

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

HIILINANOPUTKISEOSTETTUJEN BOORIKARBIDIKERAAMINEN KÄYTTÖ
SOTATEKNISISSÄ SUOJARAKENTEISSA

UTILIZATION OF CARBON NANOTUBE REINFORCED BORON CARBIDE
CERAMICS IN MILITARY ARMOR APPLICATIONS

Lappeenrannassa 11.3.2016

Juho Raukola

Tarkastaja: Dosentti, TkT Harri Eskelinen

TIIVISTELMÄ

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Juho Raukola

HIILINANOPUTKISEOSTETTUJEN BOORIKARBIDIKERAAMINEN KÄYTTÖ SOTATEKNISISSÄ SUOJARAKENTEISSA

Kandidaatintyö

2016

29 sivua, 10 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Dosentti, TkT Harri Eskelinen

Hakusanat: boorikarbidi, B₄C, nanohiiliputket, CNT, keraamit, komposiitit, seostus, SPS, kipinäplasmastraus, kuumapuristus, suojarakenne, luotisuus, STAE 2020

Tässä kirjallisuustutkimuksessa on käsitelty sotateknisten suojarakenteiden materiaalinvalintaa nanohiiliputkiseostetun boorikarbidin (B₄C) kannalta sekä sen hyödyntämistä Suomen Puolustusvoimissa. Suojarakenteiden ominaisuudet pisteytettiin soveltuvien osien VDI 2221-luokituksen mukaisesti ja niistä muodostettiin vaatimusprofiilit suojarakenteille. Työssä kartoitettiin valmistusmenetelmien ja eri seosaineiden valinnan vaikutukset suojarakenteen materiaaliominaisuuksiin ja niistä muodostettiin parhaiten suojarakenteen vaatimuksiin vastaava kokonaisuus.

Suojarakenteilta vaaditaan suojaavuutta erilaisia uhkia vastaan sekä keveyttä, hyviä lujuusominaisuuksia ja pientä tilantarvetta. Tärkeimmät materiaaliominaisuudet suojarakennekeraamille ovat kimmomoduli, tiheys, kovuus, taivutuslujuus ja sitkeys. 3 % CNT-seostuksella voidaan boorikarbidin sitkeyttä nostaa 15 % ja kovuutta 30 %. Yhdessä optimaalisen valmistusmenetelmän ja muiden seosaineiden valinnan kanssa voidaan boorikarbidin ominaisuuksia parantaa huomattavasti suojarakennekäytön kannalta. Tutkituista yhdistelmistä optimaalisimmat materiaaliarvot boorikarbidirakenteelle saavutettiin kipinäplasmastrausella, 3 % CNT-pitoisuudella ja zirkonium- sekä alumiinipohjaisella seostuksella yhdessä raekoon pienentämisen kanssa.

ABSTRACT

LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Juho Raukola

UTILIZATION OF CARBON NANOTUBE REINFORCED BORON CARBIDE CERAMICS IN MILITARY ARMOR APPLICATIONS

Bachelor's thesis

2016

29 pages, 10 figures and 1 table

Examiner: Docent, D. Sc. (Tech.) Harri Eskelinen

Keywords: boron carbide, B₄C, carbon nanotubes, CNT, ceramics, composites, SPS, spark plasma sintering, hot pressing, armor structure, bullet proof, STAE 2020

This Bachelor's thesis elaborates the use of boron carbide with carbon nanotubes, the material selection for bulletproof armors, and its utilization in Finnish Defense Forces. Armor material's functional requirements were measured using VDI 2221-grading in applicable parts and the most critical functional requirements were derived from the scoring. Effects of different manufacturing processes and alloying were analyzed and the optimal methods and alloying elements were measured.

The most crucial requirements for armor structures are good protection against different threats, light weight, good strength properties and small space requirement. The most important material properties for armor structures were elastic modulus, porosity, hardness and flexural strength. With 3 weight percent carbon nanotube reinforcing hardness can be improved by 30 % and toughness by 15 %. Along with the most suitable manufacturing process and the optimized alloying elements the properties of armor structure can be strongly improved. The most optimal combination was achieved manufacturing the boron carbide using spark plasma sintering, 3 % carbon nanotubes and with zirconium and aluminum-based alloying.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	SOTATEKNISTEN SUOJARAKENTEIDEN VAATIMUSPROFIILIT	7
3	BOORIKARBIDIN OMINAISUUDET JA VALMISTUS	9
4	BOORIKARBIDIN SEOSTAMINEN HIILINANOPUTKILLA	12
4.1	Hiilinanoputket	12
4.2	Hiilinanoputkiseostamisen hallinta	13
5	KONSTRUKTIOMATERIAALIN VALINTA TAISTELUKENTÄN OLOSUHTEISIIN	17
6	BOORIKARBIDIN KÄYTTÖ SUOJARAKENTEISSA	21
7	BOORIKARBIDIN TULEVAISUUDENNÄKYMÄT SUOJARAKENTEISSA	24
	LÄHTEET	27
	LIITE	

LIITE I: SUOJARAKENTEEN VAATIMUSPROFIILI

1 JOHDANTO

Nykyaikaisen pohjoisen taistelukentän suojarakenteiden konstruktioaaleille asettamat vaatimukset ovat kehittyneiden ase- ja sensoritekniikoiden ansiosta äärimmäisen kovat. Samalla kun rakenteiden häiveominaisuuksia mm. tutka-, infrapuna- ja näköhavainnointia vastaan täytyy jatkuvasti parantaa, kasvavat suojamateriaalien lujuus-, sitkeys- ja etenkin keveysvaatimukset vieläkin dramaattisemmin.

Boorikarbidi (B_4C) on kolmanneksi kovin tunnetuista materiaaleista ja on hyvin yleinen luotisuojakeraami. Kuten useimmat keraamit, on boorikarbidi kovaa, teräkseen verrattuna kevyttä ja kestää hyvin korkeita (yli 1000 °C) lämpötiloja. Keraamien heikko kohta suojarakenekäytön kannalta on niiden heikko taivutuskestävyys eli hauraus sekä heikko vetolujuus, joka voi olla jopa 10 kertaa pienempi kuin murtolujuus. Näitä boorikarbidin ei-toivottuja ominaisuuksia suojarakenteissa voidaan parantaa eri menetelmillä, joista nanoseostaminen joko perusaineen nanopartikkeleilla tai esimerkiksi nanoputkilla kuitujen tapaan on yksi erittäin potentiaalinen vaihtoehto.

Tämän työn pohjana käytetään Suomen Puolustusvoimien Teknologian kehitys – Sotatekninen arvio ja ennuste 2020 -kirjaa (Pääsikunta sotatalousosasto, 2004). Kirjan silloista tietoa nanoseostettujen boorikarbidikeraamien materiaaliominaisuuksista ja käyttömahdollisuuksista sotilasteknisissä suojarakenteissa päivitetään ensin vuoden 2015 tasolle ja sen pohjalta luodaan uudet kehitys- ja mahdollisuuskäytännöt vuodelle 2020. Työssä pyritään myös selvittämään, miten nanoseostus todellisuudessa vaikuttaa boorikarbidikeraamin materiaaliarvoihin ja miten eri nanoseostuskoostumukset ja niiden valmistusmenetelmät lopputuotteeksi vaikuttavat erityisesti suojarakenteen lujuuteen ja sitkeyteen ja sitä kautta niiden keveyteen. Saatujen tulosten pohjalta määritetään nanoseostettujen boorikarbidikeraamien käyttömahdollisuuksia sotateknisissä suojarakenteissa vuonna 2020.

Tutkimus toteutetaan kaksimenetelmäisenä kirjallisuustutkimuksena, jossa vuosien 2004 ja 2015 välistä materiaalikehitystä nanotekniikan ja boorikarbidin osalta kartoitetaan abduktiivisella päättelyllä ja vuoden 2015 tulevaisuudennäkymiä vuodelle 2020 sekä

nanoseostetun boorikarbidin häiveominaisuuksia pyritään ennustamaan analyysi-synteesimenetelmällä. Menetelmän alkuolettamuksena on, että nanoseostus lisää boorikarbidikeraamien sitkeyttä ja täten parantaa sen käytettävyyttä Suomen Puolustusvoimissa. Työn tutkimuskysymyksiä ovat, miten hiilinanoputkiseostus vaikuttaa boorikarbidin lujuusominaisuuksiin ja valmiin suojarakenteen keveyteen ja mitkä ovat nanoseostetun boorikarbidin käyttönäkymät vuonna 2020 vuoden 2016 tiedon perusteella.

2 SOTATEKNISTEN SUOJARAKENTEIDEN VAATIMUSPROFIILIT

Kappaleessa määritellään nykyaikaisille suojarakenteille sekä vaaditut että toivotut ominaisuudet käyttäen soveltuvin osin VDI 2221-luokitusta. Nämä ominaisuudet pisteytetään taistelijan vaatetuksen, ajoneuvojen rakenteiden ja kiinteiden rakenteiden erityispiirteiden mukaisesti. Kussakin kolmen kategorian ominaisuusvertailun pisteytyksessä toivotulla ominaisuudella on painokerroin 1, vaaditulla ominaisuudella 2 ja käyttökohteensa kannalta merkityksettömällä ominaisuudella kerroin on 0. Taulukon henkilösuojaimilla tarkoitetaan luoti- ja sirpalesuojaliivejä ja suojakypäriä yms., ajoneuvojen rakenteilla erilaisia suojalevyjä tai suoraan suojamateriaalista valmistettuja ajoneuvojen toiminnallisia rakenteita ja kiinteillä rakenteilla erilaisia siirreltäviä kevyehköjä suojaseiniä ja – rakenteita.

Sotateknisiltä suojamateriaaleilta vaaditaan paljon. Niiden täytyy kyetä suojaamaan kohteensa kaikissa käyttötilanteissa, kaikissa sääolosuhteissa ja kaikkia todennäköisiä uhkia vastaan sekä samaan aikaan olla mahdollisimman keveitä, huomaamattomia ja edullisia. Käyttöolosuhteet voivat Suomen oloissa vaihdella talven -50°C pakkasista kesän $+ 40^{\circ}\text{C}$ helteisiin ja taistelukentällä lumi, jää, hiekka ja kasviperäinen aines altistavat suojamateriaaleja vaurioitumiselle. Tämän jälkeen niiden täytyy vielä täyttää niiden varsinainen tehtävä, eli erilaisilta sotilaallisilta uhkilta suojaaminen. Näitä voivat olla mm. sirpale- ja onteloammusten, rypälepommien tytärammusten sekä luotien osumat, kemialliset ja radioaktiiviset aseet, polttovaikutteiset napalmi- ja fosforiaseet, termobaaristen ammusten paineiskuvaikutukset sekä tulevaisuuden olosuhteissa myös laseraseiden säteen pistemäinen lämpövaikutus.

Liitteen 1 taulukon mukaisesti kaikille kolmelle suojatyypille oli yhteisinä vaatimuksina keveys, lujuus, iskusitkeys, taivutuskestävyys, vetolujuus, sään- ja erittäin korkeiden lämpötilojen kesto, materiaallinen kemiallinen stabiilius, kuljetettavuus sekä materiaalin saatavuus. Koska yksittäisen taistelijan suojarustus on hyvin läheisessä kontaktissa kantajaansa, vaatimuksissa korostuvat selkeimmin käyttömukavuus, keveydestä ja pienikokoisuudesta aiheutuva ketteryys sekä itse käytetyn materiaalin vaarattomuus ihmiselle. Puolustusvoimien omien tutkimusten mukaan taistelijan käytännöllinen

vaatetuksesta ja varustuksesta koostuva kantokuorma on 22 kiloa, minkä jälkeen varustuksen painoa lisäämällä taistelijan toiminta- ja taistelukyky merkittävästi laskee. (Pääesikunta sotatalousosasto, 2004, s. 276.)

Kokonaispisteiden perusteella ajoneuvojen suojarakenteet ovat kuitenkin vaativin luokka, sillä niiden täytyy kestää kaikki liikkeestä johtuvat voimat ja värähtelyt sekä selkeästi järeämmät asevaikutukset kuin henkilösuojainten. Kiinteiden rakenteiden vaatimukset sisälsivät kahteen muuhun luokkaan verrattuna enemmän toiveita materiaalia kohtaan, sillä kiinteiden rakenteiden käyttötilanteet poikkeavat selvästi henkilö- ja ajoneuvosuojista ja varaa kompromissien tekoon on enemmän, kun rakenteet ovat käyttötilanteissa paikallaan.

3 BOORIKARBIDIN OMINAISUUDET JA VALMISTUS

Suojarakenteen tärkeimmät ominaisuudet ovat keveys, kovuus, hyvien lujuusominaisuuksien summasta muodostuva suojaavuus ja pieni tilantarve. Boorikarbidissa yhdistyvät kaikki nämä ominaisuudet.

Boorikarbidi (B_4C) on kolmanneksi kovin tunnettu aine timantin ja kuutiollisen boorinitridin jälkeen. Seostamattomana sen kovuus on 30 GPa Vickers, tiheys $2,51 \text{ g/cm}^3$, kimmomoduli 448 GPa ja sulamispiste 2450°C . Se on sähköä johtavaa ja on kemiallisen passiivisuutensa ansiosta hyvin korroosiota kestävä. Seostamattomana se on kuitenkin haurasta ja murtuu täten herkästi. Boorikarbidia käytetään yleisesti ballistisissa suojalevyissä, hioma-aineena, hiekkapuhallussuuttimissa sekä säteilysuojamateriaalina ydinvoimaloissa. (Yavas et al., 2015, s. 8936; Kang, 2001, s.1.)

Boorikarbidia voidaan valmistaa boorihaposta ja hiilestä valokaariuunissa pyrolyysireaktiolla tai magnesiumista, hiilestä ja boorihaposta (tai anhydroidusta boraksista) magnesioteremisellä reaktiolla. Magnesioteremisellä reaktiolla valmistetun boorikarbidin raekoko ja rakeiden väliset kokoerot ovat pieniä ja lopputuotteen valmistusprosessi ja rakenteen puristaminen tiiviiksi helpottuu. (Farzaneh. et al., 2015, s. 13658–13659.)



Kuva 1. Boorikarbidituotteiden valmistamiseen käytettävä kuumapuristuslaite (Industrial Heating, 2016).

Suojarakennetuotteet, joiden rakenteesta valtaosa on boorikarbida, valmistetaan pääsääntöisesti kahdella eri metodilla. Perinteisellä kuumapuristuksella (kuva 1) kovassa paineessa ja lämpötilassa (n. 2200°C ja 15–30 MPa) valmistamalla voidaan saavuttaa n. 95 % tiheys lopputuotteeseen, mutta uudemmalla kipinäplasmastrauksella (SPS) hieman alemassa 1750 °C lämpötilassa ja n. 40 MPa:n paineessa sintrattujen kappaleiden tiheys voi olla miltei 100 %. Kipinäplasmastrauksen edut korostuvat erityisesti seostettaessa sintrattavaa boorikarbida hiilinanokuiduilla ja – putkilla, sillä seosaineet saadaan tasaisemmin jakautuneiksi koko rakenteeseen ja raekoko pidettyä pienempänä kuin kuumapuristamalla. Alemman lämpötilan johdosta vältytään paremmin myös nanohiiliputkien kuumennuksen aikaisilta vaurioilta. (Yavas et al., 2015, s. 8938–8940; Hirota. et al., 2015, s.42–44; Duet al., 2015, s.1400–1401.)

Keraamien ominaisuuksiin (myös boorikarbidi) voidaan vaikuttaa pääsääntöisesti kolmella eri tavalla: jauheen ominaisuuksilla, seoksen ominaisuuksilla ja jauhemetallurgisen prosessin parametreilla. Kuvan 2 mukaisesti jauheen ominaisuuksiin vaikuttavat ensisijaisesti huokoisuus, puhtausaste ja raekoko. Seostamalla voidaan vaikuttaa useisiin eri ominaisuuksiin, mutta erityisesti materiaalin sitkeyteen. Jauhemetallurgisessa prosessissa säädetään lämpötilaa, painetta, puristussuuntaa ja lisäksi sintrausmenetelmän valinta vaikuttaa lopputuotteen ominaisuuksiin.



Kuva 2. Keraamien ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät ja niiden pääluokat.

4 BOORIKARBIDIN SEOSTAMINEN HIILINANOPUTKILLA

Boorikarbidi täyttää suojarakennemateriaalilta vaaditut ominaisuudet pääosin erittäin hyvin, mutta seostamattoman monoliittisen boorikarbidin hauraus eli vähäinen sitkeys on sen heikko kohta. Sitkeyttä voidaan kuitenkin parantaa merkittävästi erilaisilla seostuksilla, joista nanoseostus on hyödyiltään merkittävin.

Boorikarbidin nanoseostuksessa on periaatteessa kolme vaihtoehtoa: seostaminen nanopartikkeleilla, nanojauheilla tai nanokuiduilla. Tarkastelu voi tapahtua monella eri tasolla: fysikaalis-kemiallisen, yksittäisen komponentin ominaisuuden tai kokonaisen tuotteen rakenteen ominaisuuksien tasolla. Tässä tutkimuksessa keskitytään boorikarbidin seostamiseen nanohiiliputkilla (CNT, carbon nanotubes) tuotteen käyttöarvojen kannalta. Seostettaessa hiilinanoputkia boorikarbidiin tulee materiaalista komposiitti, B_4C_n toimiessa rakenteen matriisina ja hiilinanoputkien ollessa lujitteena. Lujitteen kuidut kantavat valtaosan rakenteeseen kohdistuvista rasituksista.

4.1 Hiilinanoputket

Hiilinanoputket ovat halkaisijaltaan 5-40 nm kokoisia joko yksi- tai moniseinäisiä hiiliatomeista muodostuneita putkia, jotka voivat olla jopa 1000 kertaa halkaisijansa pituisia. Teoreettisilta arvoiltaan ne ovat todella lujia (jopa 100 kertaa lujempia kuin teräs) ja kestävät kohtalaisen hyvin korkeita ($\sim 1500^\circ\text{C}$) lämpötiloja ja johtavat sähköä jopa 1000 kertaa kuparia paremmin. (Samal & Bal, 2008, s. 357-358.) Hiilinanoputkien valmistamiselle on useita erilaisia tapoja, mutta kolme päämetodia muodostavat enemmistön tuotannosta. Perinteisin niistä on valokaarimetodi, jossa kahden heliumsuojavaasuympäristössä olevan grafiittijohtimen väliin synnytetään valokaaripurkaus. Valokaaren aikaansaama 2000–3000 °C lämpötila höyrystää anodin sisältämää grafiittia ja siihen seostettua siirtymämetallia (rauta, koboltti tai nikkelseostus) ja nanohiiliputket muodostuvat anodin tai kammion seinien pinnoille. (Mubarak et al., 2014, s. 1187–1189.)

Toinen korkea prosessilämpötilaa hyödyntävä CNT-valmistusmenetelmä on laserablaatio, jossa lasersäde kohdistetaan argon-suojavaasussa olevaan grafiittikappaleeseen ja säteen sisältämällä energialla höyrystetty seostettu grafiitti muodostaa nanohiiliputkia

vesijähdytetylle pinnalle uunin sisällä. Kuten valokaarimetodikin, kuluttaa laserablaatio runsaasti energiaa suhteessa tuotettuun nanohiiliputkien määrään, sillä 2 kW:n jatkuvalla laserteholla voidaan tunnissa tuottaa vain noin 1-2 grammaa valmiita nanoputkia. Kummankin menetelmän haittapuolena on myös syntyneiden nanohiiliputkien satunnainen koostumus, sillä lopputuotteena on työlästä erottelu- ja puhdistusvaihetta vaativa sekoitus yksi- ja moniseinäisiä putkia sekä seostamisesta ja laitteistosta aiheutuneita epäpuhtauksia. (Mubarak et al., 2014, s. 1189–1190.)

Kolmas ja samalla uusiin metodi nanohiiliputkien valmistukseen on CVD-valmistus (chemical vapor deposition). Siinä johdetaan kaksivaiheiseen, loppupäästä avoimeen putkimaiseen uuniin sekä suojakaasua että hiilipitoista prosessikaasua, esimerkiksi metaania. Uunin ensimmäisessä vaiheessa kaasut esilämmitetään ja ne reagoivat uunin pohjalla kulkevan kuljetusveneen katalyytin kanssa. Uunin toiseen vaiheeseen siirryttyään kaasut lämmitetään reaktiolämpötilaansa (700-1200 °C) ja nanohiiliputkia muodostuu sekä uunin seinämiin että kuljetusveneeseen. Kaasun virtausta ja reaktiolämpötiloja muuttamalla voidaan vaikuttaa syntyvien nanohiiliputkien koostumukseen ja tyyppiin. Laajempien säätömahdollisuuksiensa ja alempien prosessilämpötilojensa ansiosta CVD-valmistusmetodi on lupaavin nanohiiliputkien valmistusmetodi CNT-teollisuuden näkökulmasta. (Mubarak et al., 2014, s. 1190–1192.)

4.2 Hiilinanoputkiseostamisen hallinta

Hiilinanoputket vaikuttavat matriisin ominaisuuksiin monin tavoin. Koska hiilinanoputket hillitsevät rakeenkasvua valmistusvaiheessa ja raekoko vaikuttaa kovuuteen, muuttuu lopputuotteen kovuus hiilinanoputkien massaosuuden mukana. Hiilinanoputkien sitkeyttä lisäävä vaikutus perustuu juuri boorikarbidin raekoon pienentymiseen, särön syntymisen ja etenemisen estämiseen, erilaisten valmistusvaiheen virheiden kasvun hillitsemiseen ja niiden siltautumiseen. (Samal & Bal, 2008, s. 359–362.)

Kuitujen luistaessa matriisissa, niiden kosketuspintojen välinen kitka absorboi rakenteeseen kohdistettujen voimien liike-energiaa. Kuitujen katkeilu lisää jonkin verran tätä vaikutusta.

Huolimatta hiilinanoputkien lukuisista hyvistä ominaisuuksista keraamimatriisien sitkistämisen kannalta, on kuitujen kunnollinen tartunta matriisiin erittäin vaikea saavuttaa. Sileäseinäisten hiilinanoputkien pinta on luonnostaan erittäin liukas ja kuitujen kiinnipysyminen kuormitustilanteessa tämän takia haastavaa. Käytettäessä moniseinäisiä nanohiiliputkia yksiseinäisten sijaan saadaan teoreettinen tartuntapinta-ala kasvatettua yli satakertaiseksi yksiseinäiseen verrattuna. Moniseinäisiä kuituja on helpompi ja halvempi valmistaa, mutta niiden sisäkkäinen rakenne on ongelmallinen tartunnan ja liukukitkan osalta: ulomman kuidun pysyessä matriisissa kiinni, liikuu sisempi kuitu ilman kitkaa ja liike-energian absorboitumisvaikutus menetetään. Tämän takia yksiseinäiset nanohiiliputket ovat suojarakennekäytössä tehokkaampia absorboimaan iskuenergiaa.

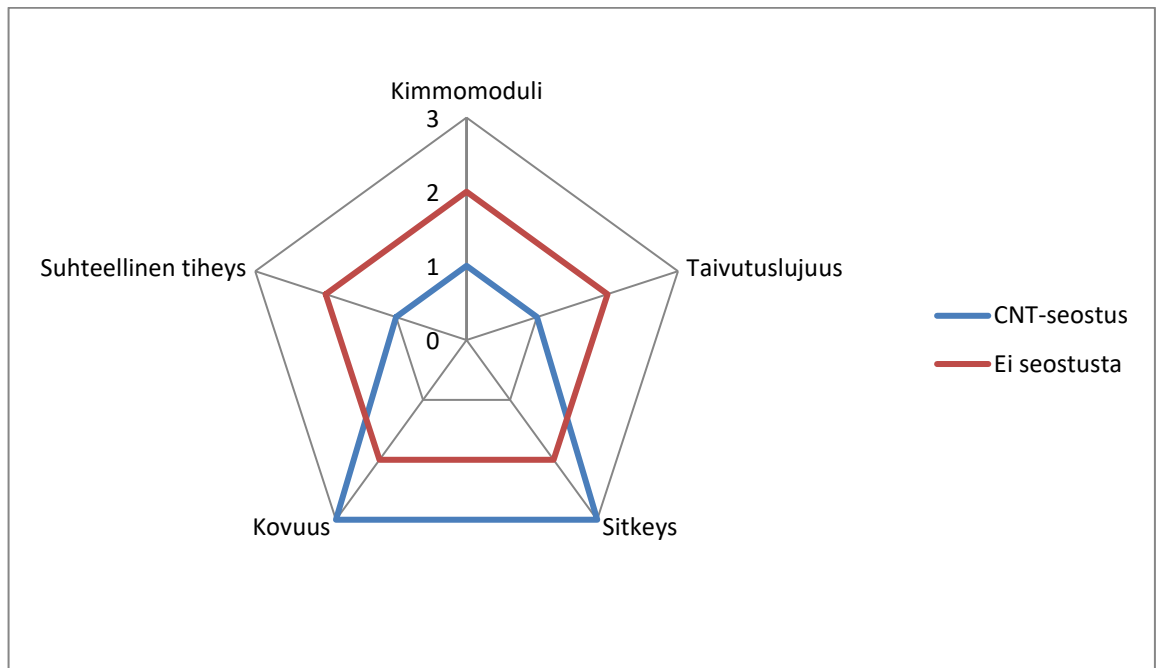
Hiilinanoputket ovat periaatteiltaan kuin putkeksi käärittyjä grafeenikalvoja, joissa hiiliatomit ovat järjestäytyneenä kuuden atomin renkaiksi. Renkaiden tyyppiä ja koostumusta voidaan muuttaa paremman tartunnan saavuttamiseksi. Hiiliatomeiden muodostamaa kuusikulmarakennetta voidaan rikkoa muodostamalla kahdeksankulmaisia renkaita kuusikulmaisten ketjujen väliin tai kuusikulmioiden tartuntatapaa ja -kulmaa toisiinsa voidaan muunnella. Putkiin voidaan muodostaa myös hiiliatomien symmetrisyyden poikkeumiin perustuvia kohoumia järjestelemällä atomeiden keskinäisiä sidoksia uudelleen ja näin kasvattaa niiden pinnalla olevaa tartuntapinta-alaa. Yksittäisten putkien sijaan voidaan valmistaa myös erilaisia haarautuvia putkirakenteita sekä muodostamalla useiden kuitujen yhteenliittyneitä kimppuja ja täten parantaa kuitujen ja varsinaisen matriisin tartuntaa.

Seostettaessa boorikarbida nanohiiliputkilla, boorikarbidijauhe ja seostettavat hiilinanoputket sekoitetaan ennen kuumennusta väliaineeseen. Näin tehdään, jotta nanoputkien ja muiden seosaineiden jakauma olisi mahdollisimman tasainen ja lopullisen tuotteen materiaaliominaisuudet mahdollisimman hyvät ja tasalaatuiset. Väliaineena käytetään useimmiten etanolia, mutta dimemetyyliforamidin välityksellä ja ultraäänellä sekoitettuna on keraameilla yleisesti saatu tasalaatuisempaa jakaumaa seostetuille hiilinanoputkille kuin etanolilla. (Inam et al., 2008, s. 4.)

Boorikarbidin hiilipitoisuus nostaa kimmomodulia vahvasti aina 13 atomimääräprosenttiin asti. Kolmen prosenttiyksikön nousu hiilipitoisuudessa 10 prosentista 13 prosenttiin nostaa kimmomodulia 50–100 MPa (25 – 40 %). Tämän jälkeen nousua tapahtuu hiilipitoisuuden noustessa, mutta huomattavasti maltillisemmassa määrässä. Myös boorikarbidin kovuus nousee hiilipitoisuuden kasvaessa aina 20 atomiprosenttiin asti, jonka jälkeen se dramaattisesti putoaa huippuarvostaan. Hiilipitoisuuden kasvun myötä boorikarbidituotteensuhteellinen tiheys laskee, joten optimaalinen hiilipitoisuuden arvo riippuu kulloisestakin käyttötarkoituksesta ja on kompromissi korkean hiilipitoisuuden ja valmiin rakenteen tiheyden välillä. (Domnich et al., 2011, s. 3618–3620.)

Nanohiiliputkiseostus nostaa kipinäplasmastrauksessa sekä kovuutta että taivutuskestävyyttä. 3 painoprosentin nanohiiliputkiseostus nostaa boorikarbidin taivutuskestävyyttä noin 15 % ja kovuutta noin 30 % samalla lämmitysnopeudella valmistettuun seostamattomaan boorikarbidisiin verrattuna. (Yavas et al., 2015, s. 8937.)

Kuumapuristamalla valmistetun boorikarbidin taivutuskestävyys kasvaa nanohiiliputkiseostuksen kasvaessa, joskin kasvunopeus hidastuu merkittävästi n. 4 massaprosentin jälkeen. Valmistustavasta johtuen huokoisuus kasvaa ja kovuus ja kimmomoduli laskevat muutaman prosentin nanohiiliputkiseostuksen takia. (Kobayashi et al., 2012, s. 525.) Kuvassa 3 on esitetty CNT-seostuksen vaikutus boorikarbidin materiaaliarvoihin seostamattomaan boorikarbidisiin verrattuna. Kuvaajan arvo 3 vastaa korkeampaa materiaaliarvoa ja arvo 1 taas matalampaa materiaaliarvoa.



Kuva 3. CNT-seostuksen vaikutus boorikarbidin mekaanisiin ominaisuuksiin.

5 KONSTRUKTIOMATERIAALIN VALINTA TAISTELUKENTÄN OLOSUHTEISIIN

Materiaaliominaisuuksien lisäksi jopa suuremmat vaikutukset itse lopputuotteen ominaisuuksiin ovat valmistusmenetelmillä. Jauhemetallurgian yleiset valmistusperiaatteet pätevät myös boorikarbidikeraamien valmistukseen.

Puristussuunta, -voima ja – lämpötila vaikuttavat tuotteen lopputiheyteen. Kohtisuoralla puristuksella saavutetaan suurempi puristuslujuus, sitkeys, kovuus sekä kimmomoduli rakenteelle kuin sivuttaissuuntaisella puristuksella. Seostuksella on suora vaikutus taivutuskestävyyteen, muokattavuuteen, kimmomoduliin, lämmönjohtamiseen ja muodostuvaan kiderakenteeseen. Rakeen koko ja sintraustapa vaikuttavat lujuuteen, tiheyteen ja kimmomodulin suuruuteen ja sintraustapa itsessään myös kovuuteen. Puristuskulmalla ja rakeiden keskinäisellä liityntämekanismilla on vaikutuksensa puristus- ja taivutuslujuuteen sekä lämpölaajenemisen suuruuteen.

Valmistusmetodien valinta on jatkuvaa tasapainoilua ja kompromissien tekoa ominaisuuksista, joten lopputuotteen vaatimusprofiili on tärkeää määrittää tarkasti kulloiseenkin käyttökohteeseen optimoidusti ennen valmistusta. Suojarakennekäytön kannalta tuotteen tärkeimmät materiaaliarvot nelikenttäanalyysiä varten ovat kimmokerroin, kovuus, sitkeys ja taivutuslujuus, ja ne on johdettu suoraan suojarakenteen vaatimusprofiilista. Suojamateriaalin suuri kovuus heikentää ja hajottaa luotia ja etenkin sen kärkeä sen osuessa levyyn ja tämä kovuus täytyy kyetä säilyttämään iskuista huolimatta (Abramshe, 2006, s. 15). Ajoneuvorakenteissa suurin yksittäinen vaatimus kohdistuu hyvälle kiinnitettävyydelle ja johtuen pienimmästä ampumaetäisyydestä henkilösuojaimen ja uhan välillä, täytyy henkilösuojainten kestää useita osumia pienelle alueelle rikkoutumatta.

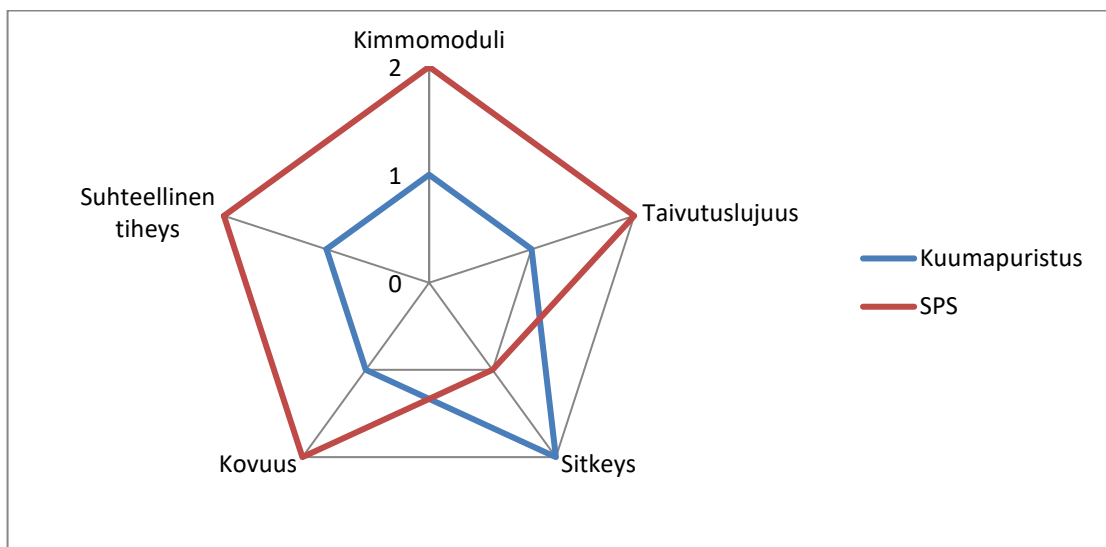
Valittaessa konstruktiomateriaalia strategiseen kohteeseen, korostuu erityisesti sen tarkan käyttökohteen tuntemus. Tässä kappaleessa konstruktiomateriaalien valinta kohdistuu levymäisiin suojaelementteihin, joiden lopullisessa suorituskykyvertailussa täytyy pelkkien

materiaaliominaisuuksien lisäksi ottaa huomioon myös lopputuotteen käyttökohde, kiinnitystapa ja kokonaispaino.

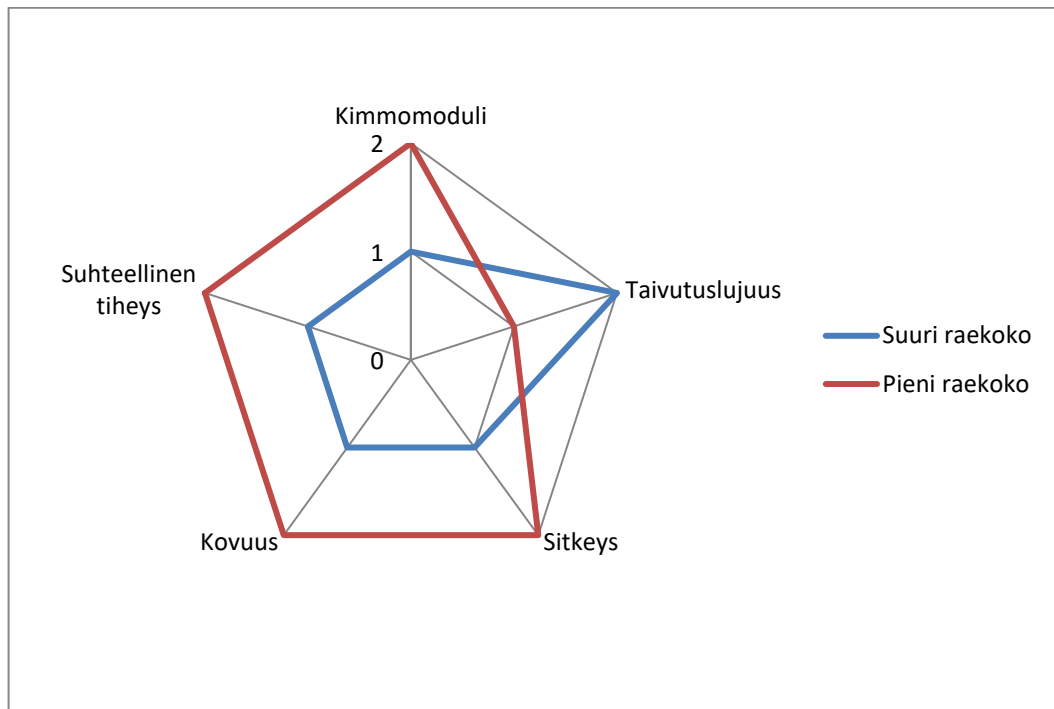
Boorikarbidin ominaisuuksia voidaan säätää monilla eri tavoin suojarakennekäyttöön soveltuviksi ja vastaamaan kulloiseenkin siihen kohdistuvaan uhkaan optimaalisimmalla tavalla. Taulukossa 1 ja kuvissa 4-6 ja on esitetty CNT-seostuksen, sintraustavan, hiilipitoisuuden ja raekoon sekä eri seostusaineiden vaikutukset lopputuotteen ominaisuuksiin. Kaikkia arvoja on verrattu seostamattomaan lopputuotteeseen ja arvo 2 tarkoittaa kyseisen materiaaliarvon olevan korkeampi kuin seostamaton verrokki ja 1 sen olevan matalampi.

Taulukko 1. Seostuksen vaikutus boorikarbidin ominaisuuksiin.

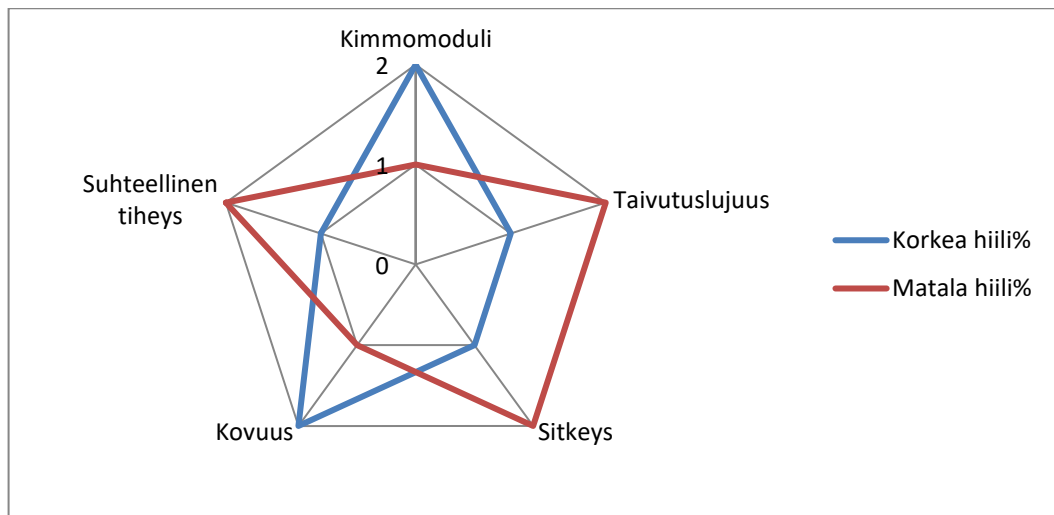
	Kimmomoduli	Taivutuslujuus	Sitkeys	Kovuus	Suhteellinen tiheys
Zirkonium (5%)	2	1	2	2	2
Al ₂ O ₃	1	1	2	1	2
Ti(C)	2	2	1	1	2
SiC	1	2	1	1	1
AlN	1	1	1	1	2



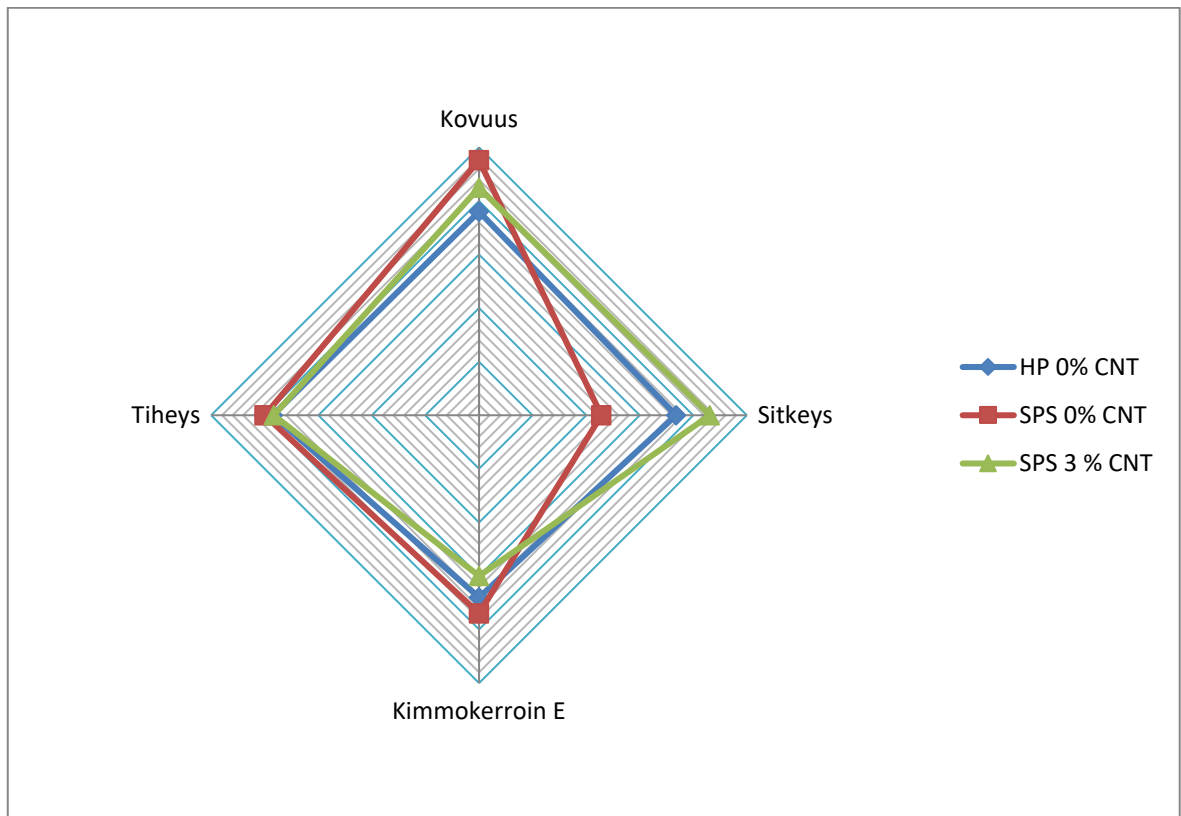
Kuva 4. Sintraustavan vaikutus boorikarbidin mekaanisiin ominaisuuksiin.



Kuva 5. Raekoon vaikutus boorikarbidin mekaanisiin ominaisuuksiin.



Kuva 6. Hiilipitoisuuden vaikutus boorikarbidin mekaanisiin ominaisuuksiin.



Kuva 7. Sintraustavan ja CNT-seostuksen yhteisvaikutus boorikarbidilevyn ominaisuuksiin suhteellisilla vertailuarvoilla esitettyinä.

Kuvasta 7 nähdään nanohiiliputkien ja sintraustavan yhteisvaikutus valmiin sintratun rakenteen ominaisuuksiin. Selkeästi parhaan sitkeysominaisuudet saavutetaan kipinäplasma-sintraustalla ja 3 painoprosentin CNT-seostetulla koostumuksella, vaikkakin kovuuden, tiheyden ja kimmokertoimen arvoista joudutaan tinkimään. Kuten kuvista 3-6 sekä taulukosta 1 nähdään, voidaan näitäkin suojarakenteen ominaisuuksien osa-alueita parantaa sintraustavan ja CNT-seostuksen ulkopuolisilla keinoilla. Kimmokertoimen arvoa sekä kovuutta saadaan nostettua mm. nostamalla hiilipitoisuutta, pienentämällä raekokoja tai zirkonium-seostuksella. Suhteellista tiheyttä voidaan parantaa alumiini-, titaani- tai zirkoniumpohjaisella seostuksella sekä raekoon pienentämisellä.

6 BOORIKARBIDIN KÄYTTÖ SUOJARAKENTEISSA

Valtaosa B_4C -tuotteista valmistetaan edelleen kuumapuristamalla, 1960-luvulla kehitetyn metodin levinneisyydestä ja tunnettuudesta johtuen. Myös uudemmalla, kipinäplasma-intrausmetodilla (SPS) valmistettuja suojarakenteita on saatavissa, ja 2010-luvun aikana se on yleistynyt boorikarbidin valmistusmenetelmänä alemman valmistuslämpötilansa ja parempien lopputuoteominaisuuksiensa ansiosta kuumapuristamiseen verrattuna.

Nykyisillä valmistusmenetelmillä boorikarbidista on mahdollista valmistaa vain suhteellisen yksinkertaisia muotoja eli erilaisia levyjä ja kaaria (kuva 8). Kaupallisesti saatavissa olevia muotoja ovat erilaiset monikulmiot (kolmio, neliö, heksagonaali), ympyrät sekä näiden yhdistelmät ja loivat moninkertaiset kaaret. Geometriset muodot koneistetaan timanttiterillä jauhemetallurgisen prosessin jälkeen valmiisiin boorikarbidilevyihin. Levypaloista koostetun mosaiikkimaisen rakenteen etuna on mahdollisuus korvata vaurioitunut pala uudella sen sijaan, että koko rakenne jouduttaisiin uusimaan.



Kuva 8. Tyypillisiä kaupallisesti saatavissa olevia ABS-pinnoitettuja boorikarbidilevyjä (Global Armour, 2016).

Yleisesti verrattaessa boorikarbida muihin suojarakennemateriaaleihin käytetään boorikarbida kaikkein haastavimmissa ja korkeimpia suoritusarvoja vaativissa kohteissa. Näitä ovat muun muassa helikoptereiden (kuva 9) ja panssarivaunujen luodinkestävät mutta kevyet suojarakenteet sekä erittäin hyvää kulutuskestävyyttä vaativat rakenteet, kuten avaruussukkuloiden lämpökilvet. (Cardarelli, 2008, s. 637.) Muita luotisuojamateriaaleja ovat esimerkiksi alumiinioksidi ja piikarbidi sekä läpinäkyvä alumiinioksinitridi, jota käytetään luodinkestävien ikkunoiden ja lasien valmistamiseen (Schulz, 2010).



Kuva 9. Apache AH-64-taisteluhelikopterin istuimet ja tärkeimmät järjestelmät on suojattu Kevlar-vahvisteisilla boorikarbidi-elementeillä (Imgur, 2016).

Kuumapuristetusta, moniosumakestävästä boorikarbidilevyistä voidaan valmistaa kokonaisia ilma-alusten suojajärjestelmiä helikoptereihin ja lentokoneisiin suojaamaan niitä ja niiden miehistöä erityisesti maasta tulevalta ilmatorjunta- ja käsiasetulelta. Suojajärjestelmiin kuuluu esimerkiksi keraamisilla suojalevyillä varustetut istuimet, polttoaine-, hydraulikka- ja sähköjärjestelmien suojapaneelin, roottorin navan suojat ja matkustamon ballistiset suojat (Pat. US 4824624A., 1989, s. 4). Boorikarbida on hyödynnetty muun muassa Chinook-, Black Hawk-, Super Puma-, Apache- ja Super Cobra-sotilashelikoptereiden sekä C-17- ja C-130-lentokoneiden suojajärjestelmissä(The

American Ceramic Society, 2014). Suojalevyt ovat useimmiten toiselta puolelta aramidikuiduilla ja toiselta puolelta nylonilla pintavahvistettuja, parhaan suojarakenteen sirpaloitumiselta suojaavan rakenteen takaamiseksi. Kooltaan levyt ovat tyypillisesti 20–30 cm leveitä, 20–45 cm korkeita ja 0,6–1,2 cm paksuja. (Pat. US 4824624A., 1989, s. 4.)

Henkilökohtaisten suojien paino ja suojaavuuskriteerit B₄C-suojalevyillä vahvistetut suojaliivit, kuten kuvassa 10, täyttävät myös erittäin hyvin, sillä erikokoisia ja muotoisista levyistä saa yhdisteltyä ja modifioitua kullekin käyttäjälleen sopivimman yhdistelmän. Boorikarbidisia keho-, kyli- ja olkapääsuoja sisältäviä suojaliivejä käytetään muun muassa USA:n erikoisjoukoissa, ja rakenteeltaan vaativimmat jalka-, käsi- ja lantiosuojat ovat kehitysvaiheessa (The American Ceramic Society, 2014).



Kuva 10. Suojaliivien taskuihin asetettavat moniosumakestävät suojalevyt muodostavat tehokkaan suojan luoteja ja sirpaleita vastaan (U.S. Army, 2010).

Boorikarbidia voitaisiin tehokkaasti hyödyntää myös henkilövoimin siirrettävissä tuliasema- ja kohdesuojissa. Näillä kiinteämmillä rakenteilla voitaisiin tehokkaasti suojata kohteita sekä taistelutilanteissa että rauhanajan operaatioissa, joissa on tarve joko ennaltaehkäistä, rajoittaa tai suojata kohteita räjähd- tai tuliasevaikutuksilta. Sotatilannealueilla sotilas- ja siviilijoukkoja voidaan suojata tehokkaasti boorikarbidilla halpoja, niin sanottuja improvisoituja räjähteitä, kuten kotitekoisia naula- ja haulipommeja vastaan (Pat. US 8536080B2., 2013, s. 15).

7 BOORIKARBIDIN TULEVAISUUDENNÄKYMÄT SUOJARAKENTEISSA

Kappaleessa päivitetään STAE 2020-tutkimusta vuodelta 2004 ja sen tulevaisuudennäkymiä vuoden 2016 tietouden pohjalta, sekä johdetaan sen pohjalta uusi arvio suojarakenteiden käytöstä Suomen Puolustusvoimissa vuodelle 2020.

Boorikarbidi on puolijohdemateriaali, eli se johtaa sähköä selkeästi paremmin kuin eristeeksi luokiteltavat materiaalit, mutta kuitenkin huonommin kuin varsinaiset sähköä hyvin johtavat aineet. Nanohiiliputket ovat niiden tyypistä riippuen parhaimmillaan sähkönjohtavuudessa parempia kuin yksikään metalli tai niillä voi olla hyvät puolijohdeominaisuudet. Nanohiiliputkille on myös tyypillistä niiden resistanssin herkkä reagointi niihin kiinnityviin atomeihin, jolloin niitä voidaan hyödyntää esimerkiksi herkkien sensorien osina. Putkien pieni koko myös mahdollistaa erittäin pienikokoisten sähköisten piirien valmistamisen, sillä niiden tarvitsema pienin johtimen leveys on paljon pienempi kuin metalleilla.

Vuonna 2005 tehdyn STAE 2020-arvion mukaan dataliikenne tulee lisääntymään merkittävästi ja taistelujärjestelmien hyvää liikkuvuutta korostettiin samalla kun yksittäisen taistelijan kantamien järjestelmien määrän arvioitiin kasvavan. Tämä luonnollisesti luo tarpeen järjestelmien kevennykselle samalla kun suoritusarvojen, muunneltavuuden ja etenkin viestijärjestelmien yhteistoiminnan täytyy parantua voimakkaasti. Etenkin ajoneuvorakenteissa nähtiin useiden eri järjestelmien ja niiden toiminnallisten osien väillä integroimistarve eli niin sanottu multifunktionaalisuustarve. Hiilinanoputkien teoreettisten arvojen perusteella niiden arvioitiin olevan erittäin lupaava seostusaine, mutta niiden todettiin olevan vuonna 2005 vasta tutkimusasteella. Kuitulujittamisessa vuonna 2005 tehdyn tulevaisuusarvion perusteella uskottiin vielä hiilinanoputkia painavamman ja lujuusominaisuuksiltaan huonomman aramidikuidun käyttöön.

Keraamien luotisuojakäytössä arvioitiin että alumiinioksidi ja Al_3O_3 -aramidikuituinen luotisuoja on yleisesti käytetyin luotisuojaliivien suojamateriaali, ja boorikarbidin heikkoudeksi mainittiin pirstaloitumisen aiheuttama huono moniosumakestävyys. Alumiinipohjaisten ballististen suojiin heikkoudeksi tosin mainittiin erittäin nopeiden

(>1800 m/s) ammusten läpäisykyky niihin, ja juuri tämän kaltaisia heikkouksia vastaan boorikarbidin CNT-seostusta tehdään. Boorikarbidin myös kestää sekä perinteiset palo- ja lämpövaikutteisten aseiden sekä täysin uudenlaisten laser-aseiden pistemäiset lämpövaikutukset huomattavasti paremmin kuin esimerkiksi panssariteräs.

U.S. Army on tutkinut keraami-metalli- ja keraami-metalli-komposiittirakenteiden soveltamista suojarakenteisiin. Ensimmäinen tutkimusten perusteella kehitetyistä suojarakennetyypeistä on metallilla kapseloitu keraamisuojailevy, jonka suorituskykyä on kyetty parantamaan metallin hyvällä tartunnalla keraamiin ja näin kyetty viivyttämään keraamilevyn pirstoutumista osumahetkellä. Toinen kehitetty malli on polymeerimatriisikomposiitilla päällystetty keraamisuojailevy, jonka pinnoite estää kaikkien keraamisirpaleiden irtautumisen rakenteesta ja pitää sen kasassa. Polymeerikomposiittikeraamilevyjä käytetään jo Stryker-Interim Armored Vehicle-ajoneuvon suojamateriaalina. (The American Ceramic Society, 2014.)

Suojarakenteet itsessään ovat perinteisesti vain ja ainoastaan suojaamista varten ja täten aiheuttavat usein vain lisäpainoa jo valmiin ja toimivan rakenteen päälle. Jos suojarakenteita saataisiin toiminnallistettua enemmän, esimerkiksi sisällyttämällä rakenteisiin tieto- ja viestiliikenne- tai häiriölähetinantenneiden toimintoja nanohiiliputkien sähköisiä ominaisuuksia hyödyntämällä, saataisiin kokonaisuudet yksinkertaistettua. Erillisten komponenttien määrän vähennyksestä saatu painonpudotus kompensoisi ainakin osittain suojarakenteiden tuomaa lisätaakkaa.

Boorikarbidikeraamin CNT-seostusta voidaan mahdollisesti käyttää myös jonkinlaisen suojarakenteiden osuma- ja vaurio seuranta järjestelmän rakentamiseen, jossa suojarakenteissa kiinteänä ovat sensorit tai nanoputkiverkot rekisteröivät vauriot tai määrittävät, mistä suunnasta osuma tuli esimerkiksi ajoneuvokäytössä. Sähköisten ominaisuuksiensa puolesta kiinteiden ja ajoneuvojen suojien rakenteissa sekä henkilösuojainlevyissä voisi olla potentiaalia energiantuottoon esimerkiksi aurinkokennojen muodossa, jolloin suojarakenne toimisi tukilevynä ja sen sisällä jo valmiiksi kulkevat CNT-johteet kuljettaisivat sähköä sitä tarvitseville laitteille.

Tulevaisuuden boorikarbidikeraamisten suojarakenteiden seostusmahdollisuuksista

nykyisen tiedon valossa lupaavimmilta näyttäisivät ainakin nanohiilikuidut (CNF) sekä erilaiset levymäiset grafeenilamellit niiden helpommin saavutettavissa olevan tartunnan ansiosta. Lisätutkimuksia vaativia kohteita boorikarbidin suojarakennekäytön kannalta ovat ainakin, miten nanohiiliputkiseostaminen yhdessä muiden keraamiseostusten kanssa todellisuudessa vaikuttaa sen materiaaliominaisuuksiin sekä mitkä ovat seosaineiden optimaalisimmat pitoisuudet lopputuotteen materiaaliominaisuuksien kannalta.

LÄHTEET

Abramshe, R. 2006. Improving ceramic armour performance with better materials. *Ceramic Industry*, Vol. 156, Iss. 10. s. 14-17.

Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R., Chhowalla, M. 2011. Boron Carbide: structure, properties, and stability under stress. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 94, Iss. 11. s. 3605-3628.

Du, X., Zhang, Z., Wang, Y., Wang, J., Wang, W., Wang, H. and Fu, Z. 2015. Hot-Pressing Kinetics and Densification Mechanisms of Boron Carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 98. s. 1400–1406.

Cardarelli, F. 2008. *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*. Springer Science & Business Media. 1339 s.

Farzaneh, F., Golestanifard, F., Sheiklaleslami, M., Nourbakhsh, A. 2015. New route for preparing nanosized boron carbide powder via magnesiothermic reduction using mesoporous carbon. *Ceramics International*, Vol. 41, Iss. 10, part A. s. 13658–13662.

Global armour. 2016. Boron carbide level IV plate - body armour. [Viitattu 10.3.2016]. Saatavissa: <http://www.copybook.com/military/companies/global-armour-limited/articles/boron-carbide-level-iv-plate-body-armour>

Hirota, K., Shima, M., Chen, X., Goto, N., Kato, M., Nishimura, T. 2015. Fabrication of dense B₄C/CNF composites having extraordinary high strength and toughness at elevated temperatures. *Materials Science and Engineering*, Vol. 628. s. 41–49.

Imgur. 2016. Boeing AH-64 Apache. [Viitattu 10.3.2016]. Saatavissa: <http://imgur.com/gallery/meHOc>

Inam, F., Yan, H., Reece, M., Peijs, T. 2008. Dimethylformamide: an effective dispersant for making ceramic–carbon nanotube composites. *Nanotechnology*, Vol. 19, Iss. 19. s. 11–5.

Industrial Heating. 2016. Fast direct hot-pressing brings sintering up to speed. [Viitattu 10.3.2016]. Saatavissa: <http://www.industrialheating.com/articles/91417-fast-direct-hot-pressing-brings-sintering-up-to-speed?v=preview>

Kang, C.T. 2001. Properties, applications and product information of boron carbide, B₄C. [7-Stars Internationalin internetsivu]. [Viitattu 21.2.2016]. Saatavissa:<http://www.7-stars-international.com/b4c.html>

Kobayashi, T., Yoshida, K., Yano, T. 2012. Microstructure, mechanical and thermal properties of B₄C/CNT composites with Al additive. *Journal of Nuclear Materials*, Vol.440, Iss.1-3, s. 524–529.

Mubarak, N., Abdullah, E., Jayakumar, N., Sahu, J. 2014. An overview on methods for the production of carbon nanotubes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 20, Iss. 4. s. 11861–1197.

Pat. US 4824624A. 1989. Method of manufacturing boron carbide armor tiles. (Palicka, R., Negrych, J.) *Appl. US 06/684930*, 1984-12-17. Publ. 1989-04-25. 8 s.

Pat. US 8536080B2. 2013. Boron carbide ceramic fibers. (Mohammadi, F., Cass, R.B.) *Appl. US 12/486832*, 2008-06-18. Publ. 2013-09-17. 22 s.

Pääesikunta sotatalousosasto. 2004. Puolustusjärjestelmien kehitys. Sotatekninen arvio ja ennuste 2020 STAE 2020, osa 2. Helsinki: Edita Prima Oy. 418 s.

Samal, S. & Bal, S. 2008. Carbon Nanotube Reinforced Ceramic Matrix Composites- A Review. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 7, Iss. 4. s. 3551–370.

Schulz, W. 2010. Body Armor, High-tech ceramics protect soldiers from a wide range of ballistic threats. *Chemical & Engineering News*, Vol. 88, Iss. 13.

The American Ceramic Society. 2014. *Ceramics & the military*. [Viitattu 10.3.2016]. Saatavissa: <http://ceramics.org/learn-about-ceramics/ceramics-the-military>

U.S. Army. 2010. Body Armor, High-tech ceramics protect soldiers from a wide range of ballistic threats. *Chemical & Engineering News*, Vol. 88, Iss. 13.

Yavas, B., Sahin, F., Yucel, O., Goller, G. 2015. Effect of particle size, heating rate and CNT-addition on densification, microstructure, and mechanical properties of B₄C ceramics. *Ceramics International* 41, Vol. 7, Iss. 7, s. 89361–8944.

LIITE I

SUOJARAKENTEEN VAATIMUSPROFIILI.

Kvalitatiiviset (laadulliset) ominaisuudet	Taistelijan henkilösuojaus		Ajoneuvorakenteet		Kiinteät rakenteet		Yht.
	Toive	Vaatimus	Toive	Vaatimus	Toive	Vaatimus	
Käyttömukavuus		2	1		1		4
Säänkestävyys		2		2		2	6
Kiinnitettävyy- s/asennettavuus	1			2	1		4
Pieni tilantarve		2		2	1		5
Pieni materiaalipaksuus		2		2	1		5
Häiveominaisuudet		2		2		1	5
Vaarattomuus ihmiselle		2	1		1		4
Valmistettavuus	1		1		1		3
Materiaalin saatavuus		2		2		2	6
Ominaistaajuuden soveltavuus	0			2	0		2
Kemiallinen stabiilius		2		2		2	6
Tarkastettavuus/laadun- varmistuksen helppous		2		2	1		5
Kuljetettavuus		2		2		2	6
Korkeiden lämpötilojen (yli 1000° C) kesto		2		2		2	6
Kvantitatiiviset (määrälliset) ominaisuudet	Toive	Vaatimus	Toive	Vaatimus	Toive	Vaatimus	
Keveys		2		2	1		5
Puristuslujuus		2		2		2	6
Iskusitkeys		2		2		2	6
Taivutuskestävyys		2		2		2	6
Vetolujuus		2		2		2	6
Yht. (max. 38)		34		35		27	