panssaroinnin ja luo galvaanisen kontaktin levyjen välille, järjestelmä muuttuu induktiiviseksi, mikä tarkoittaa, että energiaa varastoituu magneettikenttään.

Impedanssisovitus on ideaalinen puhtaasti kapasitiivisen ja induktiivisen järjestelmän välillä. Tällaisessa tapauksessa energiaa ei nk. heijastu takaisin syöttävään järjestelmään.

Kääntäen, jos ammus on sähköisesti eriste, tällöin impedanssisovitus on huono eikä sähkömagneettinen panssarointi toimi. Toisin sanoen sähkömagneettinen panssarointi voidaan torjua hakemalla/kehittämällä ammuksen materiaaliksi jokin aine, jolla on pieni sähköjohtavuus.

Tällaisessa tapauksessa osumahetkellä järjestelmä ei muutu induktiiviseksi, mikä tarkoittaa, että sähkökenttään varastoitunut energia ei purkaudu riittävän nopeasti vaikuttaakseen ontelopanokseen/projektiiliin.

5. Loppupäätelmät

Tutkimuksessa käytetyssä mallissa ja sen ratkaisussa on käytetty useita yksinkertaistavia oletuksia. Suurimmat epävarmuudet sisältyvät materiaaliominaisuuksiin, kuten myötörajan riippuvuuteen hyvin suurista muodonmuutosnopeuksista. Myös sähköisten ominaisuuksien riippuvuus suurista plastisista muodonmuutoksista ja lämpötilasta on osin tutkimaton alue. Tässä tutkimuksessa projektiilin lämpenemistä ei tarkasteltu. Projektiilin lämpenemistä sähkövirran vaikutuksesta on analysoitu lähteessä Higuchi et al. 2007. Ontelopanoson suihku on oletettu täydelliseksi ympyräsylinteriksi. Tämän oletuksen vaikutuksia suihkun magnetohydrodynaamiseen epästabiiliuteen ei liene tutkittu.

Suoritettujen tarkastelujen perusteella voitaneen pitää otaksuttavana, että sähkömagneettinen panssarointi ei kykene nuoliammusten torjuntaan, varsinkin jos ammusmateriaalina on raskas metalli kuten wolframi. Ontelopanosammusten läpäisyä voi tehokkaasti häiritä sähkövirran avulla. Yleisin ontelopanosissa käytetty materiaali on kupari, joka hyvän muovautuvuutensa ansiosta sopii hyvin kyseisen asetyypin ammusmateriaaliksi. Mikäli ontelopanosammukset voitaisiin valmistaa raskaammasta materiaalista kuten kulta tai wolframi, lisäksi tämä huomattavasti epästabiiliuden laukaisemiseen tarvittavaa virranvoimakkuutta. Kulta, jonka kiderakenne on pintakeskinen kuutiollinen - kuten kuparinkin - olisi hyvin muovautuvana ja raskaana metallina ideaalinen ontelopanosammusmateriaali. Wolframin tiheys on likimain sama kuin kullan, mutta todennäköisenä ongelmana on wolframin heikompi muovautuvuus (wolframin kiderakenne on tilakeskinen kuutiollinen).

Sähkömagneettinen panssarointi on periaatteessa toteutettavissa nykyisen sähkötekniikan komponentein, mutta suojauksen rationaalisuus on kyseenalainen. Sillä ensinnäkin panssaroinnin komponentit väistämättä lisäävät suojattavan järjestelmän massaa. Toiseksi, koska panssarointi vaatii kaksi vastakkain asetettua yhdensuuntaista metallilevyä, liikuteltavassa kalustossa ylimääräisen massan hallinta vaatinee yhden panssarointilevyn massan jakamista kahdelle ohuemmalle levyille, ja koko panssarointi halutaan käytännössä myös suunnitella mahdollisimman ohueksi. Panssaroinnin paksuuden alaraja metallilevyjen välisen sähkökentän voimakkuuden läpilyöntilujuus. Toisin sanoen käytännössä järjestelmä suunnitellaan tätä rajoitetta vasten. Tästä puolestaan seuraa, että vaikka panssaroinnilla olisi mahdollista torjua ontelopanos, panssarointi olisi silti teknisesti deaktivoitavissa ampulla panssarointia luodeilla, jotka synnyttävät päällimmäiseen (sähkömagneettisen suojauksen massan takia ohennetun) levyn sisäpintaan kolhuja, kuten lommoja tai metallipinnan lävistäneitä reikiä. Tässä tapauksessa panssarointilevyjen välinen sähkökenttä jakautuu uudestaan, koska varaukset pyrkivät hakeutumaan kohti kärkipisteitä. Tämä tarkoittaa, että sähkökentänvoimakkuus kasvaa kolhujen kohdalla, mikä puoles-

taan pienentää panssaroinnin metallilevyjen välistä läpilyöntilujuutta. Läpilyöntilujuuden pienentyessä kyseinen panssaroinnin lohko täytyy kytkeä pois päältä, tai metallilevyjen välistä jännitettä tulee selvästi laskea. Tämä puolestaan pienentäisi merkittävästi energian määrää, johon koko panssarointi perustuu.

Toisin sanoen sähkömagneettisessa panssaroinnissa suorien metallilevyjen välinen yhdensuuntaisuus on kriittinen tekijä. Jos päällimmäistä panssarointilevyä vaurioitetaan pinnalta, se lisää mahdollisuutta koko järjestelmän suojauskyvyn menettämisestä.

Sähkömagneettisen panssaroinnin ja pst-projektiin käyttäytymisen mallintamiseen kompleksisuuden vuoksi tutkimuksen jatkomahdollisuudet ovat moninaiset. Käytettyä mallia voitaisiin täydentää ottamalla huomioon (i) suihkun realistisempi muoto, (ii) sähkövirran aiheuttama lämpeneminen ja sen vaikutukset aineparametreihin ja (iii) realistisempi suihkun nopeusprofiili. Suuri epävarmuus liittyy myös materiaaliparametreihin. Eri-tyisesti myötölujuuden muodonmuutosnopeusriippuvuudesta ja sähkönjohtavuudesta plastisessa tilassa on hyvin vähän tutkimustietoa alan kirjallisuudessa. Myös laitteistotallalla SMG-panssarointii liittyy useita käytännön ongelmakohtia, joista osaa on käsitelty myös tässä tutkimuksessa. Katso myös lähteet Steele & Shepherd ja Fedorov & Ladov.

Kirjallisuusviitteet

- P. Appelgren. Gigawatt pulsed power technologies and applications. Doctoral thesis, KTH, School of Electrical Engineering, Space and Plasma Physics, 2011.
- P. Appelgren, M. Skoglund, P. Lundberg, L. Westerling, A. Larsson, T. Hurtig. Experimental study of electromagnetic effects on solid copper jets, *ASME Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 77, January 2010.
- S.V. Fedorov, V. Ladov. Powerfull electric discharge as method of anti shaped-charge protection. 27th International Symposium on Ballistics, Freiburg, Germany, 2013.
- M. Higuchi, R. Kawamura, Y. Tanigawa. Magneto-thermo-elastic stresses induced by a transient magnetic field in a conducting solid circular cylinder. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, 2007, 5316-5335.
- D.L. Littlefield, The effect of electromagnetic fields on the stability of cylindrical jets and rods, *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 63, September 1996.
- D.L. Littlefield, Magnetomechanical Instabilities in Elastic Plastic Cylinders, Part II: Plastic Response. 1996; Vol. 63: 742-749.
- S.E. Nyholm, Electromagnetic armour: an overview, FOA-R-98-00877-310-SE, 1998.
- H. Shekhar. Theoretical modelling of shaped charges in the last two decades (1990-2010): A review. *Central European Journal of Energetic Materials*, 9(2), 2012, 155-185.
- M. Steele, A. Shepherd. *Electric Armour for Armoured Vehicles*, BMT 36745/R4563, 2010.
- W.P. Walters, J.A. Zukas. *Fundamentals of Shaped Charges*. John Wiley & Sons, 1989.
- L. Westerling, Interaction of cylindrical penetrators with ceramic and electromagnetic armour, Dissertation, Uppsala University, 2013.
- L. Westerling, B. Lundberg. Stresses in a Long Cylindrical Conductor Moving Axially Through a Pair of Electrode Plates Under Stationary Conditions. *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 80, March 2013.
-