

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Ballististen Materiaalien mallinnusavusteinen kehittäminen - BalMa

Tomi Lindroos, Anssi Laukkanen, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Sinitaival 6, PL1300, 33101 Tampere

tomi.lindroos@vtt.fi

Tiivistelmä

Ballististen suojamateriaalien ja rakenteiden kehittäminen on perinteisesti ollut kokeellista tutkimustoimintaa, jolloin uusien ratkaisujen kehittäminen on edellyttänyt laajojen koematriisien valmistamista ja testaamista. Tämän seurauksena kehityskustannukset nousevat helposti suuriksi, eikä täysin uusia ratkaisuja lähdetä kehittämään. Hyödyntämällä uusia, kehittyneitä mallinnus- ja simulointityökaluja on mahdollista ymmärtää paremmin monimutkaistenkin materiaalien ja rakenteiden käyttäytymistä, nopeuttaa kehitysprosessia ja päästä lähemmäs optimaalista ratkaisua. Projektin kokonaistavoitteena on kehittää työkaluja, jotka mahdollistavat entistä tehokkaampien suojausmateriaalien ja rakenteiden kehittämisen nopeammin ja kustannustehokkaammin. Projektissa luodaan perusteet materiaalien ja rakenteiden mallinnusavusteiselle suunnittelulle ja lisätään tätä kautta ymmärtämystä materiaalien käyttäytymisestä ballistisessa iskussa.

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. Suojusratkaisut, 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 ennustamattomat turvallisuusuhat ovat kasvussa ja koko ajan pahenemassa.

Nykyiset ballistiset suojaratkaisut ovat yleensä joko pehmeitä kudotuista kankaista tehtyjä monikerroksisia suojaneeleita tai ballistisia kuituja sisältäviä kovia ja jäykkiä muovikomposiitteja. Järeämmän suojaustason kohteissa käytetään myös ballistisia keraamita tai teräslevyjä. Uhkakuvasta riippuen suojaratkaisut voivat olla myös kaikkien edellä mainittujen erilaisia yhdistelmiä. Haettaessa suojaa korkean läpäisykyvyn ammuksia, kuten teräs- ja kovametalliytimisiä luoteja, vastaan ballistinen suojusratkaisu on lähes poikkeuksetta keraamin ja sitkeän taustarakenteen yhdistelmä. Käytettyjä keraamilaatuja ovat alumiinioksidi, piikarbidi ja boorikarbidi, joista alumiinioksidi on yleisin alhaisimman hintansa vuoksi. Puhtaiden keraamien heikkoutena on kuitenkin niiden hauraus, joka heikentää ko. materiaalista valmistettujen suojarakenteiden käsiteltävyyttä sekä erityisesti moniosumakestävyyttä. Parempaa sitkeyttä on tavoiteltu kehittämällä metalli-

keraamikomposiitteja, joissa yhdistyvät korkea kovuus ja sitkeys ja joista hyvänä esimerkkinä VTT:llä aiemmin kehitetty Exote suojamateriaali.

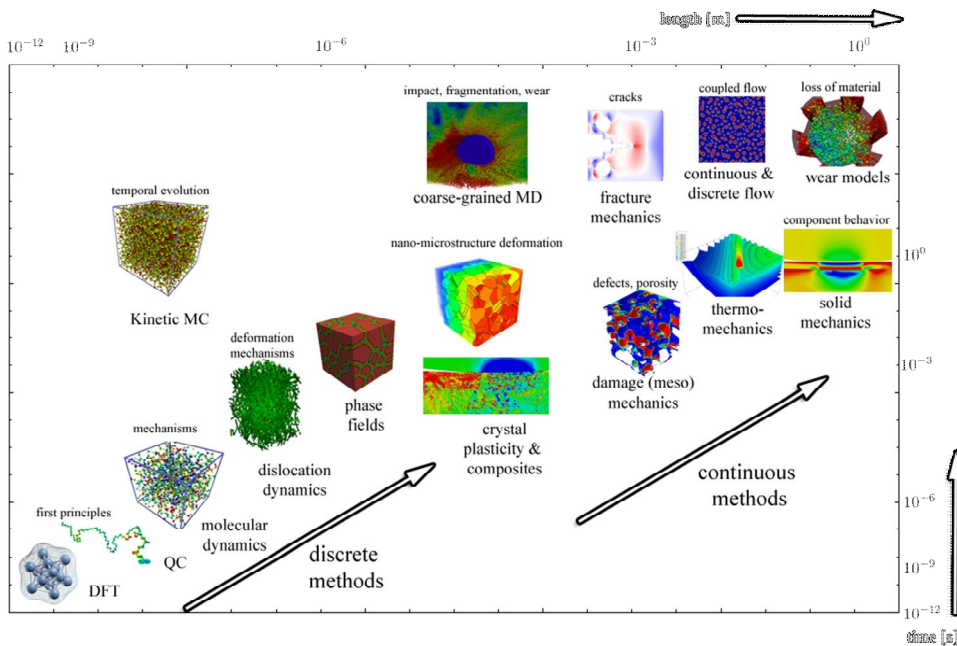
Ballististen suojamateriaalien ja rakenteiden kehittäminen on perinteisesti ollut kokeellista tutkimustoimintaa. Uusien ratkaisujen kehittäminen on tyypillisesti edellyttänyt laajojen testimatriisien valmistamista ja testaamista, minkä seurauksena kehityskustannukset nousevat helposti merkittäviksi. Laajoista koesarjoista huolimatta puhtaasti kokeellisiin menetelmiin perustuvalla kehitystyöllä on vaikeaa tai jopa mahdotonta löytää optimaalisia ratkaisuja, erityisesti useista materiaalikomponenteista koostuvien rakenteiden tapauksessa.

Hyödyntämällä uusia, kehittyneitä mallinnus- ja simulointityökaluja on mahdollista ymmärtää paremmin monimutkaistenkin materiaalien ja rakenteiden käyttäytymistä, nopeuttaa kehitysprosessia ja päästä lähemmäs optimaalista ratkaisua. Tietokoneiden laskentakapasiteetin kasvu yhdistettynä uusien ohjelmistojen tarjoamiin mahdollisuuksiin kuvata eritasoisia ilmiöitä mahdollistaa täysin uudentyypin lähestymisen uusien materiaalien ja rakenteiden kehittämiseksi entistä nopeammin ja kustannustehokkaammin.

Perinteisesti mallinnusaktiviteetit ovat rajoittuneet rakenteiden ja ballistisen iskun karkeahkoon FE mallinnukseen. Makroskooppisilla rakennemalleilla ei kuitenkaan pystytä kuvaamaan kaikkia vuorovaikutuksia, joista tutkittavan komponentin suorituskyky muodostuu. Niin sanotun monitasomallinnuksen (multi-scale modelling) avulla malliin voidaan luoda yksityiskohtaisempia piirteitä aina elektroni- ja atomitasolle asti riippuen kuvattavan ilmiön mittakaavasta. Kuvassa 1 on esitetty monitasomallinnuksen askeleet eri mittakaavan ilmiöille. Monitasomallinnusta on käytetty menestyksekkäästi myös ballististen suojapaneelien kehitykseen. Suoritetut tutkimukset ovat kuitenkin rajoittuneet valtaosalta kuitumaisten materiaalien mallinnukseen [1,2].

¹ Xin Jia *et al.* Effect of Mesoscale and Multiscale Modeling on the Performance of Kevlar Woven Fabric Subjected to Ballistic Impact: A Numerical Study, *Appl Compos Mater* (2013) 20:1195–1214

² C. Ha Minh *et al.* Multi-scale Model to Predict the Ballistic Impact Behavior of Multi-layer Plain-woven Fabrics, *Int. J. Comput. Methods* DOI: 10.1142/S0219876213430111



Kuva 1. Monitasomallinnuksen askeleet eri mittakaavan ilmiöille.

Perinteisestä homogeenisoituihin materiaalimalleihin perustuvasta lähestymistavasta poiketen monitasomalleissa voidaan huomioida esimerkiksi kankaan rakenne ja kuitukimppujen väliset vuorovaikutukset. Mallintamalla kuiturakenteen yksityiskohtien käyttäytyminen ballistisessa iskussa voidaan vallitsevia ilmiöitä visualisoida ja tätä kautta selittää ja ymmärtää paremmin kuiturakenteen toimintaa. Yksityiskohtien mallintaminen mahdollistaa myös tehokkaiden optimointimenetelmien käyttämisen materiaalirakenteen suunnittelussa.

Monitasomallinnuksen laajempaa hyödyntämistä myös muissa kuin kuitupohjaisten ballististen suojarakenteiden suunnittelussa on rajoittanut metallisten ja keraamisten suojamateriaalien huomattavasti monimutkaisempi käyttäytyminen ballistisessa iskussa. Keraamien ja metallien monitasomallinnuksesta ballistisessa iskussa on kuitenkin olemassa muutamia korkeatasoisia julkaisuja, joissa on esitetty myös mallien validointi kokeellisin menetelmin [3].

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Projektin kokonaistavoitteena on kehittää työkaluja, jotka mahdollistavat entistä tehokkaampien (suojaustaso + neliöpaino) suojausmateriaalien ja rakenteiden kehittämisen nopeammin ja kustannustehokkaammin. Projektissa luodaan perusteet materiaalien ja rakenteiden mallinnusavusteiselle suunnittelulle ja lisätään tätä kautta ymmärtämystä materiaalien käyttäytymisestä ballistisessa iskussa.

Projektin tavoitteena on:

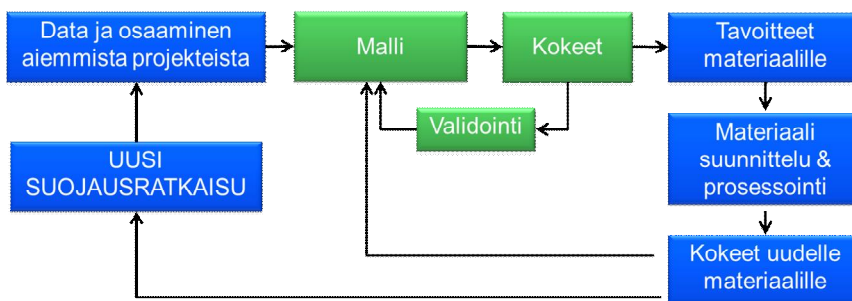
- Selvittää monitasomallinnuksen tämän hetkiset mahdollisuudet ja rajoitukset entistä tehokkaampien ballististen suojamateriaalien kehittämiseksi.
- Kehittää mikrorakennetason malleja, jotka mahdollistavat iskuenergian jakautumisen visualisoinnin mikrorakenteessa ja tätä kautta ymmärtää miten mikrorakennetta tulisi

³ G. A. Gazonas Multiscale Modeling of Armor Ceramics: Focus on AION, ARL-RP-337 2011

muokata suorituskyvyn kasvattamiseksi.

- Suorittaa kokeellista testausta (mekaaniset ominaisuudet, ampumakokeet) mallien verifiointiseksi ja mallinnuksen materiaaliparametrien määrittämiseksi.

Projektin on suunniteltu kaksivuotiseksi. Ensimmäisenä projektivuonna on luotu perusteet mallintaa kohtuullisen yksinkertaista ballistista iskutapahtumaa ja materiaalin mikrorakenteen käyttäytymistä. Mikäli projektille myönnetään jatkorahoitus, toisena projektivuotena kehitettyjä malleja tarkennetaan siten, että voidaan tutkia mikrorakennetaso muutoksien vaikutusta materiaalin käyttäytymiseen ja suorituskykyyn. Prosessikuvaus mallinnusavusteisesta suojausratkaisujen kehittämisestä on esitetty kuvassa 2, projektissa keskitytään kuvassa vihreällä merkittyyn mallinnustyökalujen kehittämiseen.



Kuva 2. Ballististen suojausratkaisuiden kehittäminen.

3. Aineisto ja menetelmät

Kirjallisuus

Tutkimus aloitettiin kirjallisuuskatsauksella ballististen materiaalien mallinnuksen state-of-art tason määrittämiseksi, keskittyen erityisesti monitasomallinnukseen. Kuitupohjaiset materiaalit rajattiin pääosin tutkimuksen ulkopuolelle.

Valtaosa monitasomallinnukseen keskittyvistä julkaisuista kuitenkin käsitteli kuitupohjaisia materiaaleja, joten tehtiin myös lyhyt katsaus aiheeseen, koskien lähinnä mesoskaalan ja makrotason mallien yhdistämistä. Mesoskaalan mallien avulla voidaan tutkia yksittäisten kuitutouvien (yarn) käyttäytymistä ballistisessa iskussa sekä edelleen kangaskudoksen käyttäytymistä mm. kuitutouvien välinen liukuminen. Jotta laskenta-ajat pysyvät järkevinä, yksityiskohtaisia malleja kannattaa käyttää vain niillä alueilla joilla kiinnostavat ilmiöt tapahtuvat. Kuvassa 3 on esitetty hyvä esimerkki eri tason mallien yhdistämisestä. Suurin osa kuitukangasrakenteesta on esitetty homogenisoituna mallina (R_{global}) ja yksityiskohtaisesti on kuvattu vain alue jolle projektiili osuu. Laskenta-ajan optimoimiseksi yksityiskohtaisemmassa mesotason mallissa on käytetty lisäksi hybridielementtejä eli hyödynnetty erityyppisiä ($R\#1$, $R\#2$, $R\#3$) elementtejä.



Kuva 3. Kuitukankaan monitasomallinnus hybridielementtejä hyödyntäen [2].

Metallisten ja keraamisten suojausmateriaalien kohdalla mallinnuksen juuret johtavat 1960-luvulle. Tutkimus on keskittynyt uusien entistä tarkempien materiaalimallien kehittämiseen sekä mallinnettujen arvojen kokeelliseen validointiin. Laskentakapasiteetin kasvaessa on ollut mahdollista siirtyä käyttämään malleja, jotka kuvaavat myös vaurioituneen materiaalin ominaisuuksia.

Eniten hyödynnettyjä materiaalien dynaamista käyttäytymistä kuvaavia malleja ovat metalleille Johnson-Cook ja keraameille Johnson-Holmquist, sekä näiden eri variaatiot. Malleja hyödynnettäessä on huomioitava, että suurin epätarkkuus johtuu yleensä lähtöarvoista. Ballistisessa iskussa esiintyvät materiaalien myötönpeudet ovat hyvin suuria, joten materiaalin mekaaninen käyttäytyminen poikkeaa merkittävästi staattisesta tilanteesta. Materiaaliparametrien määrittäminen suurilla myötönpeuksilla on oma tutkimushaaransa, joka edellyttää vaativia mittausjärjestelyjä sekä kokenutta käyttäjäkuntaa. Esimerkkinä Johnson-Cook yhtälö (1) dynaamisen myötölujuuden määrittämiseen.

$$\sigma_y = \left[A + B \bar{\epsilon}_p^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

, missä A staattinen myötölujuus, B muokkauslujittumiskerroin, n muokkauslujittumiseksponentti, $\dot{\bar{\epsilon}}_p$ efektiivinen plastinen muodonmuutosnopeus, $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ referenssi muodonmuutosnopeus, C myötönpeuskerroin ja m lämpötilasta aiheutuva pehmenemiseksponentti. T, T_r ja T_m ovat lämpötila, huoneen lämpötilan ja sulamislämpötila. Huomioinarvoista on, että parametrit voidaan määrittää toisistaan riippumattomasti mikä helpottaa parametrein määrittämistä.

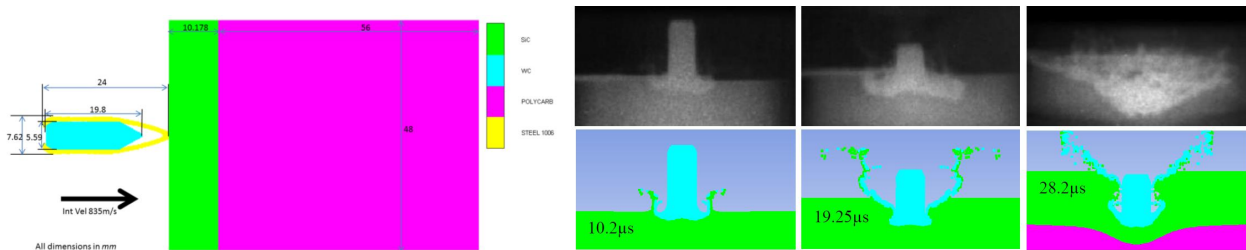
Dynaamisen myötölujuuden lisäksi on kyettävä kuvaamaan materiaalin vaurioituminen sekä edelleen vaurioituneen materiaalin lujuus, jotta malli pystyy kuvamaan todellista ballistista iskutapahtumaa, Johnson-Cook vauriomalli yhtälö (2).

$$D = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_f}, \quad \epsilon_f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{\sigma^m}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right], \quad (2)$$

Metallisten ja keraamisten suojausmateriaalien FE mallinnuksen tämän hetkinen state-of-art lähtee oletuksesta, että kerrosrakenteessa sekä keraamille että metallille on käytössä

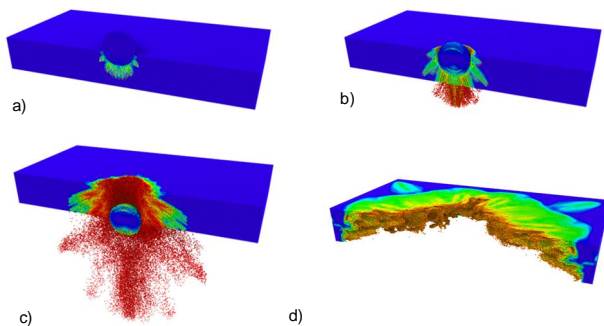
dynaaminen vauriomalli ja lisäksi myös projektiilille on oma mallinsa. Kirjallisuudessa esitetyt mallien väliset erot aiheutuvat pitkälti käytettyjen materiaaliparametrien tarkkuudesta. Esimerkiksi panssariluodin kovametallisen ytimen materiaaliparametrien selvittämiseksi on tehty paljon työtä eri tutkimuslaitoksissa.

Lemanski on tutkinut [4] materiaalimallien ja niiden parametrien vaikutusta kuvaamaan ballistista iskutapahtumaa. Kuvassa 4 on esitetty testitilanne, jossa 7.62mm FFV projektiili ammutaan 10 mm paksuun piikarbidikeraamiin iskunopeudella 835 m/s. Projektiilin kovametalliin on kuvattu hyödyntäen Johnson-Cook vauriomallia ja vastaavasti SiC on kuvattu Johnson-Holmquist vauriomallilla. Verrattaessa mallinnustuloksia suurnopeusröntgen läpivalaisulla otettuihin kuviin voidaan havaita, että malli kuvaa iskutapahtumaa varsin hyvin alkutilanteessa (10.2 μ s ja 19.25 μ s). Keraamin vaurioalueen (28.2 μ s) laajentuessa malli ei enää pysty kuvaamaan keraamin vaurioitumista tarkasti.



Kuva 4. 7.62mm FFV projektiilin iskeytymien 10 mm paksuun piikarbidikeraamiin iskunopeudella 835 m/s, mallinnuksen ja kokeellisten tulosten vertailu.

Vauriomekanismien tarkemmaksi kuvaamiseksi on kehitetty FE menetelmien rinnalle ns. partikkelipohjaisia menetelmiä (peridynamics). Kuvassa 5 on esitetty partikkelimenetelmällä toteutettu läpäisytilanteen laskenta, jolloin kyetään huomioimaan hyvinkin monimutkaisia vuorovaikuttavia vaurioprosesseja ja suojarakenteen ominaisuuksia. Yhdistämällä käytettävissä olevat monitasolaskentatekniikat kyetään tarkastelemaan kokonaisvaltaisesti sekä materiaalin että suojarakenteen käyttäytymistä ja suorituskykyä iskun aikana.



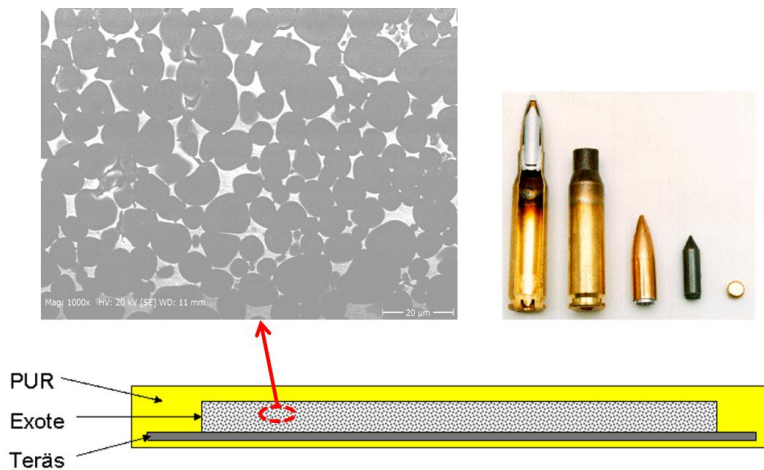
Kuva 5. Partikkelimenetelmäpohjaisesti toteutettu malli pallomaisen projektiilin iskeytymisestä keraamilevypintaan. a) – c), iskeytymisen eteneminen, d) lopputilanne törmäyksen jälkeen [5].

⁴ Shannon R. Lemanski, Computational Modelling of a Tungsten Carbide Projectile into Ceramic Faced Armour, Final Thesis Report 2013, UNSW@ADFA

⁵ Anssi Laukkanen, VTT

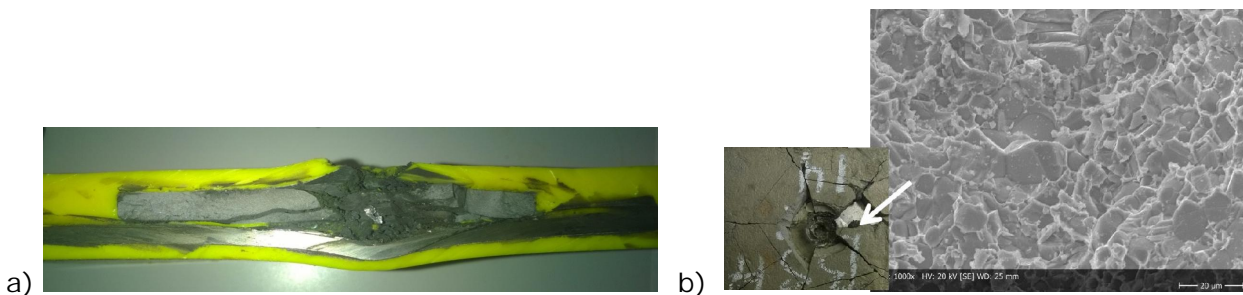
Tutkittava materiaali ja rakenne

Tutkittavaksi materiaaliksi valittiin Exote metallimatriisikomposiitti, jonka valmistuksesta ja ballistisesta käyttäytymisestä VTT:llä on paljon tausta-aineistoa. Exote-materiaali koostuu kovasta titaanikarbidifaasista ja sitkeästä metallimatriisista. Testirakenne, Exoten mikrorakenne sekä ammunnoissa käytetty 7.62 FFV projektiili on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Testirakenne ja 7.62 FFV ammuksen rakenne (kovametalliydin toinen oikealta).

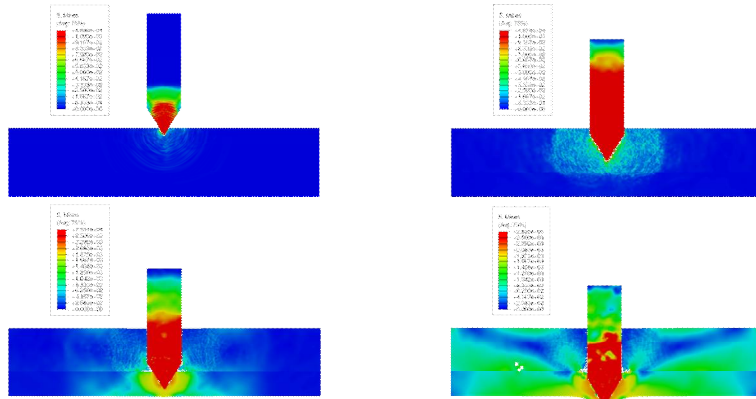
Kuvassa 7 a) on esitetty rakenteen poikkileikkaus ammutakokeen jälkeen (iskunopeus 950 m/s), Exote-levyyn muodostunut iskukartio on selkeästi havaittavavissa. Kovametallinen projektiili on murskautunut täysin ja ytimeistä sekä rakenteesta muodostuneet sirpaleet pysähtyneet terästaustaan. Vastaavasti kuvassa 7 b) on esitetty materiaalin murtopintaa läheltä projektiilin iskeytymiskohtaa. Kuvasta voidaan havaita murtuman etenevän sekä karbidifaasin läpi että myös metalli-keraami rajapintoja pitkin. Havaintojen perustella voidaan todeta, että sekä metallimatriisille että keraamille tulee käyttää dynaamista vauriomallia.



Kuva 7. Suojausrakenteen poikkileikkaus a) ammutakokeen jälkeen, b) materiaalin murtopintaa.

Materiaalin ja rakenteen mallinnus

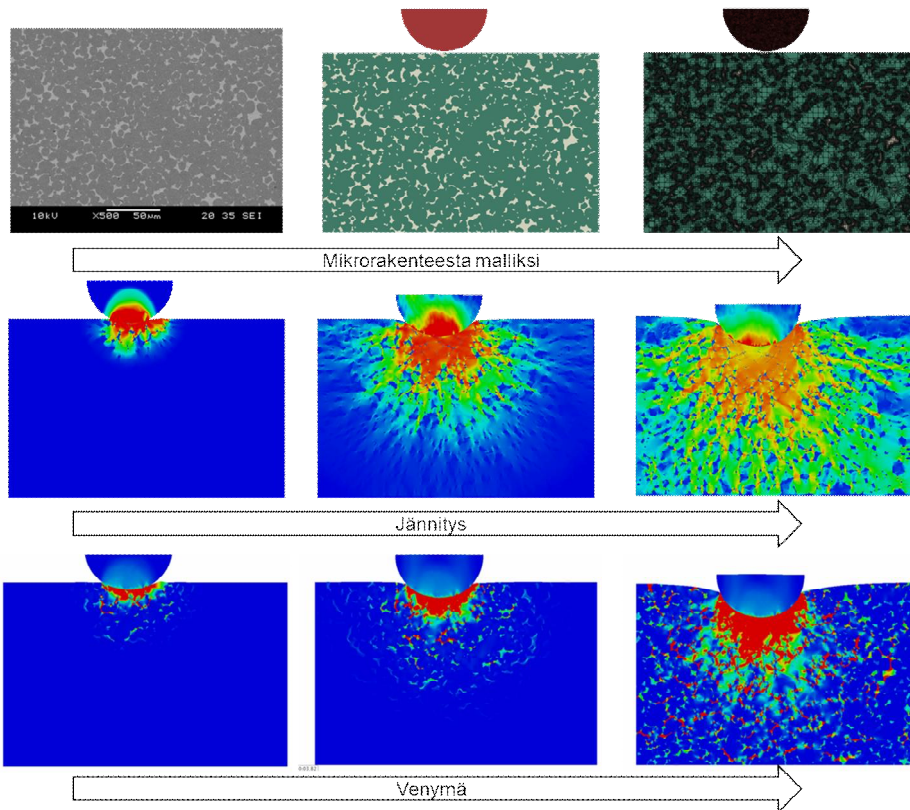
Mallinnustyö aloitettiin tekemällä tutkittavasta rakenteesta vastaava makrotason malli kuin kuvassa 4. Materiaalimallien parametreina käytettiin kirjallisuustutkimuksessa esiin tulleita parametreja. Ensimmäisessä vaiheessa (Kuva 8) käytettiin Johnson-Cook malleja (tilanteen yksinkertaistamiseksi ilman vauriomallia) teräkselle, Exote-materiaalille sekä projektiilin kovametalliytimelle. Keskeisenä tavoitteena oli varmistaa Exote-teräs rajapinnan sekä erityisesti projektiilin ja suojausmateriaalin välisten kontaktimallien toimivuus.



Kuva 8. Testirakenteen makrotason malli.

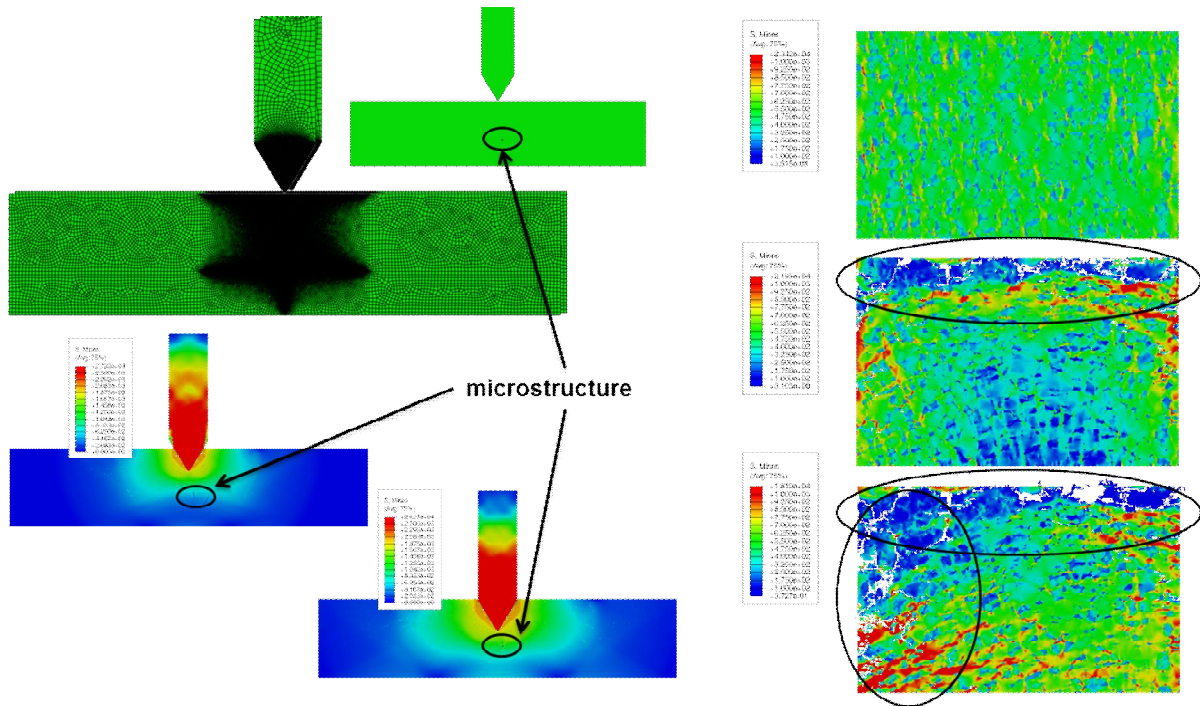
Monitasomallinnus aloitettiin Exote-materiaalin mikrorakenteen kuvauksella ja mikrotason mallin luomisella. Työssä hyödynnettiin VTT:llä aiemmissa projekteissa kehitettyjä monitasomallinnuksen työkaluja. Mallien pohjana hyödynnetään materiaalien oikeita mikrorakenteita ja tätä kautta voidaan kuvata miten esimerkiksi jännitykset jakautuvat eri faasien välillä ja niiden rajapinnoilla.

Exote-materiaalista luotiin mikrorakennetason malli, jossa molemmilla faaseilla on oma dynaaminen materiaalmalli sekä edelleen vauriomalli. Kovametalliselle projektiillille käytettiin lähteessä 4 esitettyä materiaalmallia. Kuvassa 9 on esitetty mikrorakenne ja siitä luotu verkotettu mikrotason FE malli sekä edelleen jännityksen ja venymän jakautumien rakenteessa projektiiliin iskeytyessä materiaalin pintaan. Mallista luotiin myös versio, jossa eri faasien dynaamiset mallit sisältävät vaurioitumismallin. Ensimmäisessä vaiheessa kiinnostavinta on tietää, mitä materiaalissa tapahtuu juuri sillä hetkellä kun projektiili osuu materiaalin pintaan, jonka vuoksi vauriomallia ei hyödynnetty enempää tässä vaiheessa.



Kuva 9. Exote-materiaalin mikrorakennetason mallinnus.

Mikrorakennetason mallin avulla voidaan helposti visualisoida, miten jännitykset ja venymät keskittyvät mikrotasolla. Tätä kautta voidaan löytää materiaalista ns. heikkoja kohtia ja edelleen herättää ajatuksia siitä, miten mikrorakennetta tulisi muokata ominaisuuksien parantamiseksi. Ballistinen suorituskyky kuitenkin määräytyy lopulta makrotason rakenteesta, joten mikrotason malli tulee linkittää makrotasolle lopullisen suorituskyvyn arvioimiseksi. Kuvassa 10 on esitetty esimerkin omaisesti alustava mikrotason mallin yhdistäminen makrotason malliin. Kuvaamalla vain osa rakenteesta yksityiskohtaisesti saadaan laskenta-ajat pysymään kohtuullisina.



Kuva 10. Mikrorakennemallin yhdistäminen makromalliin

4. Tulokset ja pohdinta

Tutkimuksen tuloksena selvitettiin ballististen materiaalien mallinnusavusteisen suunnittelun tämän hetkinen taso maailmalla. Monitasomallinnuksen kohdalla julkaistut tutkimukset liittyvät lähinnä kuiturakenteiden mesoskaalan mallinnukseen. Metallien ja keraamien kohdalla julkaistuja monitasomallinnuksen hyödyntämiseen liittyviä julkaistuja tutkimuksia on vain muutama, joten voidaan todeta ajankohdan olevan tutkimuksen kannalta erittäin otollinen.

Ensimmäisen tutkimusvuoden tuloksena syntyi mallinnustyökaluja, joiden avulla voidaan kuvata mikrorakennetason ilmiötä ballistisessa iskussa. Mallit mahdollistavat materiaalin eri faasien dynaamisen vauriokäyttäytymisen kuvaamisen. Vastaavan tasoisia malleja ei ole esitetty kirjallisuudessa. Mallien avulla visualisoitiin jännitysaallon eteneminen rakenteessa sekä jännitysten ja venymien keskittyminen eri faaseihin ja epäjatkuvuskohtiin. Jännitysten ja venymien jakautumisen visualisointi auttaa jo tässä vaiheessa tunnistamaan mikrorakenteesta piirteitä, joihin tulisi valmistusparametreja muuttamalla pyrkiä vaikuttamaan ja tätä kautta parantaa materiaalin suorituskykyä.

Tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava, että ensimmäisen vaiheen tavoitteena oli kehittää mallinnustyökaluja ja vasta seuraavassa vaiheessa keskittyä mallien validointiin ja oikeellisuuteen. Tutkimuksen tässä vaiheessa on kuitenkin jo selvää, että esitetty lähestymistapa tulee avaamaan täysin uusia mahdollisuuksia ballististen suojausmateriaalien kehitykselle. Yhtenä tärkeänä jatkotavoitteena on tuottaa julkaistavaa aineistoa kansainvälisille foorumeille ja tätä kautta herättää laajempaa kiinnostusta monitasomallinnuksen mahdollisuuksiin ballististen suojausmateriaalien kehityksessä.



5. Loppupäätelmät

Projektin ensimmäiselle vuodelle asetetut tavoitteet monitasomallinnuksen tämän hetkisten mahdollisuuksien ja rajoitusten selvittämisestä sekä mikrorakennetason mallien kehittämisestä täyttyivät ja mallinnuksen osalta osin jopa ylittyivät. Mikrorakennetason mallien lisäksi kyettiin alustavasti liittämään mikrorakennemalli osaksi makromallia. Kehitetyt työkalut ja saavutetut tulokset luovat hyvän pohjan tutkimuksen jatkolle. Mallinnustyökalujen tämän hetkinen kehitysaste mahdollistaa toisen tutkimusvuoden tavoitteeksi asetetun mallien kokeellisen verifiointin ja tätä kautta siirtymisen virtuaaliseen materiaalisuunnitteluun.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimuksen tässä vaiheessa ei ole syntynyt tieteellisiä julkaisuja tai muita raportteja. Mallinnettuja esimerkkitapauksia on kuitenkin esitelty osana monitasomallinnuksen ympärillä tehtävää työtä. Jatkotutkimuksen keskeinen tavoite on tuottaa kansainvälisen tason julkaisu tutkimuksesta.