

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Seuraavan sukupolven Ballistiset Keraamit

Tomi Lindroos, Matti Lindroos
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Sinitaival 6, PL1300, 33101 Tampere
tomi.lindroos@vtt.fi

Tiivistelmä: Ballistisen suojauksen vaatimukset kasvavat koko ajan. Ballististen suojarakenteiden kehitykseen on haettu esimerkkiä luonnossa esiintyvistä rakenteista, eräs suurta mielenkiintoa herättänyt luonnonrakenne on simpukankuori, joka omaa erittäin hyvän lujuuden yhdistettynä korkeaan murtositkeyteen. Projektissa todennettiin monitasoisen materiaalimallinnuksen keinoin asetettu hypoteesi todeksi: kaksifaasinen, lamellaarinen keraamirakenne jakaa ballistisen iskun energiaa tehokkaammin ja kasvattaa näin ballistista suorituskykyä. Mallinnustyön rinnalla kehitettiin edullisiin raaka-aineisiin perustuvaa reaktiivisella kuumapuristuksella valmistettavaa alumiinioksidi-boorikarbidi keraamikomposiittia.

1. Johdanto

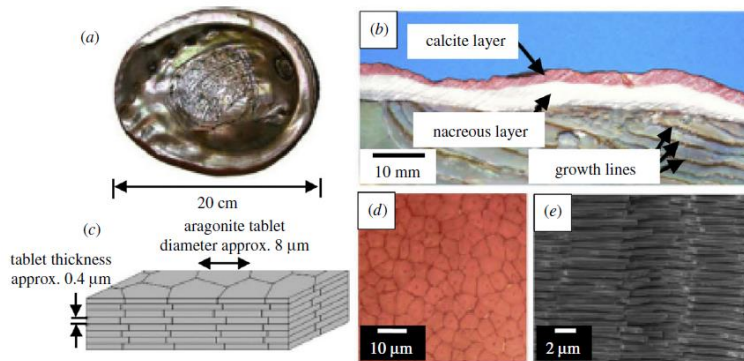
Ballistisen suojauksen vaatimukset kasvavat koko ajan. Suojauskyvyn kasvattaminen ja samanaikainen painon alentaminen edellyttävät yhä kehittyneempien ja suorituskykyisempien materiaalien ja materiaaliyhdistelmien käyttöä. Ballistisella suojauksella ymmärretään yleensä luodeilta, sirpaleilta ja usein myös teräaseilta 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 poliisin työnkuvaan. Tilanne on kuitenkin muuttumassa, sillä siviilisektorilla monet uudet ja enustamattomat 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 kovametallitytimisiä 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 moniosumakestävyyttä.

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 tehokkaasti iskuenergian laajemmalle alueelle ja aiheuttaa näin rakenteessa

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			

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 mikroskooppisista 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].

Simpukankuoren rakennetta on yritetty matkia suunniteltaessa uusia ballistisia suojamateriaaleja. Tutkitut ratkaisut ovat tyypillisesti olleet makroskooppisia komposiittirakenteita, jotka koostuvat keraamisista tai metallisista levymäisistä kappaleista pehmeässä polymeerimatriisissa [3]. Tutkimukset ovat osoittaneet, että lamellaarisella rakenteella voidaan kasvattaa ballistista suorituskykyä jonkin verran, mutta simpukankuoren tyyppistä huikaa hyppäystä ominaisuuksissa ei saavuteta. Viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että simpukan kuoren käyttäytymistä vastaavien ominaisuuksien saavuttaminen edellyttää komposiittirakennetta mikrorakennetasolla.

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, ja tätä kautta ymmärtää niissä 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.

Tavoiteltaessa kevyttä, korkean kovuuden omaavaa ja kustannustehokasta uuden sukupolven keraamia, boorikarbidin ja alumiinioksidin yhdistelmä tarjoaa mielenkiintoisia ominaisuuksia. Kaksifaasirakenteen ansiosta materiaalissa yhdistyvät suuri kovuus ja bulkkikeraameja korkeampi murtositkeys ja keveys [4]. Kaksifaasirakenne pienentää myös boorikarbidin ominaisuuksien heikkenemistä suurilla iskuenergioilla, lisäksi viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että boorikarbidia voidaan stabiloida pienellä piin (Si) lisäyksellä [5]. Boorikarbidin käyttöä tyypillisesti rajoittaa myös raaka-aineen ja valmistuskustan-

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)

³ Ballistic Impact Behavior of Nacre-Like Laminated Composites Consisting of B4C Tablets and Polyurea Matrix, M. Grujicic, et al. JMEPEG (2016) 25:977–994

⁴ Microwave synthesis of B4C-Al2O3 composite in a mechanical activated Al/B2O3/C powder mixture, E. Shaker et al., Iran J. Mater. Sci. and Eng. (2015)

⁵ Stabilization of boron carbide via silicon Doping J E Proctor, J. Phys.: Condens. Matter 27 (2015)



nusten korkeahko hinta. Hyödyntämällä uusia valmistusmenetelmiä, kuten reaktiivista kuumapuristusta voidaan vaikuttaa merkittävästi valmistuskustannuksiin.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

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

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

Kokonaistavoite koostuu 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 että käytännön ammutakokein

Tavoiteltava neliöpaino 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 [6].

Projekti on suunniteltu kaksivuotiseksi, ensimmäisenä projektivuonna tutkittiin synteettisten mikrorakennemallien avulla potentiaalisia rakenteita sekä kehitettiin $\text{B}_4\text{C}-\text{Al}_2\text{O}_3$ -pohjaisten koostumusten reaktiivista kuumapuristusta. Toisena projektivuotena on tarkoitus siirtyä hyödyntämään todellisia mikroskopiakuviin perustuvia mikrorakennemalleja ballistisen iskutapahtuman tutkimiseen. Simulointitulosten pohjalta muokataan materiaali-koostumusta ja faasirakennetta sekä kehitetään valmistustekniikkaa edelleen haluttujen materiaalirakenteiden saavuttamiseksi. Kehitetyille materiaaleille suoritetaan mekaanista testausta sekä ballistista suorituskyvyn testausta ampumakokein. Työtä suunnataan tarpeen mukaan sen edistyessä yhdessä ohjausryhmän kanssa.

Tutkimustyön teema-alueita ovat:

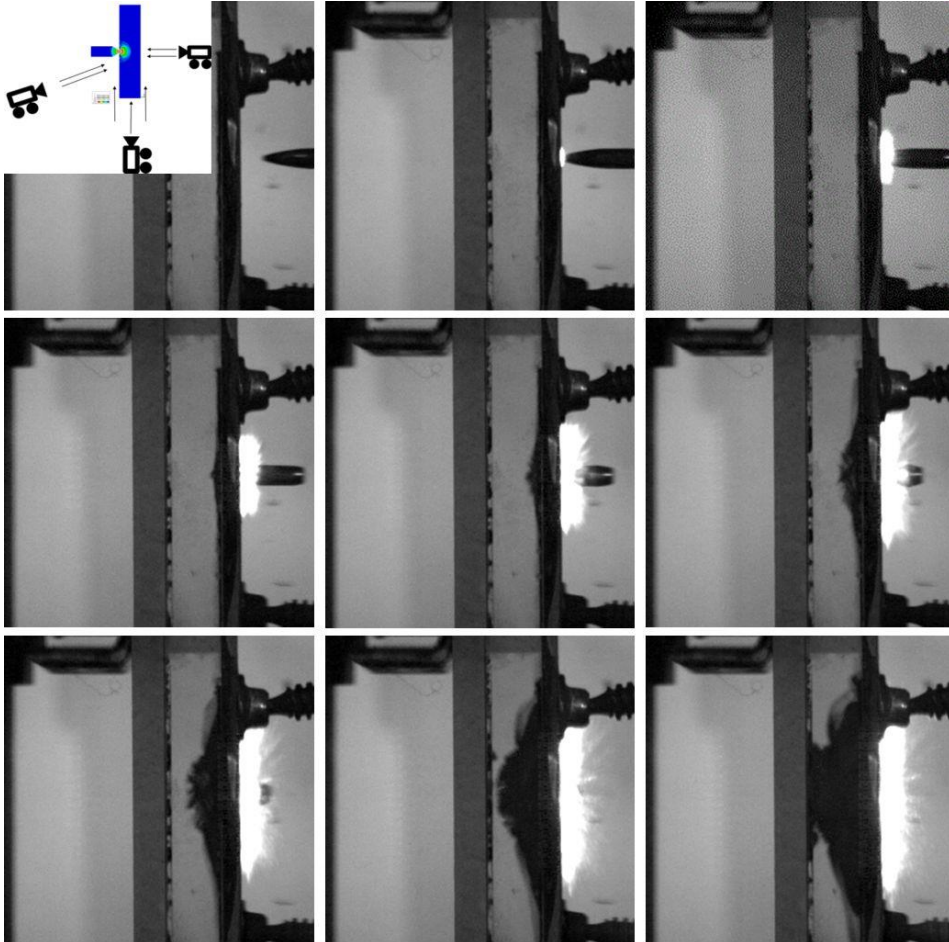
- Luonnossa esiintyvien rakenteiden jäljittely synteettisillä mikrorakennemalleilla vaikutusmekanismien ymmärtämiseksi sekä kokeellisen työn lähtöarvojen määrittämiseksi.
- Reaktiivisen kuumapuristuksen hyödyntäminen kaksifaasisen lamellaarisen $\text{B}_4\text{C}-\text{Al}_2\text{O}_3$ -perustaisen keraamin valmistuksesta edullisista raaka-aineista.
- Saavutettavan suorituskyvyn arviointi laskennallisia ja kokeellisia menetelmiä hyödyntäen.

3. Aineisto ja menetelmät

Suoritettu työ pohjautui pitkälti aikaisemmassa Ballististen Materiaalien mallinnusavusteinen kehitys -projektissa (BaMa) luotuihin mallinnustyökaluihin. BaMa-projektin lopussa avautui mahdollisuus suurnopeuskuvauksiin Exote Oy:n koeammuntaradalla. Suurnopeus-

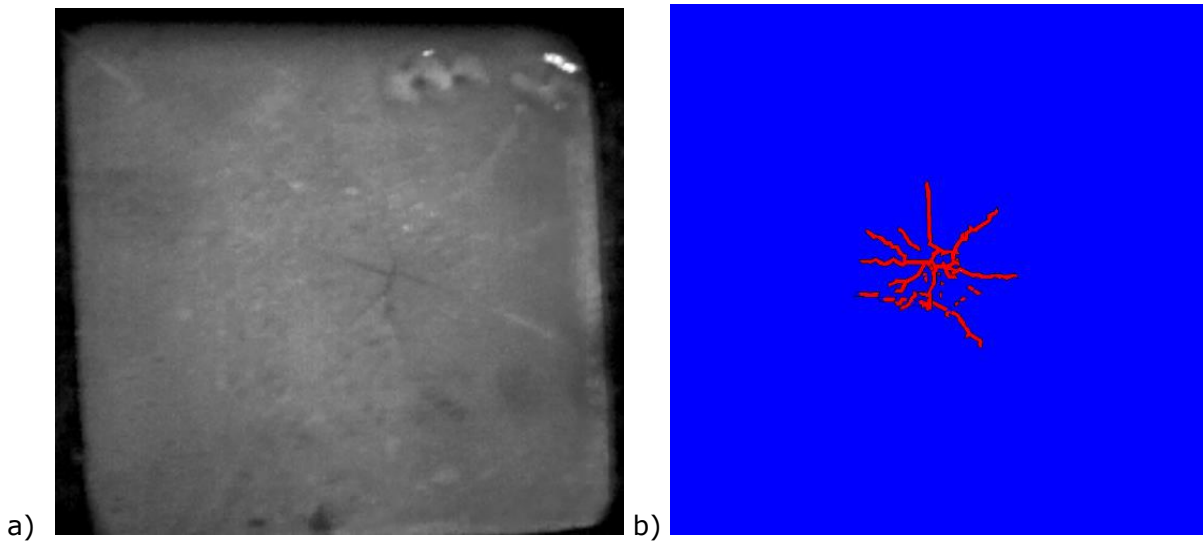
⁶ *Hard Body Armor Insert Plates BAE Systems (2008)*

kuvauksia varten valmistettiin koerakenteita, joissa Exote-materiaali oli yhdistetty läpinäkyvään polykarbonaatti-taustaan, näin koerakenteiden käyttäytymisestä saatiin tietoa useammasta suunnasta kuvattuna (Kuva 2).



Kuva 2: Suurnopeuskuvaukset läpinäkyvällä taustamateriaalilla mallinnustulosten verifiointiin, kuvausnopeus 200 000 fps.

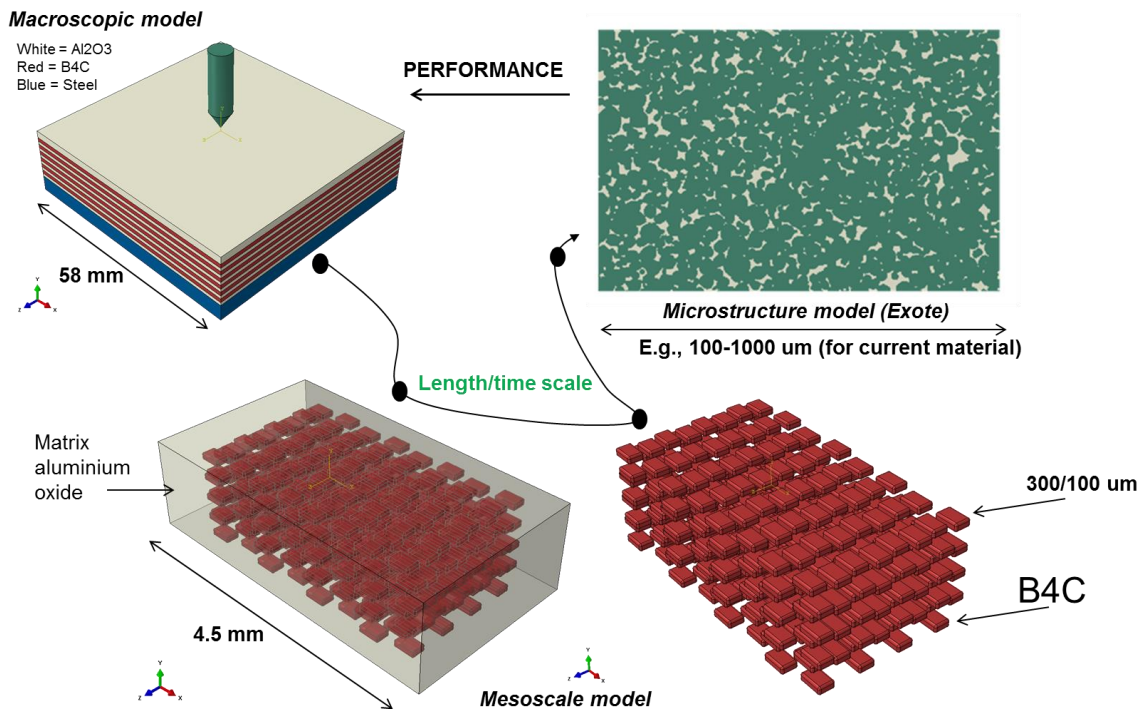
Jo BalMa-projektin yhteydessä voitiin osoittaa kehitettyjen materiaalmallien kykenevän ennustamaan rakenteen suojauskyky hyvällä tarkkuudella. Tätä validointityötä jatkettiin mallintamalla suurnopeuskuvauksissa käytettyjä koerakenteita. Tutkimuksen pääfokuksen ollessa materiaalikehityksessä, validoinnissa keskityttiin erityisesti siihen, miten kehitetyt mallit pystyvät kuvaamaan murtumien synnyn sekä edelleen murtumien etenemisnopeuden materiaalissa. Murtumien ydintymistä ja etenemistä tutkittiin koejärjestelyllä, jossa suurnopeuskuvaus suoritettiin taustan puolelta kohtisuoraan luodin tulosuuntaa vastaan. Kuvassa (Kuva 3) on esitetty murtumat noin 5 μ s murtumien ydintymisen jälkeen a) suurnopeuskuvauksessa sekä vastaavasti b) mallintamalla. Kuvia vertailtaessa voidaan todeta mallinnustuloksen vastaavan hyvin suurnopeuskuvauksessa havaittua murtumakäyttäytymistä. Johtopäätöksenä voidaan todeta mallinnustyökalujen olevan riittävällä tasolla uusien materiaali koostumusten suunnitteluun.



Kuva 3: Murtumien ydintyminen ja eteneminen ballistisen suojalevyn taustapinnalla a) suurenopeuskuvauksena b) materiaalmalli.

Synteettiset materiaalmallit

Mallinnuksen lähestymistavaksi valittiin eteneminen makroskaalan malleista kohti mikrorakenteen mallinnusta, näin meso- ja mikroskaalan mallinnustulokset voidaan heti linkittää makrotason suorituskykyyn. Alkuperäisen suunnitelman mukaisesti mallinnus aloitettiin alumiinioksiidiin (Al_2O_3) ja boorikarbiidiin (B_4C) perustuvilla synteettisillä malleilla, lähestymistapa kuvattu kuvassa (Kuva 4).



Kuva 4: Mallinnusreitti makromallista mikrorakenteeseen.

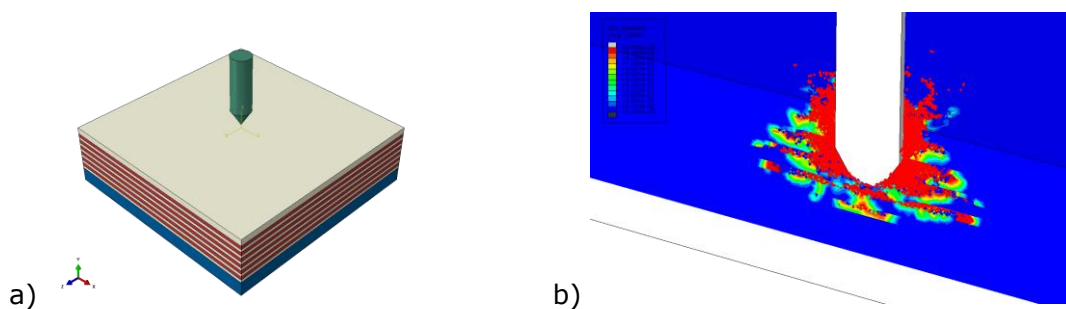
Mallinnustyön rinnalla aloitettiin kokeellinen työ kaksifaasisen $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ komposiittimateriaalin valmistamiseksi. Työn lähtökohtana olivat edulliset raaka-aineet, jotka mahdollistavat materiaalisynteesin reaktioyhtälön (1) mukaisesti.



Projektin valmisteluvaiheessa suoritetuissa esikokeissa kyseinen reaktio todettiin mahdolliseksi, lisäksi faasien havaittiin suuntauvan kuumapuristuksen suunnan mukaisesti.

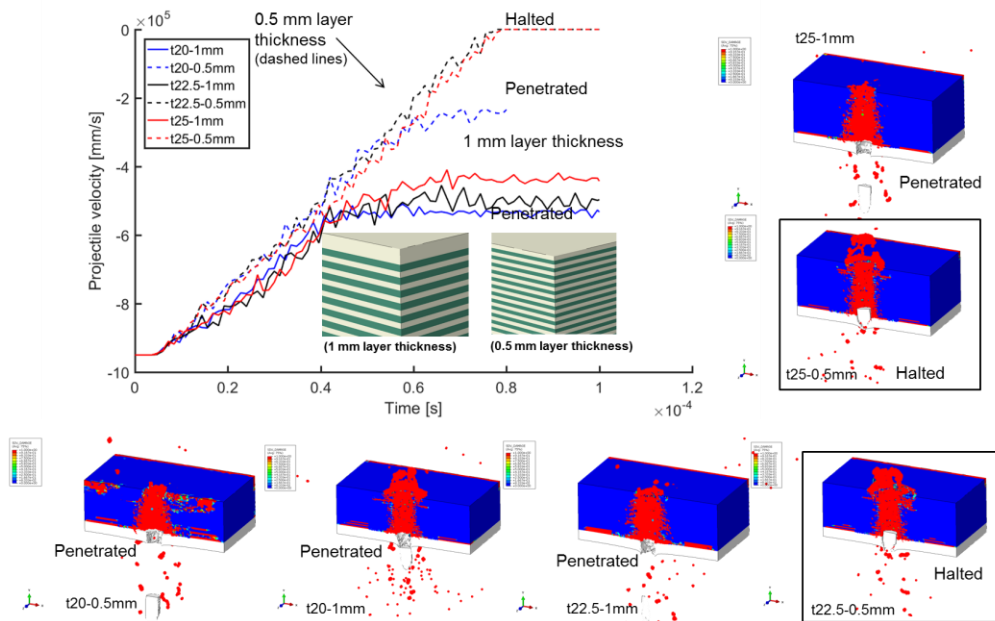
4. Tulokset ja pohdinta

Mallinnustyö aloitettiin makroskaalan mallilla, joka koostuu yhtenäisistä Al_2O_3 ja B_4C kerroksista (Kuva 5 a). Mallissa molemmilla faaseilla on omat dynaamiset materiaali- ja vauriomallit, lisäksi projektiililla on oma dynaaminen vaurioitumisen huomioiva materiaalmalli. Projektiin tunkeutuessa lamellirakenteeseen voidaan helposti havaita (Kuva 5 b) miten vaurioituminen suuntautuu materiaalirajapinnoilla ja näin ollen jakaa iskuenergiaa suuremmalle alueelle. Tämän havainnon perusteella voidaan todeta, että hypoteesi kaksifaasirakenteen käyttäytymisestä pitää hyvin paikkansa ainakin makrotasolla.



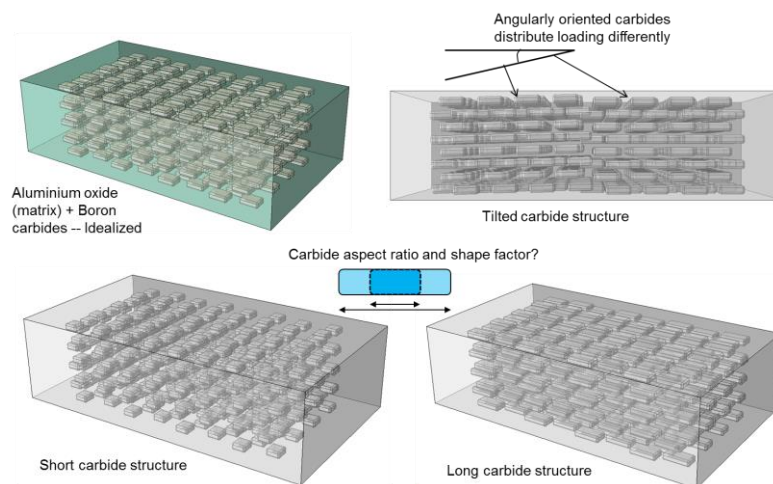
Kuva 5: Makroskooppisen lamellirakenteen malli (a) sekä materiaalin vaurioituminen ballistisessa iskussa (b).

Havainnon perusteella vaurioituminen muuttaa suuntaa rajapinnan kohdatessaan. Tämän perusteella voidaan olettaa, että lamellien paksuudella on merkitystä energian absorptiokykyyn. Läpäisyä tutkittiin kahdella eri lamellipaksuudella, 1 mm ja 0,5 mm, lisäksi rakenteen kokonaispaksuutta kasvatettiin kunnes projektiili saatiin pysäytettyä (Kuva 6). Kuvaajassa esitetyistä projektiilin nopeusprofiileista voidaan selvästi huomata, miten ohuempi lamellirakenne hidastaa tehokkaammin projektiilia heti iskuhetken alusta alkaen. Projektiili pysähtyy 0,5 mm lamellirakenteeseen kokonaispaksuudella 22,5 mm, vastaavasti 1 mm lamellirakenteen tapauksessa projektiililla on vielä nopeutta jäljellä 500 m/s. Havainnon perusteella voidaan todeta, että lamellin paksuudella on erittäin suuri vaikutus energian absorptiokykyyn. Tässä vaiheessa tutkimusta ei kuitenkaan voida vielä ottaa kantaa siihen, mikä olisi optimaalinen lamellien paksuus. Hyödyntämällä optimointityökaluja tämä on mahdollista selvittää, mutta tehtävän ratkaisu ottaa huomattavan paljon laskenta-aikaa. Lisäksi on huomioitava, että tämän hetkessä mallissa $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ rajapinta on kuvattu kohtuullisen yksinkertaisesti, joten ennen pidemmälle meneviä päätelmiä laskentamallin validointia tulee tehdä koerakenteilla.



Kuva 6: Lamellipaksuuden vaikutus pysäytyskykyyn.

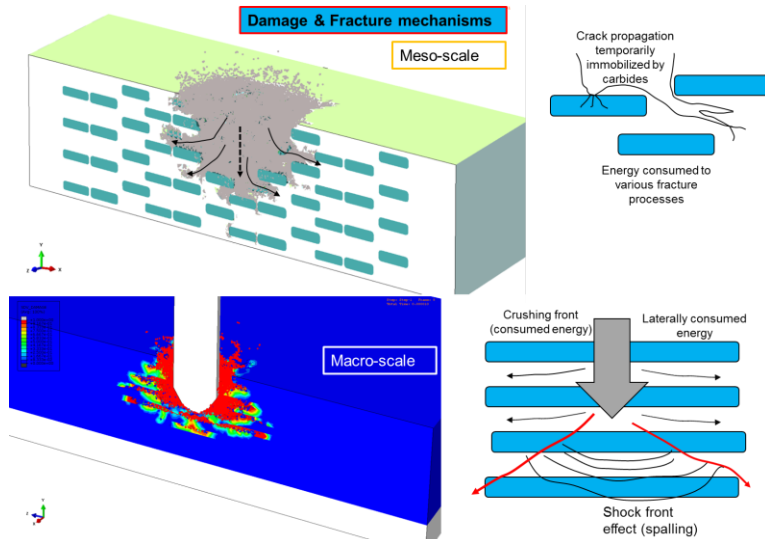
Makroskaalan mallinnuksen rinnalla aloitettiin synteettisten mesoskaalan mallien rakentaminen. Materiaalirakenne koostuu jaksollisista B_4C "tiilistä" Al_2O_3 matriisissa. B_4C tiilien mittoja varioitiin välillä 100-300 μm , lisäksi tutkittiin projektiilin ja B_4C tiilen välisen kulman vaikutusta, rakenne-esimerkit esitetty kuvassa (Kuva 7).



Kuva 7: Mesoskaalan malli $B_4C-Al_2O_3$ -rakenteesta, jossa jaksollinen tiilirakenne boorikarbidia.

Samalla tapaa kuin makroskooppisen lamellirakenteen kohdalla projektiilin aiheuttaman säröytymisen kohdatessa $B_4C-Al_2O_3$ -rajapinnan, säröytyminen ohjautuu rajapinnan mukaan ja näin ollen jakautuu isommalle alueelle kuluttaen enemmän energiaa. B_4C tiilien sivumitan kasvaessa säröjen ohjautuminen tehostuu. Sama ilmiö havaitaan, kun projektiilin ja B_4C tiilien kulma poikkeaa kohtisuorasta kontaktista. Kokosuhteen vaikutuksia tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava, että käytetyissä mallissa myös tilavuussuhteet muuttuvat muutettaessa B_4C tiilien kokoa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että asetetun hypoteesin mukaisesti lamellaarinen rakenne ohjaa iskuenergiaa suuremmalle alueelle makro- ja mesoskaalan mallien perusteella (Kuva 8).



Kuva 8: Iskuenergian jakautuminen meso- ja makroskaalan simuloinneissa.

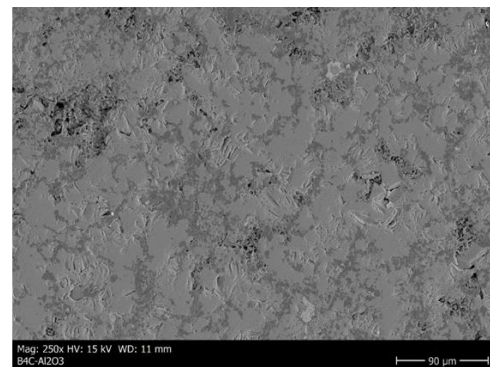
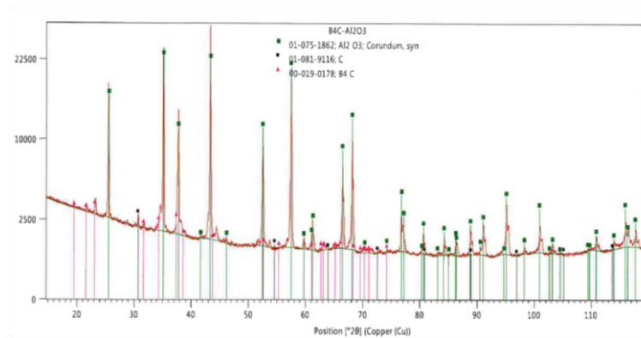
Kaksifaasikeraameja reaktiivisella kuumapuristuksella

Reaktiivisessa kuumapuristuksessa hyödynnetään lähtöaineiden reaktiossa syntyvää lämpöä avustamassa materiaalin sintrautumista. Boorikarbidin korkea sulamispiste (2763 °C) tarkoittaa käytännössä korkeaa sintrauslämpötilaa ja tätä kautta nostaa prosessointikustannukset huomattavan korkeiksi. Reaktiivisella kuumapuristuksella voidaan minimoida ulkoisen energian tarve hyödyntämällä reaktiossa ($B_2O_3 + Al + C \Rightarrow B_4C + Al_2O_3$) muodostuvaa lämpöä. Prosessiparametrien hallitseminen on keskeisessä asemassa tasalaatuisen ja tiiviin materiaalin valmistamisessa, koska reaktiolämpö vapautuu hyvin lyhyessä ajassa, puristuksen aikaikkuna on hyvin pieni. Keraamien tapauksessa materiaalin jäähtyminen korkeasta prosessilämpötilasta aiheuttaa myös helposti halkeilua kappaleisin. Kuvassa (Kuva 9) on esitetty reaktiivisella kuumapuristuksella valmistettu $Al_2O_3-B_4C$ -koelevy, joka on haljennut jäähtyessä kahtia.



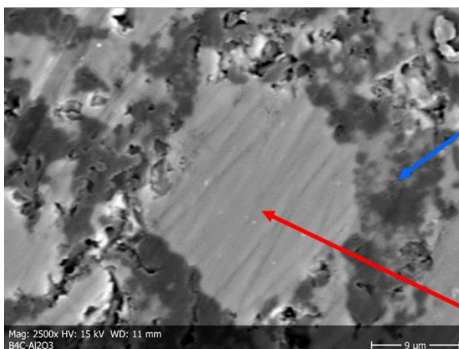
Kuva 9: Reaktiivisella kuumapuristuksella valmistettu $Al_2O_3-B_4C$ -koelevy, mitat 100 mm x 100mm x 10 mm.

Oikeiden prosessiparametrien löytämiseksi tehtiin laaja koesarja testilevyjä, joista parhaimpien ominaisuudet karakterisoitiin. Parhailla prosessiparametreilla saavutettiin kohtuullisen tiiviitä kappaleita. Kuvassa (Kuva 10) on esitetty röntgendiffraktiolla (XRD) määritetty faasirakenne sekä pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) kuvattu mikrorakenne. XRD määrittelyn perusteella materiaali koostuu lähes pelkästään B_4C ja Al_2O_3 faaseista reaktioyhtälön mukaisesti. SEM mikrorakenne kuvasta voidaan havaita vaaleampi Al_2O_3 faasi ja hieman tummempi B_4C faasi, tummimmat alueet ovat huokoisuutta tai näytteen valmistuksessa muodostuneita rakennevirheitä.



Kuva 10: Röntgendiffraktiolla määritetty faasirakenne sekä materiaalin mikrorakenne (SEM).

Kehitystyön seurauksena materiaalin huokoisuutta onnistuttiin vähentämään merkittävästi. Samalla kuitenkin menetettiin esikokeissa havaittu faasien suuntautuminen. Tarkasteltaessa mikrorakennetta suuremmalla suurennoksella (Kuva 11), voidaan selkeästi havaita vaalean Al_2O_3 faasin muodostavan käytännössä huokoisettoman alueen, huokoisuuden keskittyessä faasin rajapinnalle ja B_4C faasiin. Tämä havainto antaa viitteitä siitä, että Al_2O_3 on prosessissa sulatilassa, kun taas B_4C muodostuu kiinteässä tilassa eikä näin ollen tiivisty kunnolla prosessissa. Lamellaarisen rakenteen häviämien liittyy oletettavasti prosessilämpötilaan, kylmemmillä prosessiparametreilla Al_2O_3 on vain osittain sulana, jolloin puristus muokkaa faasialueen puristuksen suuntaiseksi.



Quantitative Results								
Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF
B	Ka	169.4	18.0571	0.7271	0.3728	65.85	82.14	0.5661
C	Ka	47.2	18.0571	0.0179	0.0092	11.93	13.40	0.0770
O	Ka	42.4	18.0571	0.0062	0.0032	1.41	1.19	0.2251
Al	Ka	778.7	41.0013	0.0712	0.0365	4.28	2.14	0.8520
Au	La	18.4	0.9218	0.1775	0.0910	16.52	1.13	0.5510
				1.0000	0.5127	100.00	100.00	

Quantitative Results								
Elt	XRay	Int	Error	K	Kratio	W%	A%	ZAF
O	Ka	441.5	14.2329	0.4408	0.2774	53.78	66.24	0.5159
Al	Ka	895.5	1895.3965	0.5592	0.3520	46.22	33.76	0.7614
				1.0000	0.6294	100.00	100.00	

Kuva 11: Al_2O_3 - B_4C mikrorakenteen tarkempi analyysi

5. Loppupäätelmät

Suoritetut tehtävät osoittivat selkeästi mallinnusavusteisen materiaalikehityksen mahdollisuudet. Käytännössä simuloimalla voitiin osoittaa tutkimushypoteesin mukaisten ilmiöiden olemassaolo muutamassa kuukaudessa, kun vastaavan tuloksen aikaansaaminen puhtaasti kokeellisella lähestymistavalla olisi kestänyt helposti vuosia. Monitasomallinnuksen avulla voidaan kohtuullisella työmäärällä tuottaa runsaasti tietoa, miten faasiosuudet ja niiden kokojakauma vaikuttavat ballistiseen suorituskäyttöön. Mallien avulla voidaan myös hyödyntää tehokkaita optimointialgoritmeja rakenteen suunnitteluun. Selkeänä haasteena on se, miten mallinnustulokset yhdistetään osaksi kokeellista työtä. Tämän hetkellä simulointityökaluilla voidaan lähinnä määrittää suuntaviivoja siitä, minkälaiseen rakenteeseen kokeellisella työllä pitäisi tähdätä. Seuraava luonnollinen kehitysskaskel on prosessimallien mukaan ottaminen muodostuvan mikrorakenteen ennakoimiseksi, mutta tämä on vielä muutaman kehitysvuoden päässä. Käytännössä tällä hetkellä suoraviivaisin tapa mallinnuksen kokonaisvaltaiseen hyödyntämiseen on valmistettujen materiaalien mikrorakenteiden hyödyntäminen mallinnuksen perustana, tähän tarvittavat työkalut ovat olemassa. Seuraavassa vaiheessa siirrytään hyödyntämään reaktiivisella kuumapuristuksella valmistetun $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ materiaalin oikeaa mikrorakennetta. Prosessikehityksessä kehitystyö osoitti, että kaksifaasisista keraamia pystytään valmistamaan, mutta prosessiparametrien optimoinnissa on vielä työtä tiiviiden kasvattamiseksi sekä kappaleen halkeilun estämiseksi. Oletusarvoista on, että kaksifaasinen keraami jakaa jo sinällään tehokkaasti iskuenergiaa, mutta lamellaarinen rakenne olisi todennäköisesti vielä tehokkaampi. Lamellaarista rakennetta lähdetään tavoittelemaan toisena tutkimusvuotena kerrostamalla raaka-aineet tietyssä järjestyksessä puristusmuottiin ennen prosessointia.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Ensimmäisen tutkimusvuoden aikana ei ole tuotettu tieteellisiä julkaisuja. Vuoden 2018 aikana tavoitteena on koostaa julkaisu mallinnusavusteisen materiaalisuunnittelun mahdollisuuksista ballististen suojamateriaalien suunnittelussa.

7. Hankkeen seuraajan lausunto raportista

Projektin ohjausryhmän kokouksessa 6/2017 työtä päätettiin jatkaa alkuperäisten suunnitelmien mukaisesti sekä kannatettiin yksimielisesti jatkohakemuksen laatimista vuodelle 2018. Tämän jälkeen saavutetut tulokset tukevat tehtyä päätöstä.
