

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Seuraavan sukupolven Ballistiset Keraamit

Tomi Lindroos, Matti Lindroos
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Visiokatu 4, PL1300, 33101 Tampere
tomi.lindroos@vtt.fi

Tiivistelmä

Ballistisen suojauksen vaatimukset kasvavat koko ajan. Ballististen suojarakenteiden kehitykseen on haettu esimerkkiä luonnossa esiintyvistä rakenteista. Yhtenä paljon tutkittuna esi-merkkinä on simpukankuori, joka omaa erittäin hyvän lujuuden yhdistettynä korkeaan murtositkeyteen. Projektissa kehitettiin luontoa matkivia lamellaarisia, keraamisia materiaaleja. Monitasomateriaalimallinnuksen keinoin osoitettiin asetettu hypoteesi todeksi: kaksifaasinen, lamellaarinen keraamirakenne jakaa ballistisen iskun energiaa tehokkaammin ja kasvattaa näin ballistista suorituskykyä. Mallinnustyön rinnalla kehitettiin edullisiin raaka-aineisiin perustuvia reaktiivisella kuumapuristuksella valmistettavia alumiinioksidi-boorikarbidi sekä alumiinioksidi-titaanikarbidi keraamikomposiitteja.

1. Johdanto

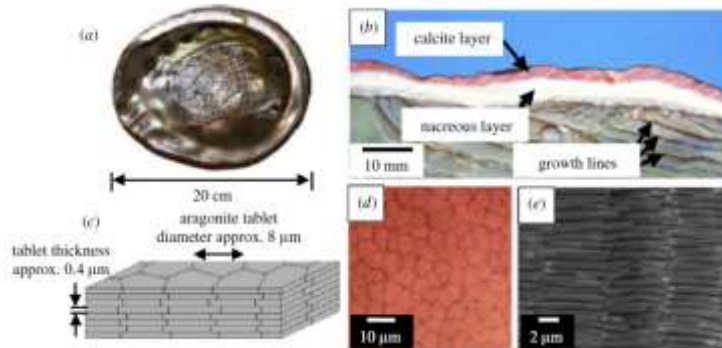
Ballistisen suojauksen vaatimukset kasvavat koko ajan. Suojauskyvyn kasvattaminen ja samanaikainen painon alentaminen edellyttävät yhä kehittyneempien ja suorituskykyisempien materiaalien ja materiaaliyhdistelmien käyttöä. Ballistisella suojauksella ymmärretään yleensä luodeilta, sirpaleilta ja usein myös teräseilta suojaaminen. Ihmisten lisäksi suojauksen kohteita ovat tekniset laitteet, kulku- ja kuljetusvälineet, rakennukset jne. Suojausratkaisut, käytettävät materiaalit ja rakenteet vaihtelevat uhkakuvasta ja suojauksen kohteesta riippuen puettavista henkilösuojista raskaisiin panssarointeihin. Yleisesti ballistinen suojaus on totuttu liittämään pelkästään sotilaallisiin tarpeisiin ja poliisiin työnkuvaan. Tilanne on kuitenkin muuttumassa, sillä siviilisektorilla monet uudet ja ennustamattomat turvallisuusuhat ovat kasvussa ja jatkuvasti pahenemassa. Tämä asettaa uudenlaisia vaatimuksia ja tarpeita suojausratkaisuille, nykyisillä kriisialueilla erityisesti IED-uhka tulee huomioida.

Haettaessa suojaa korkean läpäisykyvyn ammuksia, kuten teräs- ja kovametalliytimisiä luoteja, vastaan ballistinen suojausratkaisu on lähes poikkeuksetta keraamin ja sitkeän taustarakenteen yhdistelmä. Käytettyjä keraamilaatuja ovat alumiinioksidi, piikarbidi ja boorikarbidi, joista alumiinioksidi on yleisin alhaisimman hintansa vuoksi. Keveytensä ansiosta boorikarbidi olisi monissa käyttökohteissa ylivoimainen, mutta suurilla iskuenergioilla sen suojakyky heikkenee merkittävästi rakenteessa tapahtuvan faasimuutoksen seurauksena. Kaikissa tapauksissa puhtaiden keraamien heikkoutena on kuitenkin niiden hauraus, joka heikentää ko. materiaalista valmistettujen suojarakenteiden käsiteltävyyttä sekä erityisesti moni-
osumakestävyyttä.

Jo historiallisista ajoista lähtien mallia suojarakenteiden kehitykseen on haettu luonnossa esiintyvistä rakenteista. Erilaiset suomurakenteet ovat toimineet mm. haarniskoiden rakenteiden esikuvana. Eräs suurta mielenkiintoa herättänyt luonnonrakenne on simpukankuori, joka omaa erittäin hyvän lujuuden yhdistettynä korkeaan murtositkeyteen. Poikkeuksellisten ominaisuuksien takana on kuoren kaksifaasinen lamellaarinen mikrorakenne, joka jakaa te-

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

hokkaasti iskuenergian laajemmalle alueelle ja aiheuttaa näin rakenteessa etenevien säröjen hajaantumisen ja lopulta etenemisen pysähtymisen [1].



Kuva 1. Opitaan luonnosta, simpukankuoren korotetun murtositkeyden omaava lamellaarinen rakenne [1].

Kuvassa 1 on esitetty simpukankuorirakenne, joka koostuu mikrokooppisista keraamisista aragoniitti lamelleista, sekä näiden välissä olevasta ohuesta orgaanisesta kerroksesta. Lamellaarinen mikrorakenne yhdistettynä lamellien topografiaan ja nanokiteiseen rakenteeseen kasvattavat kuoren murtositkeyden jopa 1000-kertaiseksi verrattuna puhtaan aragoniitin murtositkeyteen [2].

Hyödyntämällä uusia, kehittyneitä mallinnus- ja simulointityökaluja on mahdollista ymmärtää paremmin monimutkaistenkin materiaalien ja rakenteiden käyttäytymistä ja tätä kautta nopeuttaa kehitysprosessia ja päästä lähemmäs optimaalista ratkaisua. Mikrorakennetason malleilla on mahdollista tarkastella ja visualisoida ballistista iskutapahtumaa materiaalin sisällä, ja tätä kautta ymmärtää paremmin tapahtuvia ilmiöitä ja ohjata kokeellista työtä oikeaan suuntaan nopeammin. Luonnossa esiintyvien rakenteiden jäljittelyä voidaan toteuttaa suunnittelemalla synteettisiä mikrorakenteita, joiden avulla voidaan tutkia monifaasirakenteiden faasien välisten suhteiden ja topologian vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin makrotasolla. Mallien tuottama informaatio luo pohjan tavoiteltavalle materiaalin mikrorakenteelle sekä faasien ominaisuuksille.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Projektin kokonaistavoitteena oli kehittää työkaluja ja menetelmiä seuraavan sukupolven ballistisen keraamin kehittämiseksi mahdollistaen suorituskyvyn (suojaustaso / neliöpaino) kasvattamisen.

Tutkimusta ohjasi hypoteesi: Kaksifaasinen lamellaarinen keraamirakenne jakaa ballistisen iskun energiaa tehokkaammin ja kasvattaa näin ballistista suorituskykyä.

Kokonaistavoite koostui seuraavista osatavoitteista:

- Mallinnusavusteisen materiaalisuunnittelun hyödyntäminen luontoa jäljittelevän rakenteen valmistuksessa. Mallinnuksen avulla määritetään suuntaviivat kokeelliselle tutkimukselle ja näin nopeutetaan kehitystä.
- Valmistaa hienojakoisen lamellaarisen mikrorakenteen omaavaa kaksifaasikeraamia reaktiivista kuumapuristusta hyödyntäen.
- Todentaa lamellaarisella rakenteella saavutettava suorituskyvyn kasvu sekä simuloimalla

¹ Biologically inspired crack delocalization in a high strain-rate environment C. Knipprath et.al., J. R. Soc. Interface (2012)

² Uncovering high-strain rate protection mechanism in nacre, Z. Huang, Scientific Reports 1(2011)



että käytännön ammutakokein.

Tavoiteltava neliöpaino on keraamille $< 40 \text{ kg/m}^2$, suojaustasolle NIJ STD 0101.06 taso IV. Tämä mahdollistaisi taktisten suojaliivien lisälevyn (ESAPI-levy, L-koko) kohdalla noin 20 % keventämisen verrattuna kaupalliseen BAE Systemsin vastaavaan 2,9 kg painoiseen levyyn [3].

3. Aineisto ja menetelmät

Suoritettu työ pohjautui tutkimusryhmän pitkäaikaiseen työhön suojausmateriaalien parissa. Aikaisemmassa MATINE-projektissa Ballististen Materiaalien mallinnusavusteinen kehitys (BalMa) luotiin valmiudet mallinnusavusteiselle materiaalisuunnittelulle. BalMa-projektissa kehitetyt mallit verifioitiin kokeellisesti ammutakokein suurnopeuskuvausta hyödyntäen. Projektin alussa jatkettiin validointityötä mallintamalla suurnopeuskuvauksissa käytettyjä koerakenteita.

Lähtökohdat projektin toiselle tutkimuskaudelle

Projektin ensimmäisen tutkimuskauden aikana kehitettiin mallinnustyökaluja faasisuhteiden sekä -dimensioiden vaikutusten analysoimiseksi. Synteettisten materiaalmallien avulla visualisoitiin jännitysten ja murtumien eteneminen kaksifaasisessa keraamirakenteessa. Suoritetut simuloinnit osoittivat selkeästi, kuinka jännitykset ja säröt muuttavat suuntaa kohdatessaan faasirajapinnan. Havainnon perusteella voidaan todeta, että idea kaksifaasikeraamin toiminnasta on osoitettu toimivaksi.

Simulointien rinnalla kehitettiin kokeellisia valmiuksia kaksifaasikeraamin valmistamiseksi. Lähtökohtana oli $\text{B}_4\text{C}-\text{Al}_2\text{O}_3$ -keraamin valmistaminen reaktiivisella kuumapuristuksella. Menetelmällä onnistuttiin valmistamaan hienojakoisen, lamellaarisen kaksifaasisen rakenteen omaavia kappaleita, jotka koostuivat tiiviistä Al_2O_3 -faasista ja huokoisesta B_4C -faasista. Korkeasta sulamispisteestä ja heikosta sintrautuvuudesta johtuvaa B_4C -faasin huokoisuutta onnistuttiin vähentämään prosessiparametrien säädöllä, samalla kuitenkin menetettiin lamellaarinen rakenne, mikä selittyy valitulla valmistustekniikalla.

Johtopäätös ensimmäisen tutkimuskauden jälkeen oli, että lamellaarisuus on tuotettava valmistusmenetelmän kautta. Projektin toisen tutkimuskauden lähtökohtana oli lamellaarisuuden toteuttaminen kerrostamalla raaka-aineet prosessointimuottiin kerroksittain. Valitulla lähestymistavalla saavutettiin säännöllinen lamellaarinen rakenne, mutta kerrosten välisistä lämpölaajenemiseroista johtuen rakenteessa oli huomattavan paljon säröytymistä. Koemateriaalien valmistuksessa tehtyjen havaintojen ja kertyneen osaamisen pohjalta ideoitiin uudentyyppinen tapa tuottaa lamellaarinen mikrorakenne, samalla vaihdettiin raaka-ainepohja. Uudessa lähestymistavassa kova keraaminen lamellaarisena rakenteeseen muodostuva faasi on $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ja sitkeyden tuova faasi on TiC-Ni .

³ Hard Body Armor Insert Plates BAE Systems (2008)

4. Tulokset ja pohdinta

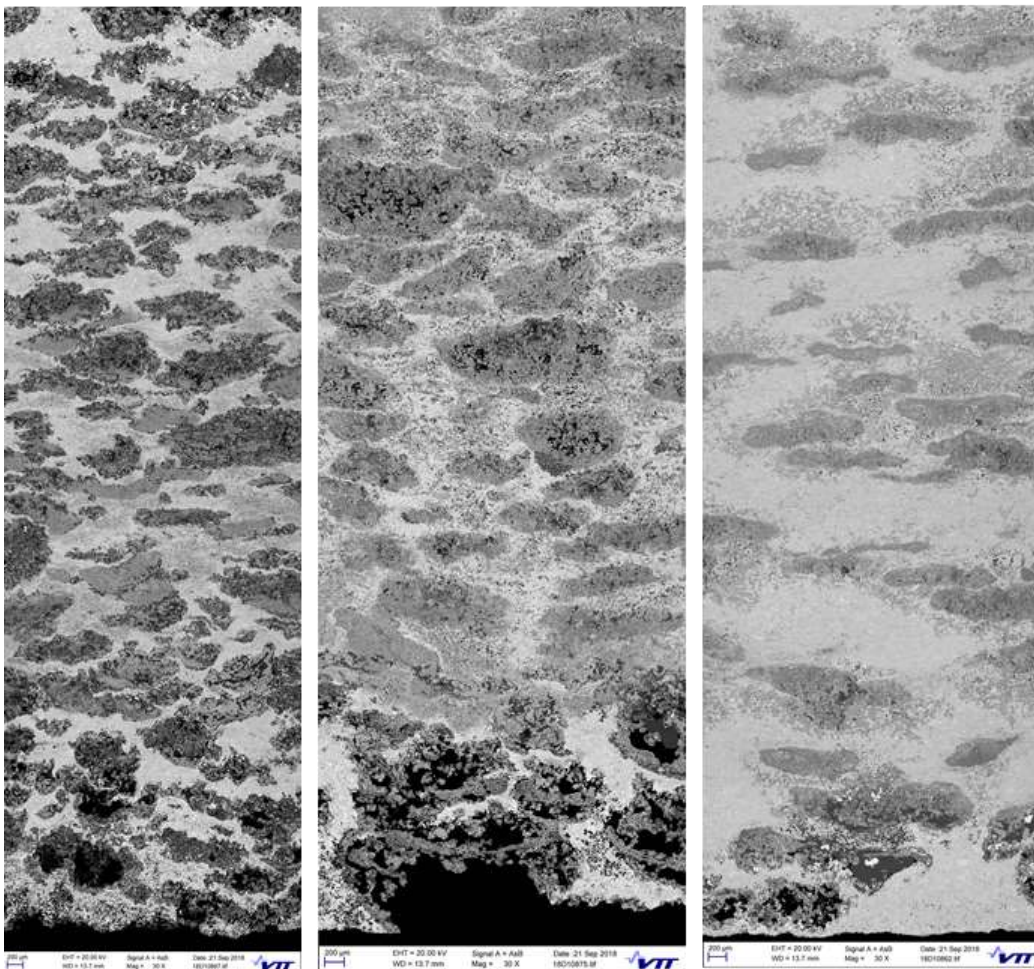
Lamellaarisen keraamikomposiitin valmistus

Uudella lamellaarisen mikrorakenteen muodostumisen mahdollistavalla prosessointimenetelmällä valmistettiin komposiittirakenteita eri faasisuoksilla. Kuvassa 2 on esitetty elektronimikroskopiakuvat (SEM) kolmesta eri $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ / TiC-Ni -seossuhteen koemateriaalista, faasisuudet on esitetty kuvien yllä. Kuvissa $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ -faasi näkyy tummempina alueina, jotka suuntautuvat erityisesti 50/50 ja 30/70 faasisuhteilla. Faasien rajoilla on nähtävissä jonkin asteista sekoittumista, erityisesti 50/50 -suhteella valmistetun koemateriaalin tapauksessa. Röntgendifraktiomäärityksissä (XRD) ei kuitenkaan ollut havaittavissa ei toivottuja faaseja. Faasirajapintojen sekoittumisvyöhykettä analysoitiin määrittämällä alkuainekartta (EDS) pienestä mikrorakenteen alueesta, Kuva 3. Tutkimalla erityisesti alumiinin ja nikkelin jakautumista mikrorakenteessa voidaan päätellä, kuinka voimakasta faasien sekoittuminen on rakenteessa. Mikrorakennekuvassa esiintyvän tummemman $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ -faasin kohdalla alkuainekartalla nikkelpitoisuus on hyvin pieni, vastaavasti vaalean TiC-Ni -faasin kohdalla alumiinipitoisuus on pieni eli alkuaineiden sekoittumisen voidaan todeta olevan hyvin pientä.

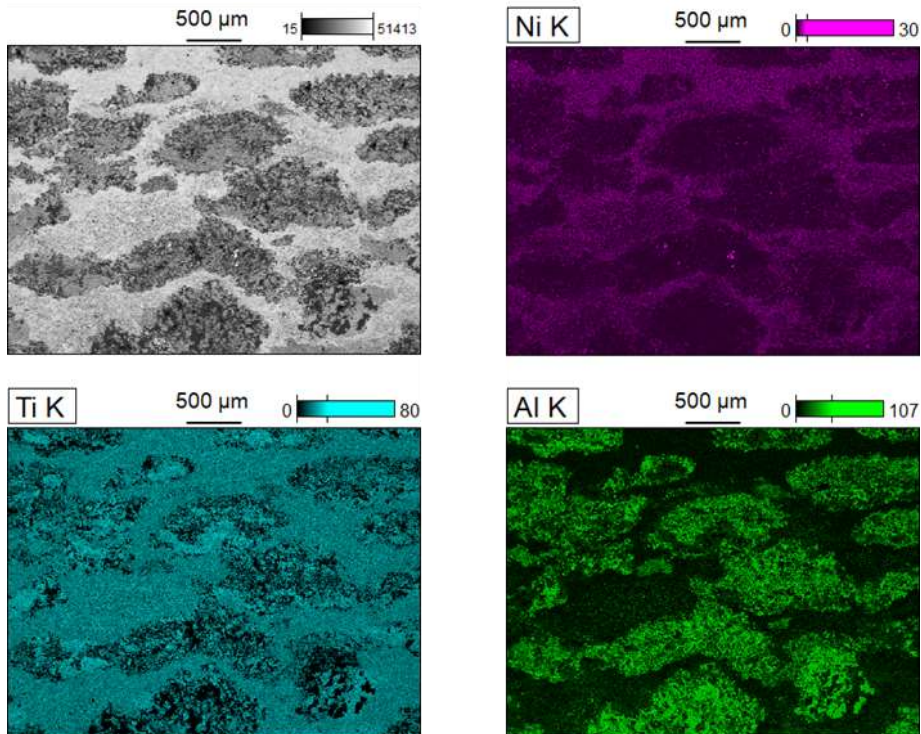
70/30

50/50

30/70



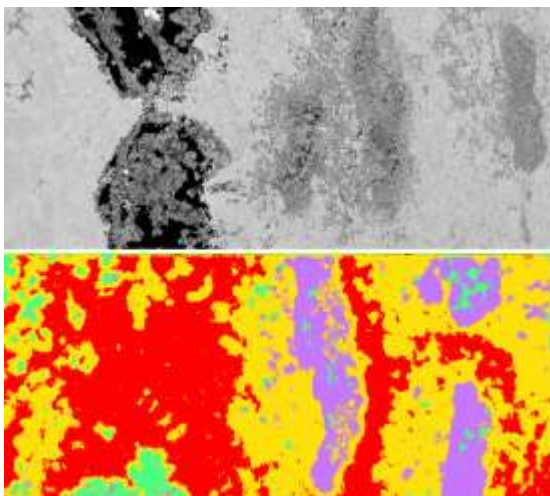
Kuva 2. Mikrorakennekuvat kolmesta eri $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ / TiC-Ni -seossuhteen koemateriaalista.



Kuva 3. Alkuainekartat nikkelin, alumiinin ja titaanin jakautumisesta mikrorakenteen eri faaseihin.

Mikrorakennemallinnus

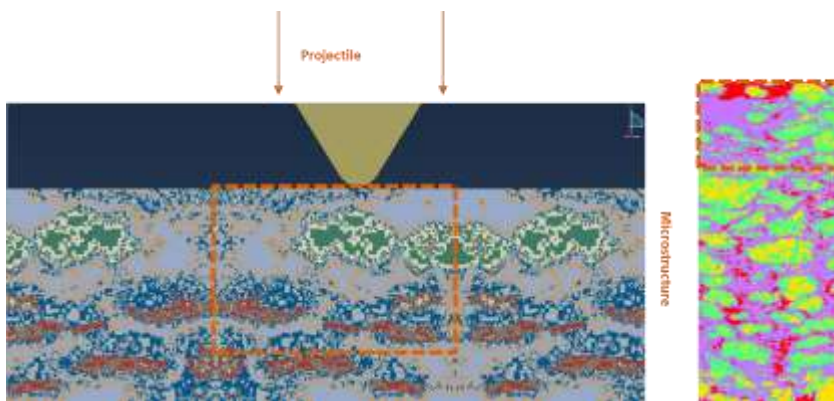
Valmistettujen koemateriaalien pohjalta aloitettiin oikeisiin mikrorakenteisiin perustuva monitasomallinnus. Faasit tunnistettiin kuva-analyysillä mikrorakennekuvasta (Kuva 4) ja tunnistettujen faasien kovuudet (HV5) määritettiin: punainen 1304, vihreä 2253, keltainen 1847 ja violetti 2011.



Kuva 4. Kuva-analyysillä mikroskooppikuvasta määritetty faasijakauma.

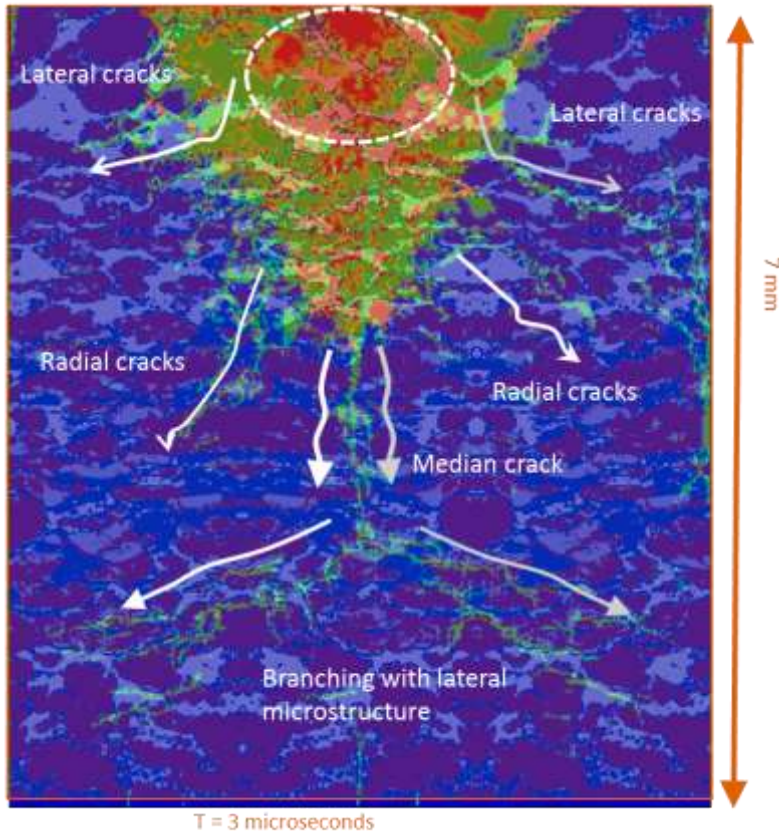
Mitatut kovuudet tukevat hyvin alkuainekarttojen perusteella tehtyjä havaintoja. Vihreällä kuvassa näkyvä alue on lähes puhdasta alumiinioksidia, keltaisen ja violetin alueen ollessa pääosin Al_2O_3 -TiC -faasia. Kuvan punainen alue on TiC-Ni -faasia ja sen kovuus vastaa tyypillistä TiC-Ni -bulkkikappaleesta mitattua kovuutta.

Kuva-analyysillä saatua rakennetta käytettiin materiaalimallin perustana, mallissa eri faaseille määritettiin omat nopeusriippuvat materiaalimallit, jotka huomioivat myös materiaalin vaurioitumisen. Kuvassa 5 on esitetty mallinnettu tilanne, suurempi alue mikrorakennetta on luotu peilaamalla yksittäistä SEM-kuvaa, jotta vaurioiden kehittymistä voidaan seurata suuremmalla alueella. Mikrorakennemallin tapauksessa tarkastellaan 7.62X51 FFV luodin kovametalliytimen tunkeutumista rakenteeseen muutamien ensimmäisten mikrosekuntien aikana.



Kuva 5. Mikrorakennemalli projektiin iskusta.

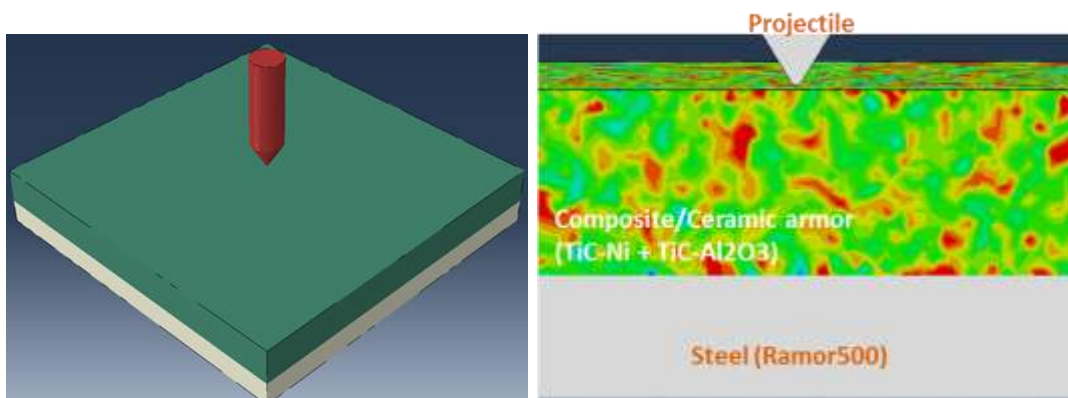
Kuvassa 6 on esitetty säröjen eteneminen mikrorakenteessa ajanhetkellä 3 μs , projektiili on poistettu kuvasta luettavuuden selkeyttämiseksi. Kuvasta voidaan helposti havaita kuinka ydintyneet säröt vaihtavat suuntaa kohdatessaan faasirajapinnan, säröt myös pääsääntöisesti kääntyvät pois päin iskukohtaan keskustasta. Kuvasta on kuitenkin havaittavissa, että projektiin kärjen edessä kulkee suoraan rakenteen läpi etenevä särö, joka kuitenkin hajaantuu sivuille edettyään jonkin matkaa rakenteessa. Tilanne todennäköisesti muuttuu, kun projektiin terävä kärki vaurioituu sen edetessä rakenteessa. Oikeaan mikrorakenteeseen perustuvat simulointitulokset vastaavat hyvin synteettisillä mikrorakennemalleilla saatuja tuloksia.



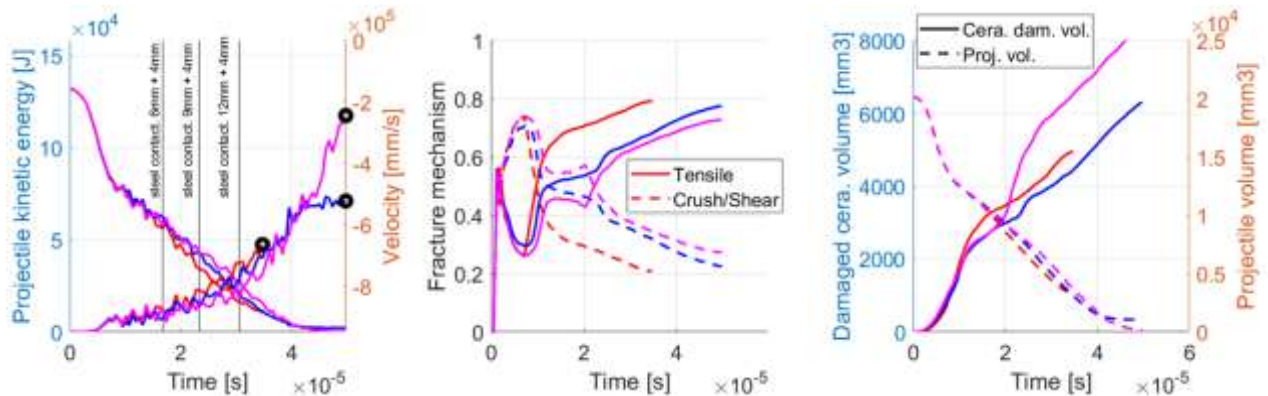
Kuva 6. Säröjen eteneminen mikrorakenteessa ajanhetkellä 3 μ s.

Makrotason mallinnus

Mikrorakennetasolla tapahtuvaa mallinnusta rajoittaa tarvittava laskenta-aika, minkä seurauksena makroskaalan rakenteen ballistisen suorituskyvyn simulointi ei ole mielekäästä, eikä monissa tapauksissa käytännössä edes mahdollista. Mikrorakennemalleilla saatuja materiaaliominaisuuksia voidaan kuitenkin hyödyntää makroskaalan mallien lähtöarvoina. Kuvassa 7 on esitetty ballistisen suojauskyvyn simuloinneissa käytetty rakenne, joka koostuu 4 mm paksusta terästaustassa (Ramor 500) sekä $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ / TiC-Ni -kerroksesta, jonka paksuutta vaihdeltiin. Projektiilina on sama 7.62X51 FFV luodin kovametalliydin kuin mikrorakennemalleissa, iskunopeus 950 m/s.



Kuva 7. Keraamikomposiitti-teräs yhdistelmän simulaatiomalli.



Kuva 8. Projektiilin hidastuminen, murtumiskäyttäytyminen ja tuhoutuminen eri keraamikomposiitin paksuuksilla.

Kuvassa 8 on esitetty yhdistelmärakenteen toiminta eri $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ / TiC-Ni -kerroksen paksuuksilla (6, 9, ja 12 mm). 6 mm paksun keraamikomposiitin tapauksessa projektiili läpäisee rakenteen, projektiilin kineettisestä energiasta on jäljellä 6,7% ja vastaavasti massasta 14 %. Keraamikomposiitin paksuuden ollessa 9 mm projektiilin lähes kaikki kineettinen energia kuluu rikkoutumiseen ja tulos on hyvin lähellä pysäytystä (kineettinen energia 0,1 % ja massasta jäljellä 1 %). Paksuimman 12 mm keraamikomposiitin kohdalla projektiili murskautuu täysin ja sekundäärisirpaleet lähes pysähtyvät jo ennen keraamiteräsrapiintaa. Verrattaessa tuloksia state-of-the-art tason TiC-Ni -suojamateriaaliin voidaan suorituskyvyn todeta olevan lähes samalla tasolla, on kuitenkin huomioitava, että keraamikomposiitin rakennetta ei ole vielä tässä vaiheessa mitenkään optimoitu.

Koelevyt ballistiseen testaukseen

Ballistisen suorituskyvyn määrittämiseksi valmistettiin koesarja levyjä ammutakokeisiin. Testattavia levyjä oli kahta eri tyyppiä, VTT:n valmistamina d100 mm levyjä (kuva 9) ja Exote Oy:n valmistamia 100m x100 mm levyjä.



Kuva 9. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ + TiC-Ni -komposiittilevyjä ammutakokeisiin.



Ammuntakokeissa käytettiin vastaavaa kerrosrakennetta kuin simuloinneissa. Ammuntakokeissa 7.62x39 API projektiili pysähtyi keraamikomposiitin neliöpainolla 37 kg/m², 7.62X51 FFV projektiiliin pysäyttämiseen ko. neliöpaino oli kuitenkin riittämätön. Tulos oli osin odotettavissa, koska keraamikomposiittilevyjen paksuus oli vain 7,4 mm. Simulointien verifiointiseksi tulee valmistaa erä paksumpia levyjä.

5. Loppupäätelmät

Suoritetut tehtävät osoittivat selkeästi mallinnusavusteisen materiaalikehityksen mahdollisuudet. Monitasomallinnuksen avulla on mahdollista visualisoida materiaalien mikrorakennetasolla tapahtuvia ilmiöitä ja tätä kautta ymmärtää paremmin, miten materiaalin rakennetta tulisi muuttaa suorituskyvyn parantamiseksi. Monitasomallinnuksen avulla voidaan kohtuullisella työmäärällä tuottaa runsaasti tietoa siitä, miten faasisuudet ja niiden kokojakauma vaikuttavat ballistiseen suorituskykyyn. Mallinnuksen kehittyessä voidaan myös hyödyntää tehokkaita optimointialgoritmeja rakenteen suunnitteluun.

Mallinnustyökalujen linkittäminen kiinteäksi osaksi kokeellista työtä tulee muuttamaan uusien materiaalien kehityspolkua merkittävästi. Tämän hetkisillä simulointityökaluilla suoraviivaisin tapa mallinnuksen kokonaisvaltaiseen hyödyntämiseen on valmistettujen materiaalien mikrorakenteiden hyödyntäminen mallinnuksen perustana, tähän tarvittavat työkalut ovat olemassa.

Prosessikehityksessä suoritetun työn seurauksena esiteltiin uudenlainen tapa tuottaa lamellaarisia keraamikomposiittirakenteita. Ideoidulla valmistusmenetelmällä on mahdollista varioida faasisuhteita, sekä eri faasien kokojakaamaa hyvinkin tarkasti. Koemateriaalin analyysit osoittivat, ettei faasien keskinäistä sekoittumista juuri tapahdu, muutoin kuin aivan rajapintojen läheisyydessä. Monitasomallinnuksen avulla pystyttiin arvioimaan kehitettyjen keraamikomposiittien ballistista suorituskykyä, joka asettui lähes samalle tasolle pitkään kehitetyn TiC-Ni -suojamateriaalin kanssa. Tulosten verifiointiseksi tulee vielä valmistaa uusi erä eri paksuisia koelevyjä ammuntakokeisiin.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Vuoden 2019 aikana tavoitteena on koostaa julkaisu mallinnusavusteisen materiaalisuunnittelun mahdollisuuksista ballististen suojamateriaalien suunnittelussa.