

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Ballististen Materiaalien mallinnusavusteinen kehittäminen - BalMa

Tomi Lindroos, Matti 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

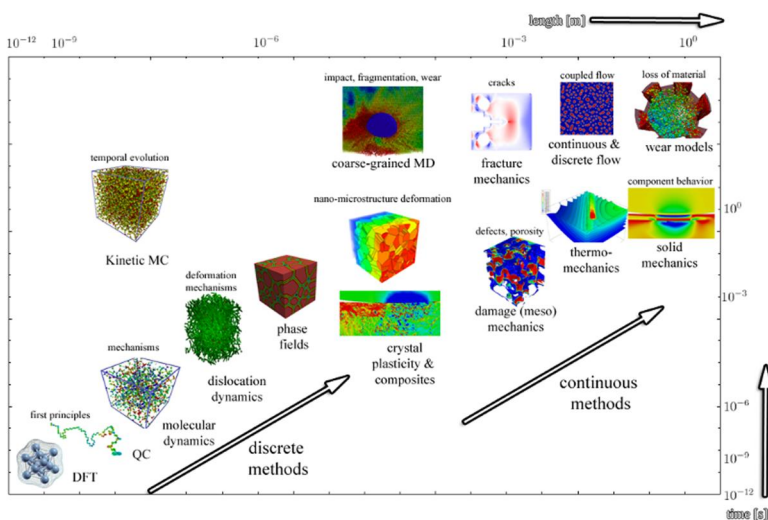
Ballistisen suojauksen vaatimukset kasvavat koko ajan. Suojauskyvyn kasvattaminen ja samanaikainen painon alentaminen edellyttävät yhä kehittyneempien ja suorituskykyisempien materiaalien ja materiaaliyhdistelmien käyttöä. Ballistisella suojauksella ymmärretään yleensä luodeilta, sirpaleilta ja usein myös 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 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 keraami- 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 suojausratkaisu on lähes poikkeuksetta keraamin ja sitkeän taustarakenteen yhdistelmä.

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 uudentyyppisen 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].



Kuva 1. Monitasomallinnuksen askeleet eri mittakaavan ilmiöille.

Perinteisestä homogenisoituihin materiaalimalleihin perustuvasta lähestymistavasta poiketen monitasomalleissa voidaan huomioida esimerkiksi kankaan rakenne ja kuitukimppujen väliset vuorovaikutukset. 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 oli kehittää työkaluja, jotka mahdollistavat entistä tehokkaampien (suojaustaso + neliöpaino) suojausmateriaalien ja rakenteiden kehittämisen

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

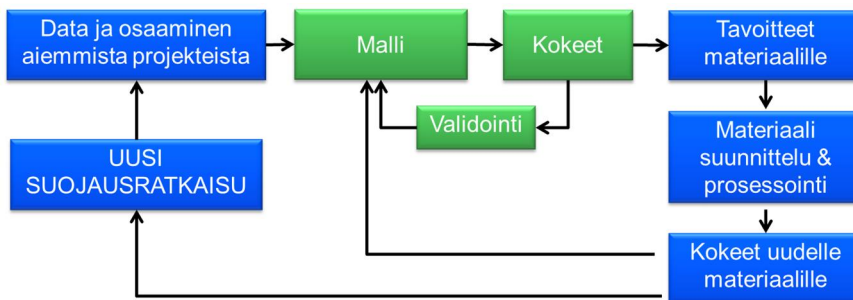
³ G. A. Gazonas *Multiscale Modeling of Armor Ceramics: Focus on AlON*, ARL-RP-337 2011

nopeammin ja kustannustehokkaammin. Projektissa luotiin perusteet materiaalien ja rakenteiden mallinnusavusteiselle suunnittelulle ja lisättiin tätä kautta ymmärtämystä materiaalien käyttäytymisestä ballistisessa iskussa.

Projektin tavoitteena oli:

- Selvittää monitasomallinnuksen tämän hetkiset mahdollisuudet ja rajoitukset entistä tehokkaampien ballististen suojamateriaalien kehittämiseksi. (TAVOITE I)
- Kehittää mikrorakennetason malleja, jotka mahdollistavat iskuenergian jakautumisen visualisoinnin mikrorakenteessa ja tätä kautta ymmärtää miten mikrorakennetta tulisi muokata suorituskyvyn kasvattamiseksi. (TAVOITE II)
- Suorittaa kokeellista testausta (mekaaniset ominaisuudet, ampumakokeet) mallien verifiointiksi ja mallinnuksen materiaaliparametrien määrittämiseksi. (TAVOITE III)

Projekti oli suunniteltu kaksivuotiseksi. Ensimmäisenä projektivuonna luotiin perusteet mallintaa kohtuullisen yksinkertaista ballistista iskutapahtumaa ja materiaalin mikrorakenteen käyttäytymistä. Toinena projektivuotena kehitettyjä malleja tarkennettiin siten, että voitiin tutkia mikrorakennetason muutoksien vaikutusta materiaalin käyttäytymiseen ja suorituskykyyn. Prosessikuvaus mallinnusavusteisesta suojausratkaisujen kehittämisestä on esitetty kuvassa 2, projektissa keskittyttiin kuvassa vihreällä merkittyyn mallinnustyökalujen kehittämiseen.

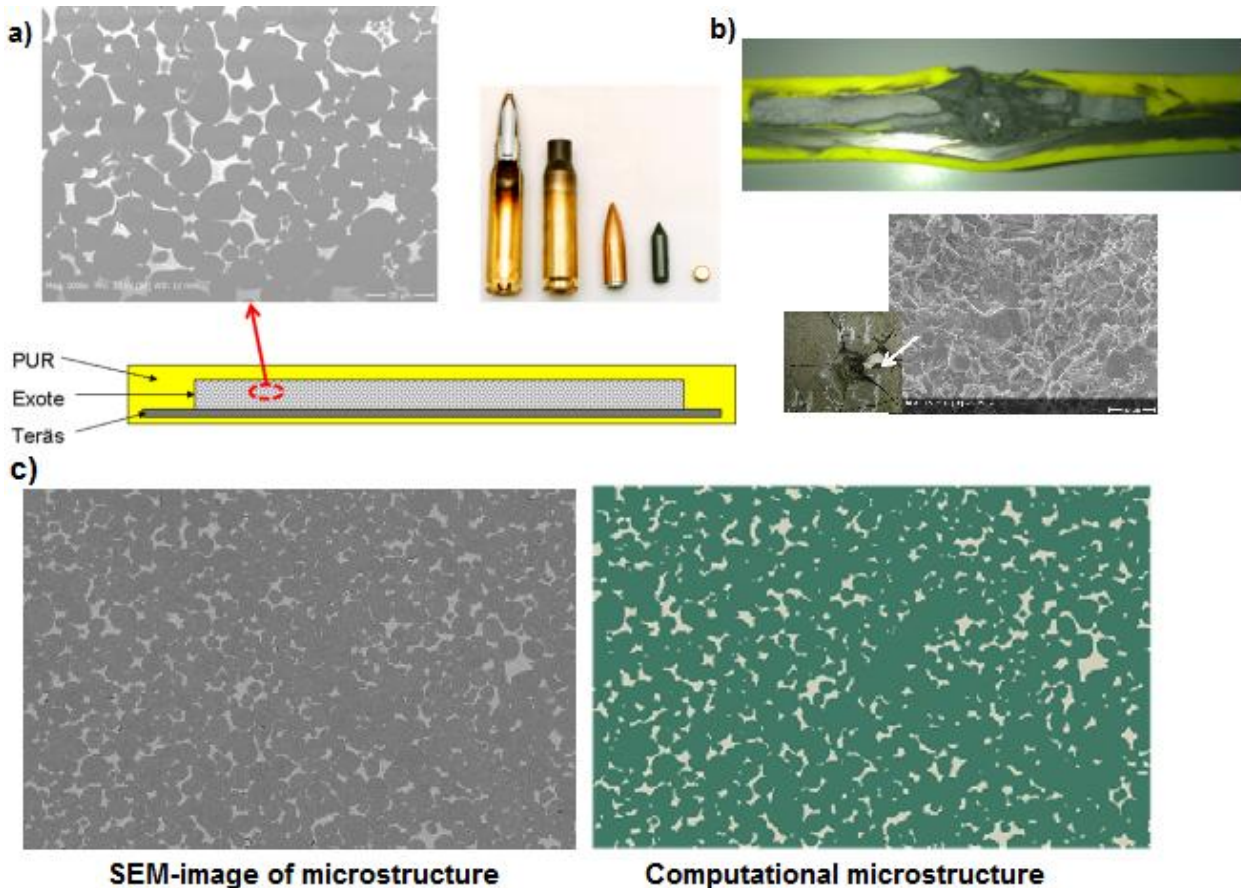


Kuva 2. Ballististen suojausratkaisuiden kehittäminen.

3. Materiaalit ja menetelmät

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 (TiC) ja sitkeästä nikkelimetallimatriisista (Ni). Testirakenne, Exoten mikrorakenne sekä ammunnoissa käytetty 7.62 FFV projektiili on esitetty kuvassa 3a.



Kuva 3. a) Testirakenne ja 7.62 FFV ammuksen rakenne (kovametalliidin toinen oikealta), b) suojausrakenteen poikkileikkaus ammutakokeen jälkeen (ylhällä) ja materiaalin murtopinta (alhaalla), ja c) mikrorakenteen siirtäminen laskennalliseen ympäristöön huomioiden faasirakenteet.

Kuvassa 3b 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 3b on esitetty materiaalin murtopintaa läheltä projektiiliin iskeytymiskohtaa. Kuvasta voidaan havaita murtuman etenevän sekä karbidifaasin läpi että myös metalli-kerami rajapintoja pitkin. Havaintojen perustella voidaan todeta, että sekä metallimatriisille että keraamille tulee käyttää dynaamista vauriomallia.

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 ja vaurio jakautuvat eri faasien välillä ja niiden rajapinnoilla. Kuvassa 3c on esitetty edustava kuvaus materiaalin mikrorakenteesta ja siitä luotu verkotettu mikrotason FE malli.

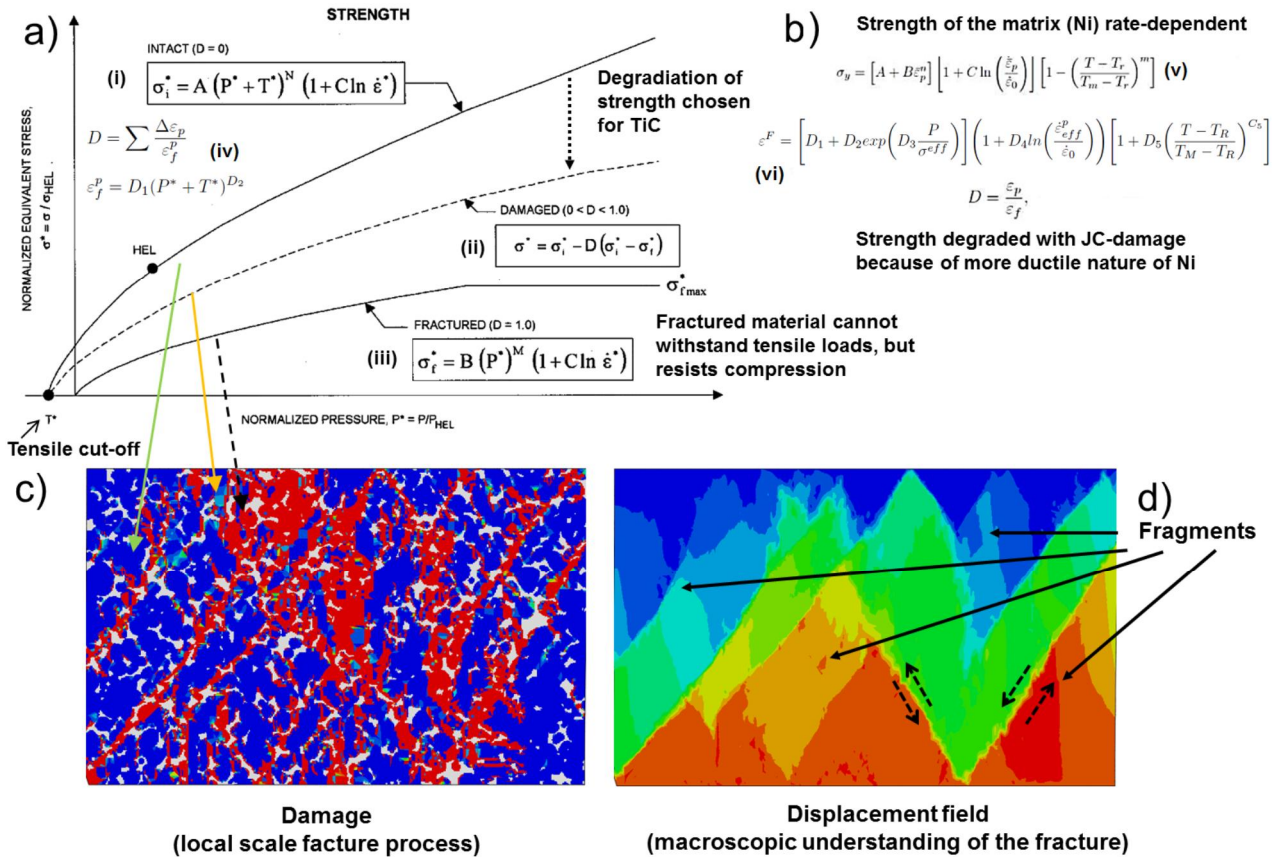
Materiaalimallien tausta ja valinta

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. 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 myötönopeudet ovat hyvin suuria, joten materiaalin mekaaninen käyttäytyminen poikkeaa merkittävästi staattisesta tilanteesta. Materiaaliparametrien määrittäminen suurilla myötönopeuksilla on oma tutkimushaaransa, joka edellyttää vaativia mittausjärjestelyjä sekä kokenutta käyttäjäkuntaa.

Kuvassa 4 (a) ja (b) on esitetty Johnson-Holmquist-2 (JH-2) ja Johnson-Cook (JC) materiaalmallit ja lujuuden sekä vaurioiden evoluutiot. Mikrorakennetasolla komposiittiratkaisun titaanikarbidille käytettiin hauraan, mutta lujan materiaalin JH-2 materiaalmallia ja sitkeälle nikkelimatriisille käytettiin JC materiaalmallia. TiC:n materiaalikäyttäytyminen on enemmän keraamimainen kuin metallimainen, ja näin ollen materiaalmallissa on huomioitava hydrostaattisen paineen vaikutus lujuuteen. Kuvan 4a yhtälössä (i) on kuvattu ehjän materiaalin lujuus, joka koostuu materiaalin vetolujuudesta ja puristuspaineriippuvaisesta osuudesta. Kun hydrostaattinen puristus kasvaa, materiaalin lujuus kasvaa raja-arvoon asti, jolloin materiaalin on myös mahdollista rikkoutua nurjahtamalla paineen alaisena. Yhtälön viimeinen dynaaminen termi myös huomioi kuormitusnopeuden vaikutuksen vahvistavana tekijänä, kun myötönopeus kasvaa. Samalla kun materiaalin plastinen muodonmuutos kasvaa, vaurio alkaa kehittyä materiaalissa kuvastaen mikrosäröilyä. Materiaalikäyttäytyminen on anisotrooppinen, koska hauraat materiaalit eivät usein kestä vetokuormitusta yhtä paljon kuin puristusta, joten materiaalmalli huomioi pienen vetolujuuden rajoittavana tekijänä kokonaislujuudelle (tensile cut-off kuvassa 4). Jos materiaalia kuormitetaan puhtaasti vedossa, materiaali vaurioituu ja hajoaa hyvinkin pienillä kuormilla. Vaurion kehitys tapahtuu kuvan 4 yhtälön (iv) mukaisesti, missä vaurioparametrit D_1 ja D_2 edustavat vaurioevoluutiota, mikä riippuu materiaalin veto ja puristustilasta. Vaurion kehittyessä materiaalin lujuus laskee yhtälön (ii) mukaisesti kohti vaurioituneen, paljon säröjä sisältävän materiaalin tasolle yhtälön (iii) mukaisesti. Tällöin materiaali kestää puristavan hydrostaattisen paineen alaisena, koska säröt eivät pääse aukeamaan tai liikkumaan suhteessa toisiinsa nähden, paitsi jos materiaalissa on paljon huokoisuutta. Jos kuormitus muuttuu vedolle, materiaali hajoaa kokonaan pirstoutumalla säröjen avautuessa. Osittain säröytyneen materiaalin (kun vaurioparametri $D < 1.0$) oletetaan kuitenkin kestävänsä vetoa, koska säröjen ei oleteta olevan vielä täysin kehittyneitä makrosäröiksi. Veto aiheuttaa säröytymistä, mutta kimmoenergiaa sitoutuu myös murtumisprosessiin. Kuva 4c esittää dynaamisessa puristuskokeessa vaurioituneen mikrorakenteen.

Metallimatriisiin, kovametalliluodin ja korkealujuusteräksen materiaalikäyttäytyminen mallinnettiin laajasti tunnetun JC-mallin mukaan. Kuvassa 4b yhtälö (v) esittää materiaalin viskoplastisen lujuuden, joka yhdistää myötönopeuden lujittavan sekä tarvittaessa lämpötilan pehmentävän lujuusvaikutuksen. Materiaalin dynaaminen vaurioituminen tapahtuu yhtälön (vi) mukaisesti, missä kriittinen vauriovenymä määritellään usean sitkeän materiaalin vaurioitumistyyppin perusteella malliparametrien D_1 - D_5 ja kuormituksen vaikutuksesta. Näin ollen vaurio kehittyy riippuen materiaalin plastisesta muodonmuutoksesta sekä kuormitusolosuhteista. Mikrorakenteen makroskooppinen hajoaminen voidaan esittää koko rakenteen kuormituskyvyn häviämisen kautta, kun karbidien ja matriisin vaurioituminen ja dynaaminen materiaalikäyttäytyminen huomioidaan. Kuva 4d esittää siirtymäkentän koko mikrorakenteessa, mistä voidaan havaita makroskooppinen pirstoutuminen.



Kuva 4. a) Johnson-Holmquist-2 lujuus ja vauriomalli, b) viskoplastinen Johnson-Cook lujuus- ja vauriomalli, c) mikrorakennepohjainen esitys ehjästä (sininen), osittain vaurioitunut (gradienttivärit), ja kokonaan vaurioitunut TiC karbidiverkosto (punainen), sekä nikkelimatriisi (harmaa), d) mikrorakennepohjaisen mallin siirtymäkenttä kuvastaen makroskooppista murtumista ja fragmentaatiota.

Makroskooppisessa mallinnustavassa (kuva 8 jäljempänä) hyödynnettiin TiC-Ni komposiitille JH-2 mallia sen antaessa paremman vastineen materiaalin fysikaalisella käyttäytymiselle kuin JC-malli, johtuen suuresta titaanikarbidin faasisuudesta. Mallin aloitusparametrit homogenisoitiin pääosin mikrorakennepohjaisia tuloksia hyödyntäen. Makroskooppinen malli huomioi materiaalin vaurioitumisen ja hajoamisen siten, että kun vaurio on täysin kehittynyt elementin integrointipisteessä, kyseinen elementti muutetaan partikkeleiksi, jotka voivat reagoida vielä muun verkon kanssa, mahdollistaen pienen vastuksen puristuksen alaisena. Käytetyn mallinnustavan arvioitiin antavan paremman approksimaation materiaalin käyttäytymisestä kuin tyypillisesti hyödynnetty elementin tuhoaminen ja siten hajonneen materiaalin kokonaan poistaminen laskenta-avaruudesta ennenaikaisesti.

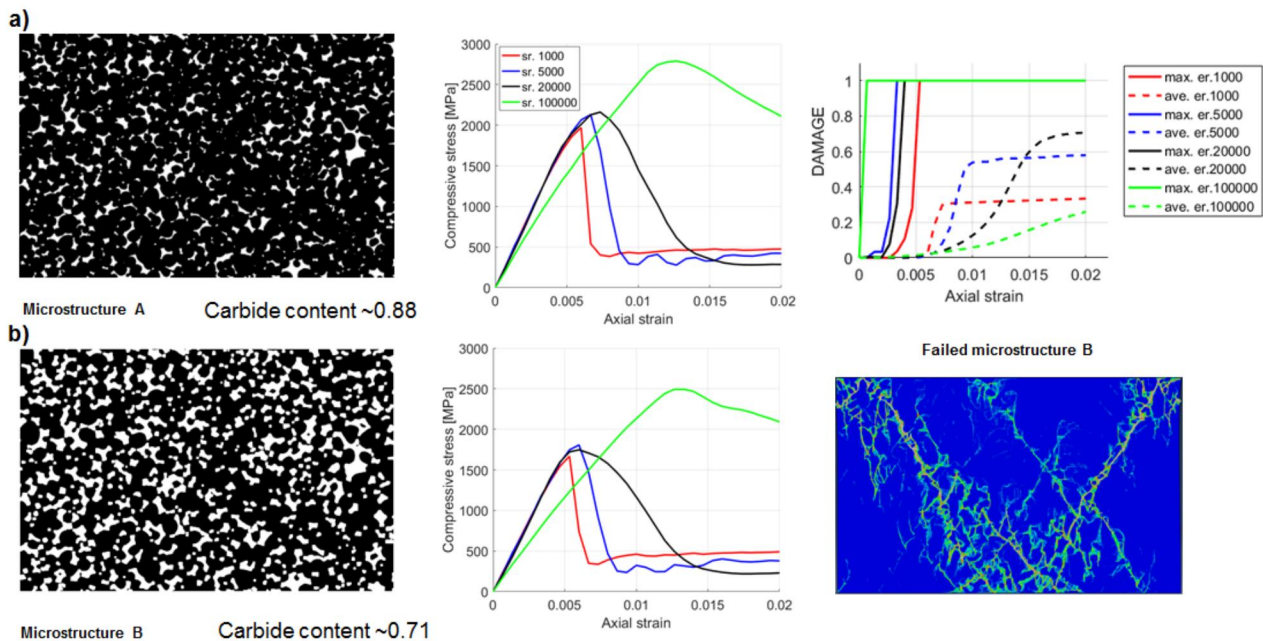
4. Tulokset ja pohdinta

Materiaalin mekaaninen käyttäytyminen dynaamisessa kuormituksessa

Kuva 5a esittää alkuperäisen laskennassa käytetyn mikrorakenteen (A), dynaamisen, simuloitun puristuskokeen jännitys-venymä käyttäytymisen, ja vaurion kehittymisen aksiaalivenymän funktiona. Monifaasirakenne TiC-Ni materiaalikäyttäytyminen muuttuu, kun kuormitusnopeus kasvaa dynaamisessa iskutilanteessa. Makroskooppinen lujuus kasvaa hieman myötönopeuden kasvaessa, mutta samalla vauriokäyttäytyminen muuttuu. Vaurio kehittyy aiemmin venymänopeuden kasvaessa, mutta vaurion kokonaislaajuus mikrorakenteessa on rajoitetumpi. Tämä tarkoittaa sitä, että hitaammalla

kuormitusnopeudella vaurion ydintymispaikkoja on useita, mutta suuremmalla myötönopeudella herkimät alueet kehittävät vaurion aiemmin lokaalin kuormituksen ja viskoplastisen lujuuden muuttuessa. Kun kuormitusnopeutta kasvatetaan tarpeeksi, esimerkiksi venymänopeus 10^5 s^{-1} , materiaalin viskoosinen käyttäytyminen muuttuu. Sokkikuormituksesta johtuvajännityksen kasvu Hugoniot elastisen rajan yli aiheuttaa materiaalirakenteen monimutkaisen jännitys-venymäkäytöksen.

Kuva 5b esittää vaihtoehdoisen TiC-Ni materiaalirakenteen (B), sen dynaamisen mekaanisen käyttäytymisen, ja venymäjakauman mikrorakenteessa. Mikrorakenteen (B) titaanikarbidifaasisuus on vähäisempi. Tuloksista nähdään verratessa rakennetta A ja B, että vaikka metallimatriisin osuus on suurempi rakenteessa B, sen lujuus laskee ja sitkeys ei kasva merkittävästi. Näin ollen, rakenteen B kyky sitoa (isku) kimmoenergiaa mikrorakenteessa ei ole yhtä hyvä kuin rakenteella A. Laskentaesimerkki osoittaa, että materiaalin suorituskykyä ballistisia iskuja vastaan voidaan arvioida materiaalin mikrorakenteen muutosten funktiona. .

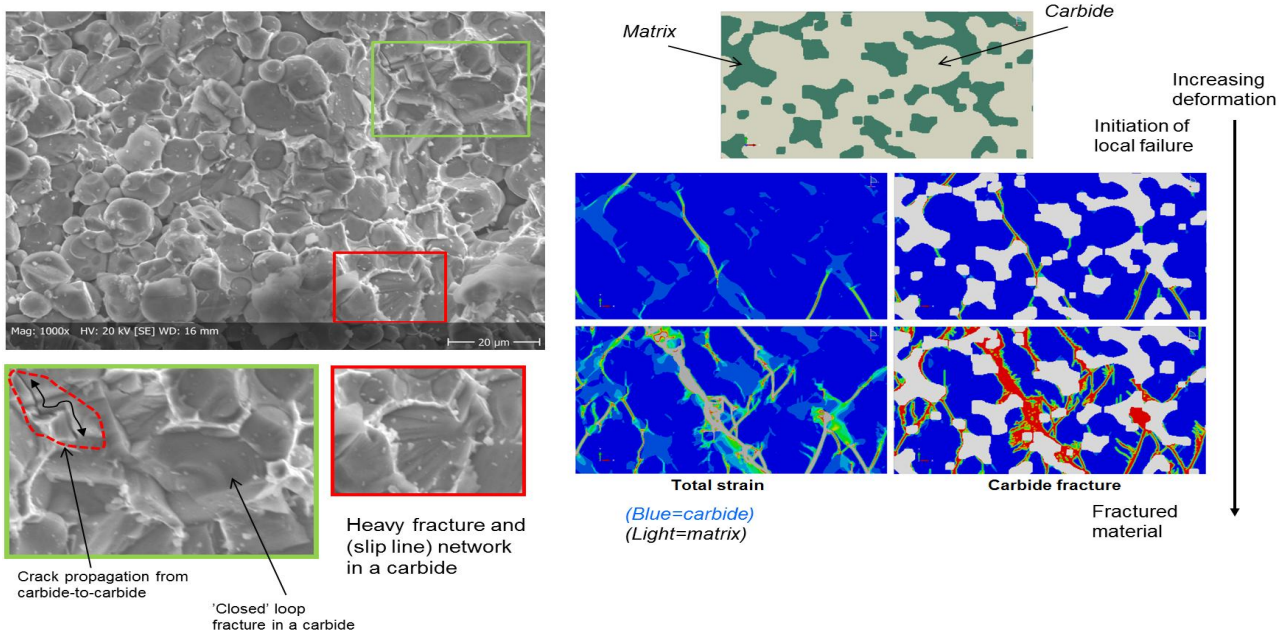


Kuva 5. a) Tutkittavan rakenteen TiC-Ni mikrorakenne, dynaaminen materiaalikäyttäytyminen, ja vaurioituminen iskevän puristuksen alaisena, ja b) vaihtoehtoinen mikrorakenne pienemmällä karbidifaasisuudella ja sen dynaaminen materiaalikäyttäytyminen ja hajonneen mikrorakenteen kuvaus $20\,000 \text{ s}^{-1}$ venymänopeudella. Kuvassa (sr.) tarkoittaa venymänopeutta [s^{-1}].

Mikrorakennepohjaiset mallinnustulokset ja materiaalin vaurioituminen

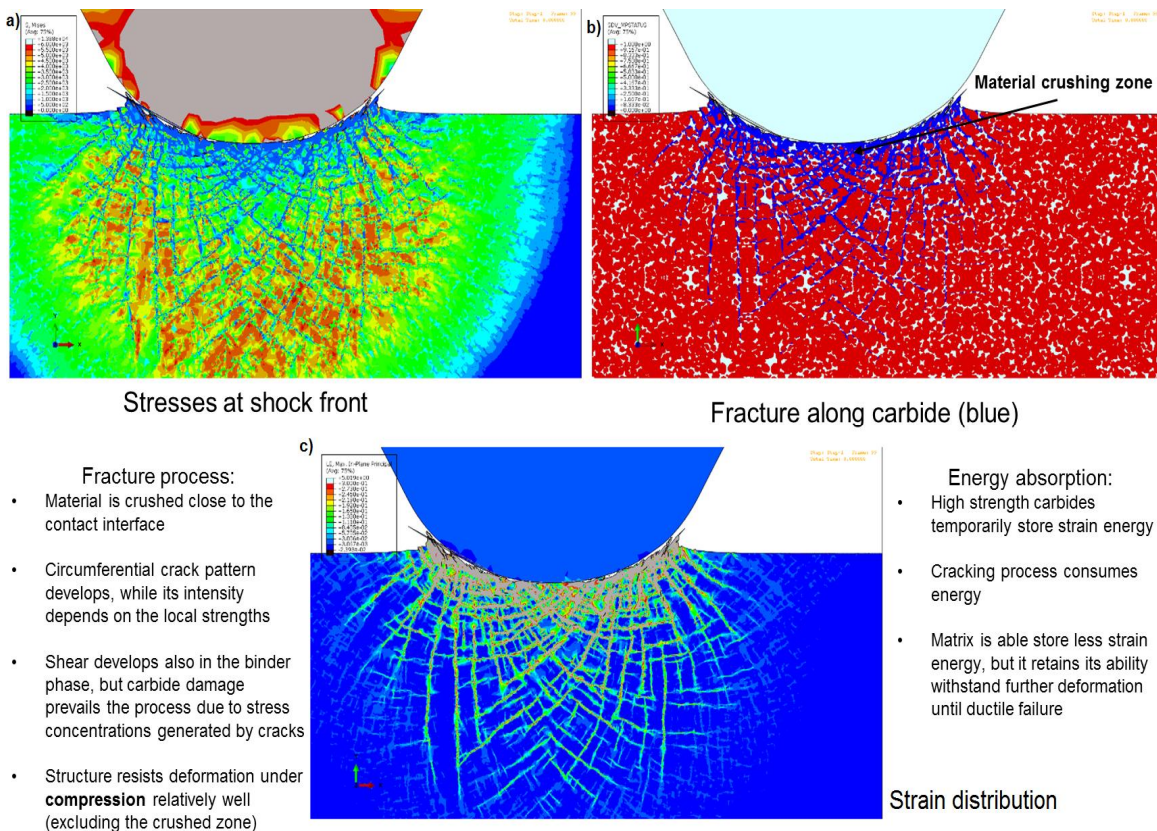
Kuva 6 visualisoi ammutun rakenteen vauriomekanismien karakterisointia (vasemmalla) ja simuloidun vaurioitumisen mikrorakenteessa dynaamisen kuormituksen alaisena (oikealla). Kuvasta huomataan, että vaurio kehittyy vahvasti karbidin säröytymisenä, joka on esitetty punaisella kuvissa, sekä matriisin leikkaustumisvauriona. Vaurioiden yhdentyessä faasirajoilla rakenteeseen voi syntyä pieniä sekä isompia leikkausnauhoja ja säröjä, jotka hajottavat materiaalin muodonmuutoksen kasvaessa. Simulaatiot näyttävät, että vaurio ydintyy useista, yksittäisistä lähtökohdista samaan aikaan, kuten esimerkiksi jännityskeskittymistä matriisin ja karbidin rajapinnalla sekä suuren vetojännityksen alaisena karbidin sisällä, johtaen myös jännitys- ja venymäkeskittymään matriisin alueella säröjen vaikutuksesta. Vastaavat havainnot voidaan tehdä myös kokeellisista tuloksista, mikä on tärkeä tekijä tulosten

luotettavuuden kannalta. Materiaalimallin parametrit verifioitiin vertaamalla kokeellisiin puristustuloksiin, hyväksymiskriteerin ollessa noin 10 % eroavuus, mikä vastaa kokeissa havaittua virhe- ja hajontarajaa.



Kuva 6. Ammutun näytteen murtunut mikrorakenne ja esimerkkejä murtumismekanismeista (vasemmalla) ja mikrorakennepohjaisen mallin murtumismekanismien visualisointi kasvavan muodonmuutoksen alaisena (oikealla).

Edustava mikrorakenne (Kuva 3) laajennettiin isoksi mikrorakenteeksi generoimalla suuremman alueen mikrorakenne osaksi monitasomallia. Laajennettu mikrorakennemalli mahdollistaa makrotason iskutarkastelun luodin ja mikrorakenteen välillä, missä oikeassa mittakaavassa oleva luoti iskeytyy materiaalin pintaan. Kuva 7 esittää tilanteen luodin iskeytyessä materiaalin pintaan 950 m/s nopeudella hetki iskun alkamisen jälkeen. Jännityksen sokkirintama etenee materiaalissa aiheuttaen vauriota sekä karbideihin että matriisiin. Paikallisten jännitysten ja venymien kehittymiseen vaikuttavat merkittävästi materiaalin epäjatkuvuuskohdat ja mikrorakenteen topologiset ominaisuudet, kuten karbidiverkon rakenne. Kuvasta nähdään myös, että materiaali murskaantuu suoraan luodin alla suuren kuormituksen vaikutuksesta, ja samaan aikaan mikrorakennemalli pystyy tuottamaan kokeissa havaitun murtumakartion muodostumisen radiaalisuunnassa. Venymäkeskittymäkuvaus (Kuva 3, keskellä alhaalla) näyttää pääsäröjen kasvamis suunnat, mistä nähdään, että makroskooppinen vaurioituminen on mikrorakennetaso vauriomekanismien yhdentymä. Lisäksi kuvassa on koottuna vaurioitumisen ja energian sitouttamisen päähavainnot mikrorakenteessa, mitkä ovat keskeiset tekijät arvioitaessa suojausrakenteen suorituskykyä. Iskuvaurion tilanteen ymmärtämisen lisäksi on mahdollista, että vastaava tarkastelu voitaisiin suorittaa useille vaihtoehdoille mikrorakenteille ja arvioida ratkaisun suorituskykyä perustuen sopiviin suorituskykyindikaattoreihin, kuten yllä on mainittu.



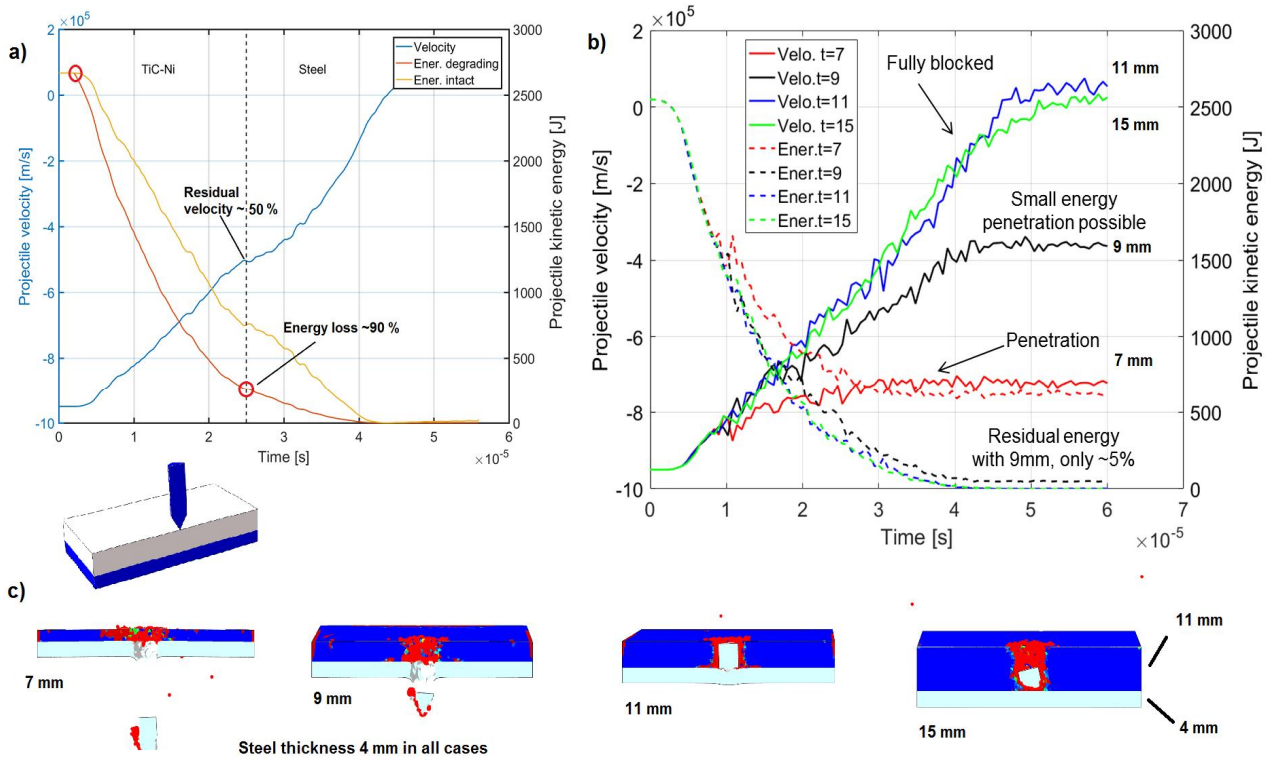
Kuva 7. Mikrorakenteen ja luodin interaktio iskutilanteessa sekä murtumisprosessin että energian sitoutumiskyvyn keskeiset tekijät suojausmateriaalissa. a) Jännitysaaltokenttä iskun alussa, b) murtunut karbidiverkko (sininen väri), c) kokonaisvenymäjakautuma mikrorakenteessa kaikkien faasien yli muodostaen makroskooppisia leikkaus- ja vaurionauhoja.

Makroskooppisen mallien tulokset ja pohdinta

Suojausratkaisusta muodostettiin myös makroskooppinen malli, missä TiC-Ni ja teräslevy muodostavat kokonaissuojausratkaisun ja luodin kovametalliydin on sisällytetty malliin. Mallissa suojausratkaisu sekä kovametalli ydin vaurioituvat ja hajoavat iskun aikana, jotta iskutilanne olisi realistisempi. Ensin tarkasteltiin tilannetta nykyisen rakenteen kanssa, missä TiC-Ni:n osuus paksuudesta on 7 mm ja teräksen 4 mm muodostaen 11 mm kokonaispaksuuden. Kuvasta 8a nähdään, että luodin nopeus on hidastunut TiC-Ni osuuden aikana noin 50 %:in alkuperäisestä nopeudesta luodin saavuttaessa teräksen pinnan. Laskettaessa luodin jäljellä olevaa kineettistä energiaa teräksen rajapinnan kohdalla huomataan, että jos huomioidaan luodin hajoamisen vaikutus, alkuperäisestä kineettisestä energiasta on kulunut noin 90 % (Ener. degrading). Tulosten perusteella teräs ottaa vastaan vain viimeiset noin 10% luodin kineettisestä energiasta. Vastaavasti konservatiivisempi tulos saadaan silloin, kun luodin hajoamista ei huomioida laskennassa (Ener. intact). Kuitenkin kokeissa todettiin, että luodeista vain murto-osa on ehjänä testin jälkeen osoittaen luodin hajoamisen huomioivan mallin paremmaksi approksimaatioksi tilanteesta.

Makroskooppisella mallilla voidaan arvioida suojausratkaisun suorituskykyä, jossa keskeinen tekijä on rakenteen pysäyttämiskyky suhteessa rakenteen neliömassaan. Lyhyt tarkastelu tehtiin vähentäen rakenteen paksuutta siten, että teräksen paksuus pysyi vakiona (4 mm). Kuva 8b esittää tulokset TiC-Ni paksuuksille 7 mm – 15 mm. Osa luodeista lävisti 7 mm paksun ratkaisun, minkä jälkeenluodin nopeus oli vielä noin 700 m/s. Laskenta osoitti myös, että 9 mm ratkaisun lävistäneissä luodinosissa oli kineettistä energiaa jäljellä vain 5 %.

Paksummat 11 mm ja 15 mm ratkaisut riittivät pysäyttämään luodin. Rakenteen paksuuden lisääminen 15 mm:in ei tuo merkittävää etua verrattuna 11 mm paksuuteen suhteessa rakenteen massan kasvuun yhden iskun tapauksessa. Laskennasta nähtiin, että 15 mm ratkaisussa luoti pääosin pysähtyy TiC-Ni kerrokseen.



Kuva 8. Materiaalin suojauskyky iskutilanteessa, a) eri vahvuisten suojausratkaisujen käyttäytyminen esitettynä luodin hidastuman ja jäljellä olevan kineettisen energian funktiona, b) luodin hidastuma ja kineettinen energia huomioimatta ja huomioimalla luodin hajoamisen (järjestyksessä Ener. Intact ja Ener, degrading) iskussa 11 mm suojausratkaisua vasten, c) eri suojausratkaisujen visualisointi iskutilanteen lopussa.

5. Loppupäätelmät

Projektille asetut tavoitteet saavutettiin selkeästi sekä mikro- että makroskooppisella tasolla. Monitasomallinnuksen työkaluilla voidaan esittää mikrorakennetason muodonmuutos- ja vauriomekanismit riittävällä tarkkuudella, mikä havaittiin vertailtaessa kokeellisia ammuttuloksia, materiaalikarakterisointia ja simulointeja. Mikrorakenteen liittäminen osaksi makroskooppista tilannetta demonstroititiin ja todettiin, että mikrorakennemalli pystyy esittämään monimutkaisen iskuvaurioitumisen ballistisessa kontaktissa ja visualisoimaan iskuenergian jakautumista rakenteessa. Myös vaihtoehtoisten rakenteiden arviointi on mahdollista monitasomallinnuksen työkaluilla, ja materiaaleja voidaan kehittää virtuaalisesti. Siirtymä mikrorakenteesta makrotason malliksi on mahdollista hyödyntäen materiaalin homogenisointia, jolloin mikrorakennesuunnittelun tulokset on mahdollista skaalata myös makrotasolla. Puhtaasti makroskooppisilla malleilla voidaan arvioida kokonaisratkaisun suorituskykyä. Makrotason mallien tulokset vastaavat erittäin tarkasti kokeellisten ammuttulosten arvoja. Murtumakäyttäytymisen tarkemmaksi arvioimiseksi suoritettiin suurnopeuskuvaukset koeammuntojen yhteydessä. Koeammuntapäivä saatiin kuitenkin järjestymään aivan projektin loppuun eikä tuloksia tästä syytä ehditty sisällyttää raporttiin.



Tulokset tullaan julkaisemaan myöhemmin tieteellisessä artikkelissa.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimuksesta on tavoitteena tuottaa kansainvälisen tason julkaisu perustuen monitasomallinnuksen työkaluihin ja keinoihin. Simulointimalien animaatioita sekä videoita suurnopeuskuvauksista julkaistaan www.vtt.fi/powder sivustolla.