



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Jani-Pekka Rulamo

# Kevyet materiaalit autotekniikassa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinööriyö

27.11.2019

Tekijä Otsikko	Jani-Pekka Rulamo Kevyet materiaalit autotekniikassa
Sivumäärä Aika	54 sivua 27.11.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaaja	Projekti-insinööri Joel Kontturi
<p>Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan autojen valmistuksen kevyitä materiaalivaihtoehtoja, kuten kevytmetalleja, muoveja sekä komposiitteja. Työssä pyritään löytämään optimaalisia materiaaliratkaisuja ajatellen käyttökohteita.</p> <p>Työssä tarkastellaan ja verrataan autotekniikassa käytettävien kevyiden materiaalien ominaisuuksia kuten, ekologisuuutta, valmistuskustannuksia, sarjavalmistettavuutta, korjattavuutta, liitettävyyttä, kierrätettävyyttä. Kevyiden materiaalien käyttökohteita esitellään isoista itsetukevista korin osista pienempiin osiin. Työssä painotetaan materiaaleja, jotka ovat tulevaisuuden kannalta relevantteja, turvallisia, ekologisesti kestäviä ja kokonaishiilijalanjäljeltään tasapainoisia.</p> <p>Työssä perehdytään uuteen materiaalia lisäävään valmistukseen. Materiaalia lisäävä valmistus tulee olemaan vahvasti osana tulevaisuuden kevyitä autotekniikan ratkaisuja. Työssä tutkitaan myös uusimpia ja innostavia kevyiden materiaalien keksintöjä, kuten 9R-faasin ”nanopunottua” teräsalumiinia, korkean entropian metalleja ja B2-kiderakenteista alumiiniterästä.</p> <p>Työn tuloksena syntyi monipuolinen tietopaketti autojen kevyistä materiaaleista. Modernin auton valmistuksessa käytettävät metallit ovat enimmäkseen suurlujuusteräksiä ja alumiiniseoksia. Magnesiumseosten käyttö on lisääntymässä. Nämä materiaalit tulevat olemaan iso osa nykyistä optimaalista autonvalmistusta sekä iso osa tulevaisuuden autotekniikkaa.</p>	
Avainsanat	Autotekniikka, kevytmetalli, komposiitti, alumiini

Author Title	Jani-Pekka Rulamo Light Materials in Automotive Engineering
Number of Pages Date	54 pages 27 November 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor	Joel Kontturi, Project Engineer
<p>This thesis examines light materials of automotive design such as light alloys, plastics and composites. The aim was to find optimal material solutions for different kinds of uses in automotive design.</p> <p>Properties, ecology, price of manufacturing, ability to serial production, repair, connections and recycling light materials of automotive design were examined and compared. Examples of using light materials in automotive design are discussed from more complete load-carrying structures to smaller parts. The thesis focuses on materials, which will be relevant in the future, safe, ecologically sustainable and present small overall carbon footprint.</p> <p>Additive manufacturing process was also examined, which will most likely have a crucial part in automotive designing and manufacturing in the future. The thesis discusses the newest innovations of light materials such as the 9R-phase nanotwinned steel-aluminium alloy, high entropy metals and B2 crystal structure aluminium-steel alloy.</p> <p>As this thesis shows, a modern car is composed of high-strength steels and aluminium alloys. It seems that magnesium will very likely become more common as a part of automotive manufacturing. These materials are playing a big role today and will dominate the optimal automotive design in the future.</p>	
Keywords	Automotive engineering, light metal, composite, aluminium

## Sisällys

### Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Auton rakenne	2
2.1	Unibody	2
2.2	Monokokki	3
2.3	Space frame	4
2.4	Tikas (Body-On-Frame)	5
3	Materiaalia lisäävä valmistus (AM)	7
4	Nimet	8
5	Metallit	8
5.1.1	Mikrorakenne	8
5.1.2	Standardit	8
5.1.3	Korroosiotyypit ja galvaaninen korroosio	9
5.1.4	Louhinnan vaikutukset kestävään kehitykseen	12
5.2	Alumiini	12
5.3	Teräs	15
5.4	Titaani	18
5.5	Magnesium	19
5.6	Superseokset	21
5.7	Korkean entropian metallit HEA/Multikomponenttimetallit MCA/MPEA	21
6	Muovit ja komposiitit	26
6.1	PEI (ULTEM)	27
6.2	UHMWPE	28
6.3	CFRP	28
6.3.1	Carbotanium	30
6.3.2	CF-PLA	31
6.4	GFRP	32
6.5	Biokomposiitit (NFRPC)	32
6.6	Komposiittien kierrätys	33
7	Tulevaisuus	35

8	Yhteenveto materiaaleista ja niiden sovelluksista autotekniikassa	37
	Lähteet	39

## Lyhenteet ja käsitteet

NVH	Noise, Vibration and Harshness. Tällä viitataan ohjaamoon alustasta kantautuvaa ääntä, värinää ja ”kovuutta”.
AM	Additive Manufacturing. Materiaalia lisäävä valmistus tunnettu myös 3D-tulostuksena.
DED	Direct Energy Deposition. Suorakerrostus, yksi materiaalia lisäävistä tekniikoista, jossa tulostinpää tulostaa materiaalia suoraan kappaleeseen.
ADI	Austempered Ductile Iron. Isotermisesti karkaistu luja valurauta.
AHSS	Advanced High Strenght Steel. Suurlujuusteräs.
B2	Kahta alkuainetta sisältävä tilakeskinen kiderakenne.
Grade	Standardin mukaisen titaaniseoksen merkintätapa.
HEA	High Entropy Alloy. Korkean entropian metalli.
MCA	Multicomponent Alloy. Multikomponenttimetalli. Tarkoittaa samaa kuin MPEA.
MPEA	Multiple-Principal-Element Alloy. Multikomponenttimetalli. Tarkoittaa samaa kuin MCA.
LIDAR	Light Imaging Detection and Radar. Laserkeilaus. Laseriin perustuva optinen tutka.
PEI	Polyeetteri-imidi. Erikoiskestomuovi, joka tunnetaan kauppanimellä ULTEM.
PEEK	Polyeetterieetteriketoni. Erikoismuovi. Ominaisuuksiltaan parempi kuin PEI.

UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene. Erikoismuovi, jolla on pieni kitkakerroin.
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Plastic. Hiilikuitulujitteinen muovikomposiitti.
rCF	Recycled Carbon Fibre. Kierrätettyä hiilikuitulujitteista muovikomposiittia.
DiFTs	Discontinuous Fiber-reinforced Thermoplastic sheet. Lyhyistä hiilikuiduista koostuva kestumuoviarkki. Tekniikka on patentoitu.
SMC	Sheet Molding Compound. Nopea kestumuovikappaleiden valmistustekniikka.
CF-PLA	Carbon Fiber (Reinforced) Polylactic Acid. Lyhyillä hiilikuidulla vahvistettua biohajoavaa muovia. Käytetään myös nimiä PLA+CF, PLA-CF ja CFR PLA.
GFRP	Glass Fibre Reinforced Plastic. Lasikuitulujitteinen muovikomposiitti.
NFRPC	Natural Fibres Reinforced Polymer Composite. Biokomposiitti, jossa vähintään lujite tai muovi on biohajoavaa.
BMC	Bulk Molding Compound. Kestumuovikappaleiden valmistustekniikka. Samankaltainen kuin SMC-tekniikka.

## 1 Johdanto

Auton paino on ollut kautta aikojen yksi isoimmista autosuunnittelun ongelmista. Jo yli 100 vuotta sitten auton painoa yritettiin vähentää käyttämällä alumiinia. Alumiini, joka on materiaalina kevyttä, oli satunnaisessa käytössä jo 1800-luvun loppussa esimerkiksi zeppeliini-ilmalaivojen rungoissa. Ensimmäinen alumiinikorinen auto esiteltiin 1899. Alumiini oli materiaalina uusi ja sen käyttäminen oli kallista. Auto oli vielä tällöin pelkästään rikkaiden luksustuote, joten alumiinin käyttö oli mahdollista.

Alumiinin käyttö alkoi pikku hiljaa kasvaa 1900-luvun vaihteen jälkeen. Fordin T-mallin tultua markkinoille 1908 laajempi autoistuminen alkoi, ja joidenkin T-mallien koripaneelit olivat alumiinista valmistettuja. Autojen yleistyminen ja ilmailu vauhdittivat alumiinin käyttöä. Materiaalina se ei ollut vielä kuitenkaan nähnyt suurempaa implementointia, kuin vasta toisen maailmansodan aikana. Alumiinin käyttö räjähti, kun sitä tarvittiin nopeiden hävittäjien valmistukseen. Sodan loputtua alumiinin käyttö oli yleistä urheiluautojen valmistuksessa. (1; 2; 3; 4.)

Alumiinin lisäksi 1900-luvulla muidenkin kevyiden materiaalien käyttö on yleistynyt. Magnesiumia on käytetty lähes yhtä kauan kuin alumiinia, mutta materiaalina se ei ole yhtälailla yleistynyt. Syitä ovat varmasti alumiinin helpompi muokattavuus ja halvempi hinta. Titaani ja komposiitit ovat uudempia materiaaleja, ja ne ovat olleet aina enemmän käytössä vaativammissa kohteissa, kuten moderneissa hävittäjissä, raketeissa ja formuloissa. Autoissa näiden materiaalien käyttö on varsin uutta ja pitkälti rajoittunut käyttöön kalliissa urheiluautoissa.

Kevyiden materiaalien laajempaa käyttöä autotekniikassa on pitkään rajoittanut niiden hinta. Vasta nyt 2000-luvulla kevyiden materiaalien käyttö on todella alkanut yleistymään päästötavoitepainoiden takia. Tämä kevyiden materiaalien yleistyminen on tehnyt niistä kustannustehokkaampia ja siten entistä houkuttavampia vaihtoehtoja suunnitteluun.

Kevyet materiaali eivät tietenkään ole ainut tapa lähestyä painon rajoittamista auton suunnittelussa. Painoa voidaan myös vähentää esimerkiksi yksinkertaisemmilla rakenteilla, lujemmilla materiaaleilla, pienentämällä auton kokoa tai vaikka suunnittelemalla sähköjärjestelmä erilailla.



Porsche Taycanin sähköjärjestelmä toimii 800 voltin jännitteellä yleisemmin autotekniikassa käytettävän 400 voltin jännitteen sijaan. Esimerkiksi Tesla, Toyota ja Volkswagen käyttävät näitä matalavoltteisempia sähköjärjestelmiä sähköautoissaan. Porsche on saanut tällä 800 voltin järjestelmään siirtymisellä vähennettyä autossa olevien sähkökaapelien painoa. (5; 6; 7.)

Suunnittelussa ei tulisi kuitenkaan keskittyä pelkästään päästöjen vähentämiseen vaan huolehtia kokonaisuudesta, eli siitä, että kestävä kehitys ja etenkin ekologinen kestävyys toteutuu ja auton kokonaishiilijalanjälki olisi mahdollisimman pieni. Hiilijalanjälki on länsimaissa suurin, ja länsimailla on paras kyky vaikuttaa sen pienentämiseen. Auton materiaalivalinnat ja materiaalien optimaalinen käyttö vaikuttavat oleellisesti auton kokonaishiilijalanjälkeen ja kestävä kehityksen toteutumiseen. Autotekniikassa materiaalivalintoja ja liitosratkaisuja ohjaavat paljolti kustannustehokkuus. Ratkaisut ovat usein kompromisseja kustannustehokkuuden, ekologisuuden ja painon välillä.

Tämä työ on tiivis tietopaketti kevyistä materiaaleista. Työ pyrkii olemaan looginen ja luomaan hyvän kokonaiskuvan ja herättämään mielenkiinnon aiheeseen syventymiseen. Työssä tutkitaan kirjallisten lähteiden pohjalta autotekniikassa yleisesti käytettäviä sekä harvinaisempiakin kevyitä materiaaleja, esitellään niiden sovelluksia autoissa sekä pohditaan tulevaisuutta. Materiaaleja tarkastellaan ekologisuuden, kustannustehokkuuden, sarjavalmistettavuuden, korjattavuuden, liitettävyyden ja kierrätettävyyden näkökulmista. Tavoite on löytää optimaaliset auton eri käyttökohteisiin materiaaliratkaisut, jotka ovat tukevat auton kokonaishiilijalanjäljen pienentämistä ja kestävä kehitystä.

## 2 Auton rakenne

Keveys on pitkään vaikuttanut autojen suunnitteluun. Autoissa käytettävien erilaisten rakenteiden kehityksestä tämä huomataan helposti. Modernissa autossa eniten käytetty rakenne on unibody, jossa keveys yhdistyy rakenteelliseen jäykkyyteen. Autotekniikassa kevyitä rakennetyyppejä ovat unibody, monokokki, space frame ja tikasrakenne.

### 2.1 Unibody

Unibody on modernin henkilöauton yleisin rakenne. Unibodyssa auton runko ja kori ovat yhdistettynä yhdeksi kokonaisuudeksi, jossa koripaneelit luovat lopullisen rakenteen

jäykkyyden (kuva 1). Unibody-rakenteen hyötyjä ovat sen keveys, jäykkyys ja rakenteen tuomat materiaalikustannussäästöt. Rakenne on yleistymässä myös katumaastureiden ja maastureiden rakenteena. (8.)



Kuva 1. Jaguarin täysin alumiininen unibody-rakenne tuo tarvittavia painosäästöjä ja mahdollistaa ihanteellisen 50:50 painojakauman (9).

## 2.2 Monokokki

Monokokki on itsekantava kori, eli koko korirakenne ulkopintaa myöten toimii runkona. Yleensä monokokeista puhuttaessa tarkoitetaan hiilikuitukomposiitista valmistettua, kokonaan kuljettajaa ja matkustajia suojaavaa, itsekantavaa yhtenäistä koria (kuva 2). Monokokki voi myös koostua useammista yhteenliitetyistä osista, jotka luovat itsekantavan kokonaisuuden. Monokokkirakenne muodostuu yleensä metallisesta etuapurungosta, itse monokokista ja sen taakse kiinnittyvästä metallisesta takaapurungosta. Monokokkirakenne on hankala suunnitella ja korjata sekä kallis toteuttaa, ja se onkin käytössä usein kalliissa urheiluautoissa. (10; 11; 12.)



Kuva 2. McLarenin kehittynyt Monocage II -monokokkirakenne, joka valmistuu alle neljässä tunnissa (13).

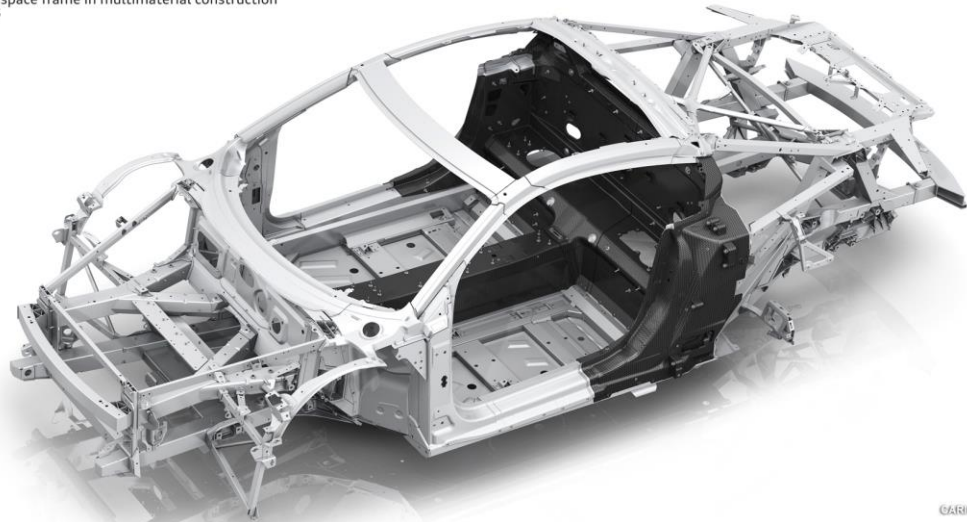
On olemassa myös ammerakenteisia monokokkeja. Näissä ammerakenne toimii itsekantavana korirakenteena. Tähän ammerakenteeseen liitetään tuulilasirakenne ja mahdolliset muut kattorakenteet, mutta ammerakennemonokokki on suunniteltu kantamaan ilman niitäkin. Ammerakennemonokokki on käytössä joissain urheiluautoissa, joista on saatavilla avoautomalli. Tämä rakenneratkaisu yhdenmukaistaa tuotantoa kiinteäkattoisten ja avoautomallien käyttäessä samaa monokokkia. Esimerkiksi Alfa Romeon 4 C:ssä ja McLarenin 650 S:ssä käyttämät rakenteet ovat ammerakennemonokokkeja, joihin on liitetty metalliset etu- ja taka-apurungot. (10; 12; 14.)

### 2.3 Space frame

Space frame -rakenne muodostuu karkeasti useammista yhteenliitetyistä metalliputkista, jotka muodostavat rungon. Space frame -runko saa jäykkyytensä runkoon kiinnitetyistä koripaneeleista. Audi käyttää space frame -rakennetta autoissaan, joissa itse ohjaamo on kuitenkin unibody-tyylinen (kuva 3).

## Audi R8 Coupé

Audi Space Frame in Multimaterialbauweise  
Audi space frame in multimaterial construction  
03/15



Kuva 3. Audi R8 Coupén space frame -rakenne. Rakenteen voi havaita koostuvan yhteenliitetyistä putkirakenteista edessä ja takana (15).

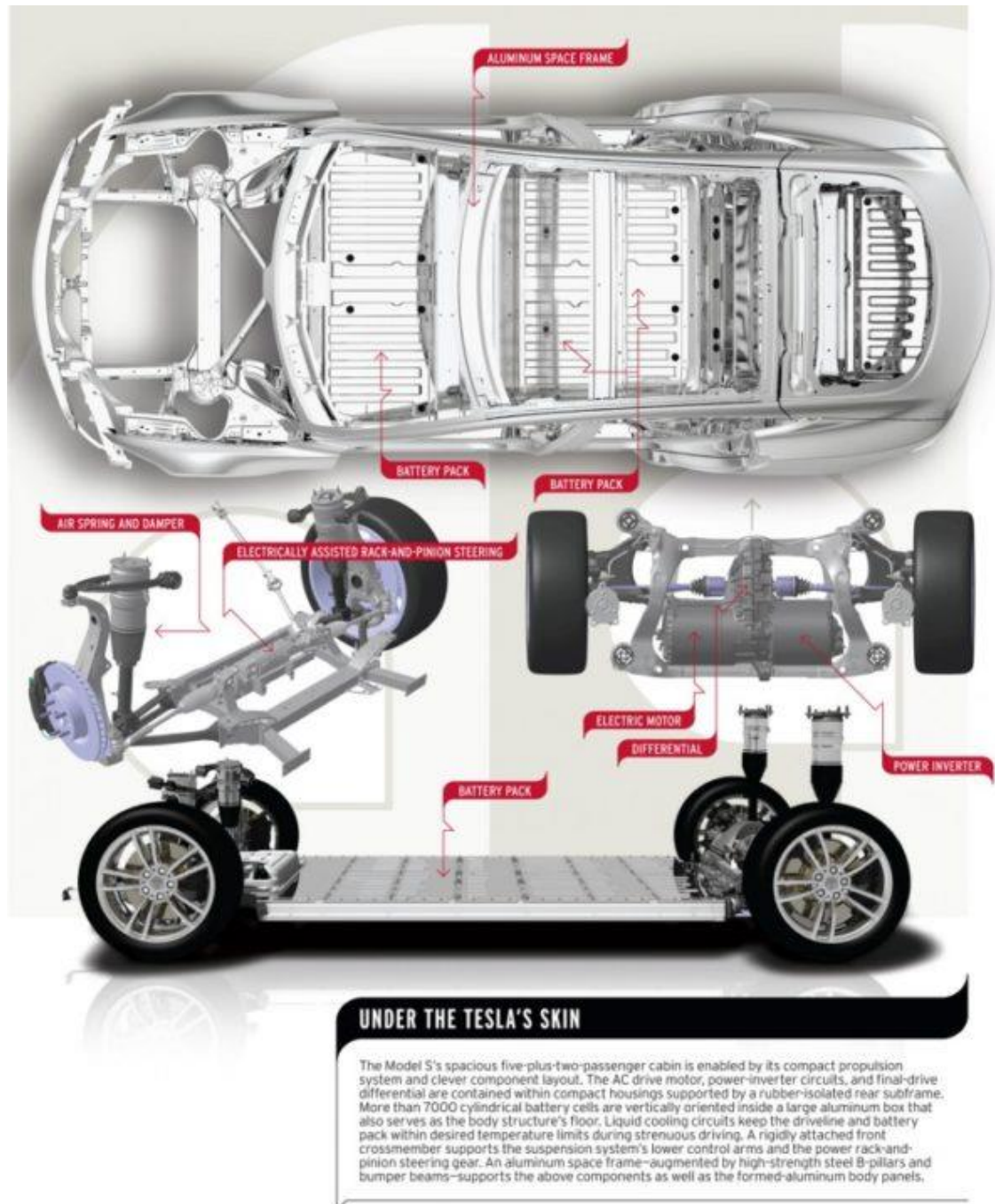
### 2.4 Tikas (Body-On-Frame)

Tikasrakenne muodostuu tikasmaisesta runkorakenteesta, jonka päälle kori lasketaan. Tämän rakenteen hyötyjä ovat rungon yksinkertaisuus, helpompi korjattavuus, erilaisten korimallien käyttö runkorakenteen päällä eli pienentää valmistuskuluja ja mahdollisesti pienempi NVH. NVH eli noise, vibration and harshness tarkoittaa ohjaamoon alustasta kantautuvaa ääntä, värinää ja ”kovuutta”. Tikasrakenne voi pienentää tätä, koska kori on mahdollista eristää paremmin itse runkorakenteesta. Tikasrakenteen huonoiksi puoleiksi yleensä lasketaan korkeampi painopiste, lisääntynyt paino ja heikompi rungon jäykkyys.

Rakenteen käyttö on ollut vähenemässä 2000-luvulla, mutta se on suosittu vielä katumaastureissa, maastureissa ja avolavoissa, minkä lisäksi joissain sähköautoissa tätä rakennetta on alettu hyödyntämään. Tikasrakenteen runkoon on helppo upottaa sähköauton akusto, joka tekee siitä helposti huollettavan. Nykyisillä materiaaleilla rungosta saadaan tehtyä melko kevyt, ja akusto täytyisi kuitenkin suojata. Esimerkiksi BMW i3:ssa ja Tesla Model S:ssä on käytössä tikasrakenne.

Teslan tikastyypisistä rakenteista käytetään skeittilauta-nimitystä. Tässä etu- ja taka-apurungot kiinnittyvät runkona toimivaan akustokuoreen. Kori lasketaan tämän

tikastyypisen runkorakenteen päälle (kuva 4). Rakenne mahdollistaa saman runkorakenteen käytön muissa korimalleissa. (8; 16; 17; 18.)



Kuva 4. Teslan tikasmallinen runkorakenne etu- ja taka-apurunkoiseen ja päällelaskettava alumiinikori (19).



### 3 Materiaalia lisäävä valmistus (AM)

Materiaalia lisäävä valmistus, englanniksi additive manufacturing (AM), tunnetaan myös 3D-tulostamisena. Tässä valmistustekniikassa 3D-tulostin tulostaa tietokoneella tehdyn 3D-mallin pohjalta täysimittaisen kolmiulotteisen kappaleen prototyyppitestausta varten tai valmistaa todelliseen käyttöön menevän kappaleen (kuva 5). Materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyt ovat keventynyt rakenne ja materiaalisäästöt ja niiden kautta pienentyneet valmistuskustannukset. Materiaalia lisääviä valmistustekniikoita on useampi. Tekniikoista tärkein on varmasti suorakerrostus, englanniksi direct energy deposition (DED). Se on metallia lisäävä valmistusmenetelmä. Suorakerrostuksessa tulostinpää tulostaa materiaalia suoraan kappaleeseen. (20; 21.)



Kuva 5. Materiaalia lisäävä valmistus, joka mahdollistaa erikoisten osarakenteiden valmistuksen jännityskohtien mukaan. Vasemmalla alkuperäinen kappale ja keskellä materiaalia lisäävällä valmistuksella tehty kevyempi ja materiaalia säästävämpi kappale (22).

Materiaalia lisäävä valmistus tulee varmasti vaikuttamaan autojen valmistamiseen lähitulevaisuudessa. Sen avulla on valmistettu jo isojakin kappaleita, kuten kokonaisia veneen runkoja. Materiaalia lisäävä valmistus on nyt vielä uusi tekniikka, ja sen käyttö ei ole vielä yleistä. Monet yritykset (mm. Siemens) ja harrastajat kehittävät tätä teknologiaa koko ajan eteenpäin. Materiaali lisäävän valmistuksen kehityksessä on nähtävissä samoja vaiheita, joita tietokoneen kehityksessä oli. Ensin tulivat toimialan uudet yritykset ja harrastajat, jotka kehittivät tietokoneita eteenpäin. Isommat yritykset alkoivat

kiinnostua teknologiasta ja implementointi yritys- ja kotikäyttöön alkoi. Materiaalia lisäävä valmistus on tekniikkana mielenkiintoinen ja omaa suurta potentiaalia. (23; 24; 25.)

## 4 Nimet

Erilaisille metalliseoksille on käytössä monta eri nimikejärjestelmää, yrityskohtaisia merkintöjä ja kaupallisia nimiä (kauppanimiä). Joillekin muoveille ja komposiiteille on myös omia kaupallisia nimiä. Nimikejärjestelmistä yksi perustuu esimerkiksi kemialliseen koostumukseen, kun taas toinen esittää materiaalit numerotunnuksin ja niin edelleen. Täten täysin erilaiselta näyttävät nimet voivat tarkoittaa samaa seosta. Esimerkkejä yhden laajemmin käytetyn teräksen muutamista nimistä ovat AISI 304, 1.4301, X5CrNi18-10, 304, T304 ja UNS S30400. Standardivertailuun on olemassa taulukoita, jotta eri standardeja voidaan verrata keskenään. (26, s. 18–20; 27; 28; 29; 30.)

## 5 Metallit

### 5.1.1 Mikrorakenne

Metallin jäähtyessä materiaaliin muodostuu metallikiteistä rakeita ja rakeiden väliin mahdollisesti muita kiteitä, sulkeumia ja erkaumia, jotka heikentävät materiaalia. Raekoolla, rakeiden muodolla ja rakeiden välissä mahdollisesti olevilla virheillä on suuresti vaikutusta metallin ominaisuuksiin. Mikrorakenne vaikuttaa lujuuteen, venyvyyteen, taottavuuteen, sitkeyteen, sähkönjohtavuuteen. Lämpökäsittely ja valmistustekniikka vaikuttavat muodostuvaan mikrorakenteeseen. (31; 32, s. 35.)

### 5.1.2 Standardit

Materiaaleja valmistetaan yleensä standardien mukaan. Materiaaliin liitetyt standardit ilmentävät materiaalin tietoja. Materiaalin standardit ja mekaaniset ominaisuudet selviävät materiaalin tietolomakkeesta, joka on englanniksi datasheet. Näitä materiaalien tietolomakkeella ilmoitettuja arvoja voidaan pitää työelämässä ja tutkimuksissa, kuten tässäkin, olleellisena tietona. (32, s. 7.)

Materiaalien ominaisuuksien pieniin tai suurempiinkin vaihteluihin voi olla monia syitä. Syitä voi olla esimerkiksi materiaaliin valmistuksessa ja/tai muokatessa tulleet sisäiset ja ulkoiset virheet, vääränlaisesta hitsauksesta aiheutunut heikkeneminen, huono

laadunvalvonta, materiaalin vääränlainen suuntaus käyttökohteessa, yhteensopimaton pinnoitus, vääränlainen säilytys ja täysin satunnaiset virheet.

### 5.1.3 Korroosiotyypit ja galvaaninen korroosio

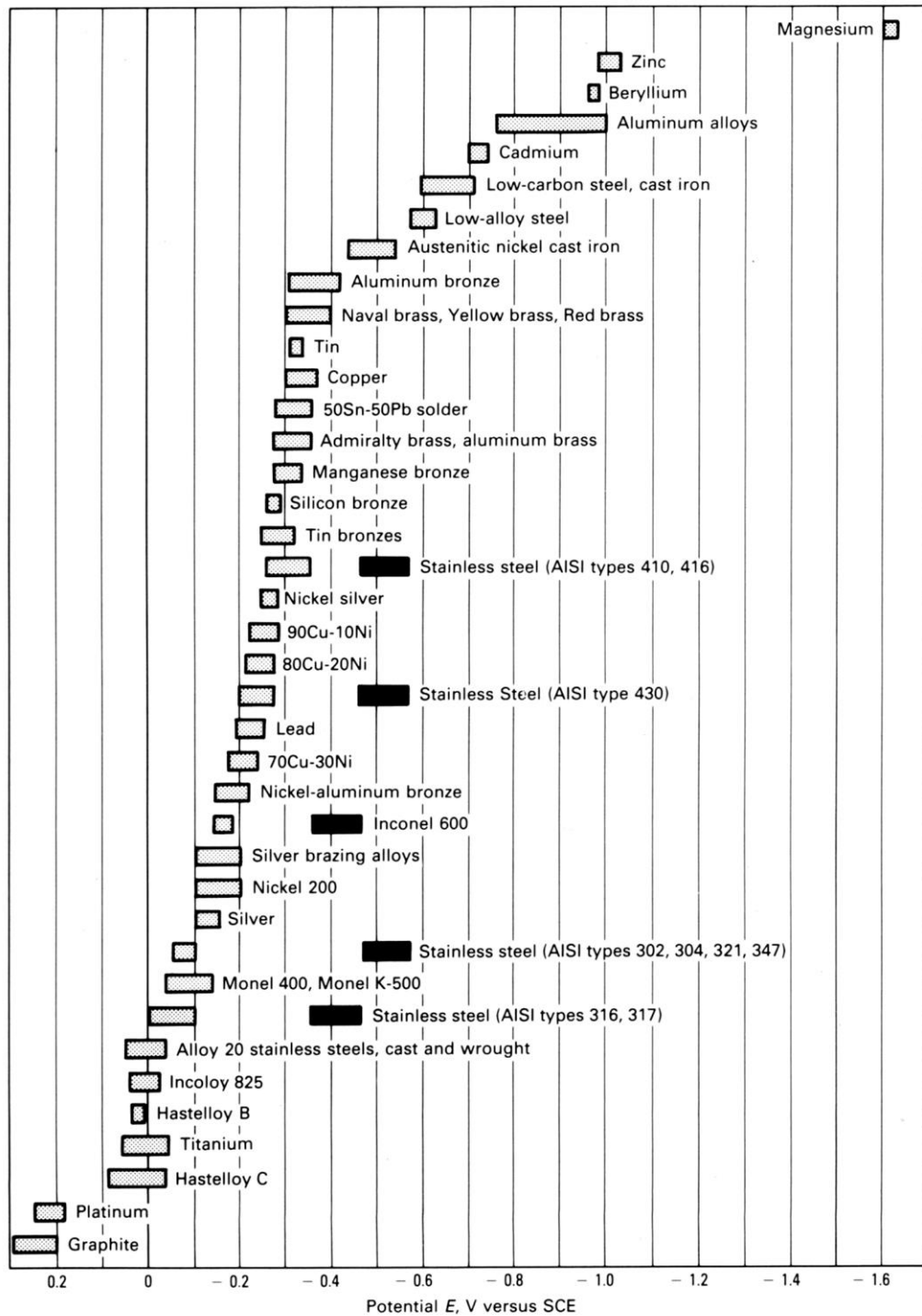
Korroosio on materiaalin syöymistä, ja sen aiheuttavat kemialliset tai sähkökemialliset reaktiot. Korroosioon vaikuttavat materiaali, lämpötila, kosteus, saasteet, hapot ja emäkset sekä tiesuola. Korroosiotyyppejä ovat yleinen korroosio, rakokorroosio, piilokorroosio, pistekorroosio, galvaaninen korroosio, jännityskorroosio, raerajakorroosio, hankauskorroosio, korkean lämpötilan aiheuttama korroosio, eroosiokorroosio. Autoissa nämä kaikki korroosiotyypit ovat mahdollisia. Korroosiota voidaan estää tai ainakin hidastaa pinnoittamalla, maalaamalla ja seostamalla. Joillain metalleilla on luonnollinen suojaus; esimerkiksi alumiinille, titaanille ja teräkselle muodostuu oksidikalvot. Oksidikalvot ovat kuitenkin herkkiä esimerkiksi lämmölle ja kolhuille.

Erilaisten materiaalien käytön kannalta galvaaninen korroosio on isoin ongelma autotekniikassa. Galvaaninen korroosio on korroosiota aiheuttava sähkökemiallinen reaktio kahden erityyppisen materiaalin välillä. Reaktion alkamiseksi tarvitaan sähköä johtavaa nestettä (esimerkiksi kosteutta), kahden tai useamman materiaalin kosketus toisiinsa sekä näiden materiaalien välillä täytyy olla tarpeeksi iso potentiaaliero. Reaktionopeuteen vaikuttavat myös suola, saasteet ja toisiinsa koskettavien kappaleiden kokoero. Galvaaninen korroosio on vaarallista, koska se heikentää materiaalien ominaisuuksia ja altistaa materiaalin väsymiselle. Pahimmassa tapauksessa materiaalin tai liitoksen rakenne pettää.

Materiaalit jaotellaan jaloihin ja epäjaloihin. Iso potentiaaliero tulee, kun liitetään esimerkiksi jaloa materiaalia todella epäjalon materiaalin kanssa yhteen. Epäjalompi materiaali syöpyy ja suojaa jalompaa korroosiolta. Esimerkiksi magnesium ei sovi liitettäväksi titaanin kanssa niiden suuren potentiaalieron vuoksi vaan magnesium epäjalompana syöpyisi. Mikäli liitos olisi kuitenkin tehty ja magnesiumia olisi pienempi määrä suhteessa titaaniin, korroosioreaktio olisi vielä nopeampi.

Eri materiaalien potentiaaleja selvennetään kuvassa 6. Käytännössä, mikäli potentiaaliero on 0,1 voltia, ei galvaanista korroosiota suurella todennäköisyydellä ilmene. (32, s. 31–32; 33; 34.)



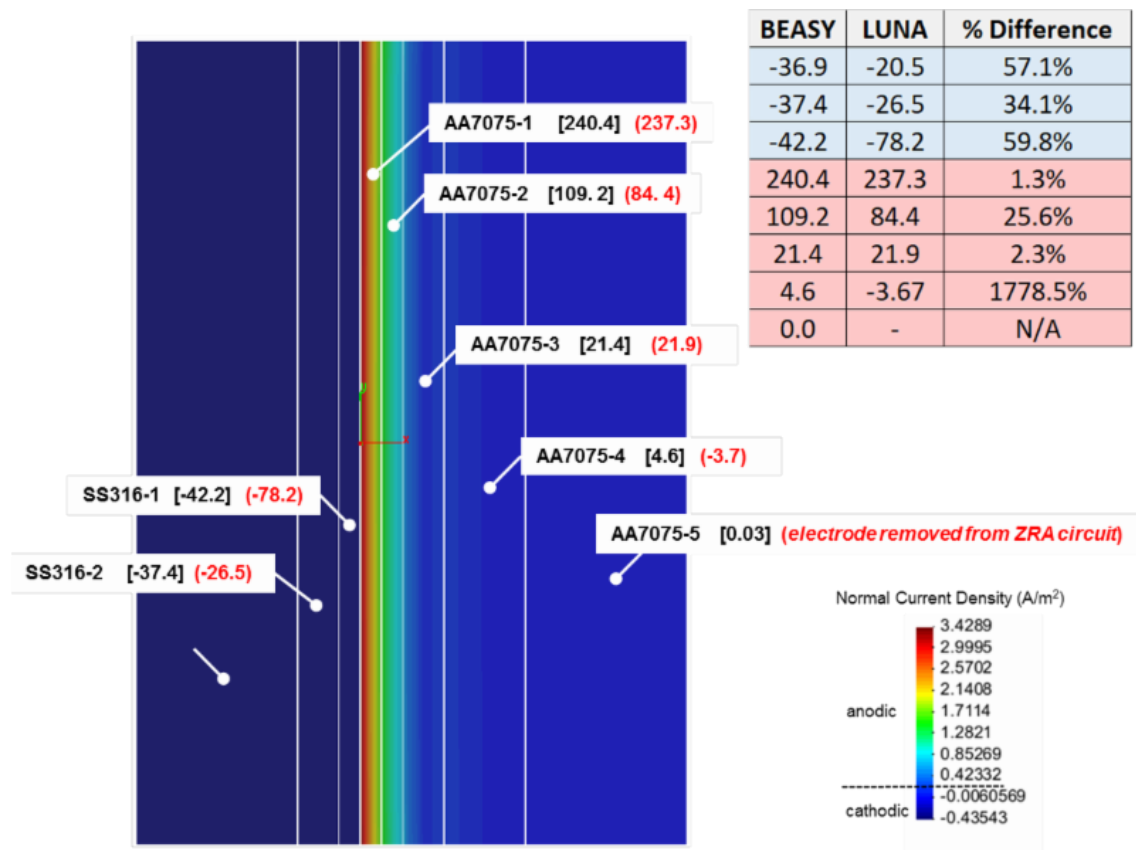


Kuva 6. Eri materiaalien potentiaalieroja. Vasemmassa reunassa ovat jaloimmat ja oikeassa reunassa epäjaloimmat. Kosketuksessa toisiinsa materiaaleista epäjalompi syöpyy reaktion vahvuuden riippuessa useammasta tekijästä (34).

Teräs-alumiinihybridiliitokset ovat tällä hetkellä suurin kehityskohde autotekniikassa, ja tekniikkaa käytetäänkin jo. Hybridiliitos mahdollistaa entistä kevyempien rakenteiden valmistamisen säilyttäen kuitenkin rakenteen turvallisuuden. Suurlujuusteräkset ovat

kalliita, joten materiaalin kohdistaminen rakenteissa on kustannustehokkuuden säilymiseksi välttämätöntä. Hybridiliitoksissa on kuitenkin myös ongelmansa.

Galvaaninen korrosio teräs-alumiinihybridiliitoksissa on vielä melko vähän tutkittu asia. Vuonna 2017 Yhdysvaltojen merivoimien merilento-ohjelmaan kuuluvien henkilöiden ja ilmavoimien kanssa toteutettiin koe, jossa 316-terästä liitettiin 7075-alumiiniin näiden muodostaen hybridiliitoksen. Tässä liitoksessa oli selvästi havaittavissa tapahtuvan galvaanista korroosiota (kuva 7). Toisessa tutkimuksessa oli myös havaittavissa liitossauman alueella pintamuutosta, mutta epäiltiin, johtuuko se vain materiaaleja liitettäessä tapahtuneista muutoksista liitosalueella. Sinkkipinnoituksen liitossaumassa havaittiin vähentävän reaktiota. (35; 36; 37; 38; 39; 40.)



Kuva 7. Teräs-alumiinihybridiliitos, josta on havaittavissa kuvassa puna-kelta-vihreällä merkittyä galvaanista korroosiota tummanpunaisen alueen ollessa vahvin reaktiokohta (36).

Shoki Takehisan ja Takashi Iizukan tutkimuksessa nimeltä "Galvanic corrosion related to steel/aluminum dissimilar joining tailored blank" tutkittiin autotekniikan kannalta tärkeää, SPCC/A1100-O -hybridiliitoksessa tapahtuvan galvaanisen korroosion vahvuutta kuivana, käytettäessä tislattua vettä (kuvastaa melko hyvin puhdasta

sadevettä) sekä käytettäessä suolavettä (kuvastaa saasteita ja tiesuolaa vedessä). Hybridiliitos tehtiin käyttäen muotoprofiiliosien liittämiseen parhaiten soveltuvaa ja autotekniikassa todennäköisimmin käytettävää laserhitsausta. Liitoksen lujuus heikkeni, kun liitos oli upotettuna tislattuun ja suolaveteen. Suolaveden vaikutus tehosti korroosiota. Teräksen lujuus heikkeni ja alumiini syöpyi vahvasti liitoskohdasta. (41, s.1.)

Myös muilla liitostekniikoilla, kuten pistehitsauksella sekä liimaamalla ja saumakehityksellä liittämässä, on ollut mitattavissa liitoksen heikkenemistä, ja havaittavissa selkeää korroosiota liitoksessa ja liitosalueella. Hitsausvirran oikea valinta on tärkeää ja vaikuttaa hitsin laatuun valtavasti. (42.)

#### 5.1.4 Louhinnan vaikutukset kestäväan kehitykseen

Kestävä kehitys on huomioitava auton koko elinkaaren aikana materiaalien louhimisesta kierrättämiseen. Louhinta voisi olla enemmän ekologista kestävyttä huomioivaa. Valtioneuvoston kanslian ylläpitämällä kestavakehitys.fi –sivustolla todetaan: “Kestävän kehityksen perusehtona on biologisen monimuotoisuuden ja ekosysteemien toimivuuden säilyttäminen sekä ihmisen taloudellisen ja aineellisen toiminnan sopeuttaminen pitkällä aikavälillä luonnon kestävykseen.” (43) Metallien louhinta nykyisillä tekniikoilla vaikuttaa negatiivisesti ekosysteemeihin. Vaarana ovat louhinnasta sivutuotteena syntyvät myrkylliset metalliyhdisteet ja raskasmetallit, jotka ovat erittäin haitallisia meri- ja maaeliöille. Myös tapa, miten esimerkiksi avolouhokset kaivostoiminnan päätyttyä jätetään avoimiksi, eikä täytetä, ei nopeuta paikallisen ekosysteemin ja maiseman uusiutumista. (44; 45.)

## 5.2 Alumiini

Alumiini, kemialliselta merkiltään Al, on maankuoren yleisin metalli. Sitä on noin 8,1 prosenttia maankuoresta. Alumiinia esiintyy luonnossa vain yhdisteinä. Tästä syystä alumiinin rikastaminen vie paljon energiaa. Alumiinin tiheys on 2,7 kg/dm<sup>3</sup>.

Alumiinin on sen ominaisuuksien takia suosittu metalli. Sillä on hyvä lujuus-painosuhte, sitä on helppo muokata, se on helposti kierrätettävää, se ei syty eikä ole myrkyllistä. Alumiinin energiansitomiskyky on todella hyvä sen kimmomoduulin ollessa pieni, vain noin kolmasosa teräksen arvosta. Tästä syystä se sopii hyvin esimerkiksi törmäysvyöhykkeiden materiaaliksi. Alumiinilla on hyvä korroosionkesto sen pintaa

suojaavan oksidikalvon takia. Alumiinista saadaan seostamalla vahvempaa, mutta huomioitavaa on, että seoksen lisätty jäykkyys heikentää alumiinin venyvyyttä. Sitä voidaan esimerkiksi valaa, valssata, pursottaa, porata, sorvata, hitsata ja leikata. Alumiinin hitsattavuus on pääsääntöisesti hyvä lukuunottamatta suurlujuusseoksia.

Alumiinin kierrättäminen on helppoa, eivätkä sen ominaisuudet muutu kierrätettäessä. Primaarialumiiniksi sanotaan ensimmäistä kertaa kaivoksesta kiertoon valmistettua alumiinia. Sekundaarialumiinia on kaikki kierrossa oleva alumiini. Sekundaarialumiinin kierrätys vie vain 5 prosenttia primäärialumiinin vaatimasta energiasta. Kierrätysalumiinissa on epäpuhtauksia enemmän kuin primäärialumiinissa. (44; 46; 47; 48.)

Alumiinin käyttö on lisääntynyt koko ajan. Alumiinia käytetään todella laajasti nykyään etenkin auton korissa ja apurungoissa, mutta myös vanteissa, moottorissa ja muissa osissa. Alumiinin käyttö on lisääntynyt myös ilmastoinnin ja jäähdyttimien osissa parantuneiden liitostekniikoiden vuoksi. Sitä käytetään myös paljon sähköautojen akustojen koteloissa teräksen ja hiilikuitukomposiittien lisäksi. Alumiinin käyttö on runsainta avolavoissa, katumaastureissa sekä kalliimman hintaluokan autoissa.

Autoissa käytettävien materiaalien välinen kilpailu on lisännyt alumiinin toimittajien ja autotehtaiden välistä yhteistyötä luoden parempia alumiiniseoksia ja valmistusprosesseja. (39; 49.)

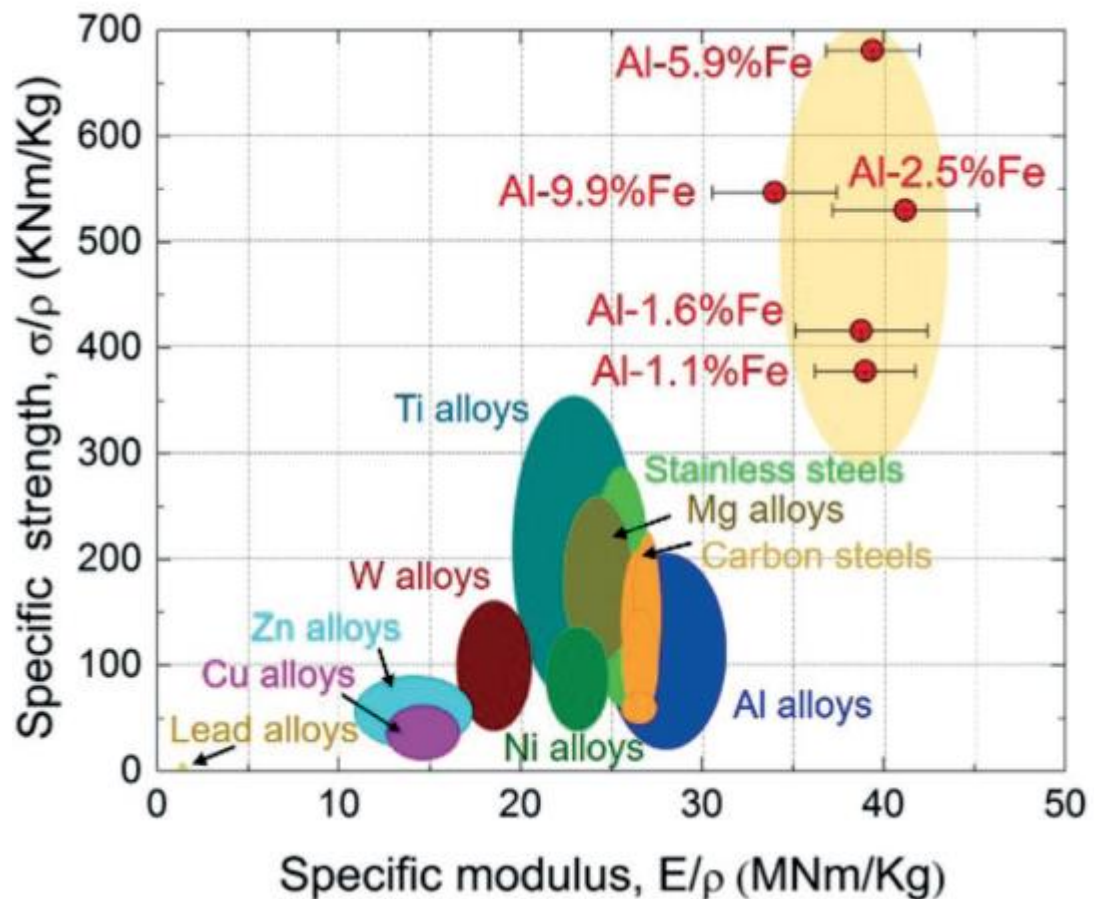
Autotekniikassa paljon käytettävillä uusilla 5000- ja 6000-sarjan alumiineilla on parempi lujuus, muokattavuus sekä korroosionkesto. 5000-sarjan pääseosaineena toimii magnesium, joka lisää veto- ja murtolujuutta. Sarja yhdistää hyvän lujuuden ja muokattavuuden, hitsattavuuden sekä todella hyvän korroosionkeston. Jaguar Land Rover käyttää RC5754-seosta. 50 prosenttia siitä on kierrätysalumiinia, jossa on suuremmat osuudet rautaa, kuparia ja silikonia.

6000-sarjan alumiiniseoksista valmistetaan eniten pursotettuja tuotteita. Sarjalla on hyvä lujuus, muokattavuus ja hitsattavuus. 6000-sarjan alumiiniseoksia käytetään lujuutta vaativissa kohteissa, kuten puskureissa, puskurirakenteissa, törmäysvyöhykkeissä ja kylkihelmoissa. 6000-sarjan alumiini on ohuempaa parempien lujuusominauksiensa takia.

7000-sarjan pääseosaine on sinkki, joka yhdistettynä kuparin ja magnesiumin kanssa tekee sarjan suurlujuuden. 7000-sarjalla on huono pursotettavuus ja hitsattavuus. Esimerkiksi 7075-T6-seosta on käytössä 2014-vuoden Corvette Stingrayn törmäysvyöhykkeessä, joka sitoo törmäyksessä törmäysenergiaa.

Alumiinin negatiivinen puoli on, että sitä täytyy käyttää samaan sovellukseen 1,5 kertaa enemmän verrattuna teräkseen alumiinin tiheyden vuoksi. Tämä 1,5:1-suhde kuitenkin riippuu jonkun verran sovelluksesta. Se aiheuttaa suunnittelun kannalta tilarajoitteita ja on negatiivinen puoli alumiinilla. (48, s. 68–71; 49; 50; 51.)

Kehitteillä on 9R-faasin ”nanopunottu” teräs-alumiini, joka olisi entistä lujempi, jäykempi ja venyvämpi. 9R-faasin teräs-alumiiniseoksesta puuttuu kokonaan yksi atomitaso, joten metallisidoksista tulee entistä vahvempia, ja metalliatomit menevät 9R-faasissa limittäin johtaen materiaalin huomattavasti parempiin ominaisuuksiin (kuva 8). Voima, jota vaaditaan tämän materiaalin plastisen muodonmuutoksen jatkamiseen, on yhtä suuri kuin suurlujuusteräksillä. Materiaalin pintaan voidaan tällä hetkellä valmistaa kymmeniä nanometrejä ohuena kalvona laser-induced projectile impact testing -tekniikalla (LIPIT), mutta valmistus on vaikeaa. Valmistetut pinnoitukset ovat todella kovia, kovuudeltaan noin 5,5 Gpa. (52; 53.)



Kuva 8. 9R-faasin "nanopunottujen" teräs-alumiiniseosten lujuus-painosuhte verrattuna jäykkyyso-painosuhteeseen, joka on selvästi korkeampi verrattuna muihin metalliseoksiin (53).

### 5.3 Teräs

Terästä ei yleensä mielletä kevyeksi materiaaliksi eikä se kuuluukaan kevytmetalleihin. Teräs on raudan, kemialliselta merkiltään Fe, ja hiilen, kemialliselta merkiltään C, sekoitus. Maankuoressa on metalleista toiseksi eniten rautaa, noin 5 %. Teräksen hiilipitoisuus on alle 1,7 %, jotta se luokitellaan vielä teräkseksi. Tähän työhön se on otettu mukaan viimeisimpien innovaatioiden ja tämän materiaalin positiivisen kehityksen takia uusimpien ja tulevaisuuden autojen kevyiden konstruktioiden luonnissa. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa teräksellä on potentiaalia sen lujuuden ja venyvyyden vuoksi. Käyttämällä terästä materiaalia lisäävän valmistuksen materiaalina voitaisiin saada valmistettua kevyitä, lujia ja venyviä kappaleita kohtuullisella hinnalla.

Myös teräksen valmistustekniikka on kehittynyt. On kehitetty uusi hybridiliitostekniikka, jolla saadaan yhdistettyä terästä ja alumiinia. Tekniikka mahdollistaa entistä

optimoidumman rakenteen valmistuksen. (32, s. 4; 33; 44.) Liitoksen ongelmia tutkitaan työn luvussa 5.1.4 Korroosiotyypit ja galvaaninen korroosio.

Terästä on helppo kierrättää. Teräs voidaan erotella magneettisesti sen ferromagneettisuuden avulla. Samoin kuin alumiinia sitä voidaan kierrättää loputtomasti sen menettämättä ominaisuuksiaan. Teräksen raaka-aineesta noin puolet on kierrätetty jo vähintään kerran. Teräksen valmistukseen kuluu energiaa noin kolmannes alumiinin vastaavasta, joten se on kestävä kehitystä hyvin tukeva materiaalivaihtoehto. (44; 54.)

Kiinnostavia uusia suurlujuusterässeoksia on kehitteillä. Suurlujuusteräksien heikkous on vain niiden korjattavuus. Valurauta olisi myös mielenkiintoinen vaihtoehto sen ominaisuuksien ja kilpailukykyisen hinnan vuoksi joihinkin nykyisiin alumiinin, teräksen ja muovin sovelluksiin.

Isotermisesti karkaistut lujat valuraudat, austempered ductile iron (ADI), ovat lujia, kovia ja venyviä valurautoja. Valuraudat sisältävät paljon hiiltä ja ovat korkean grafiittipitoisuuden vuoksi hyviä vaimentamaan ääntä. Ne sopivat hiljaisuutta vaativiin sovelluksiin. Valurauta on 9 prosenttia harvempaa kuin teräs. Näitä valurautoja on helppoa valaa, ja ne ovat valmistuskustannuksiltaan teräksien ja alumiiniseosten luokkaa. Niistä voidaan suunnitella ominaisuuksiensa takia erittäin kevyitä ja ohuita osia ja rakenteita. Ne soveltuvat erityisesti rasituksen alla oleviin osiin, kuten moniin alustan ja moottorin osiin sekä rattaisiin esimerkiksi vaihteistoissa, koska materiaalin pintakerros kovenee aina uudestaan kuluessaan rasituksen alla. (55; 56.)

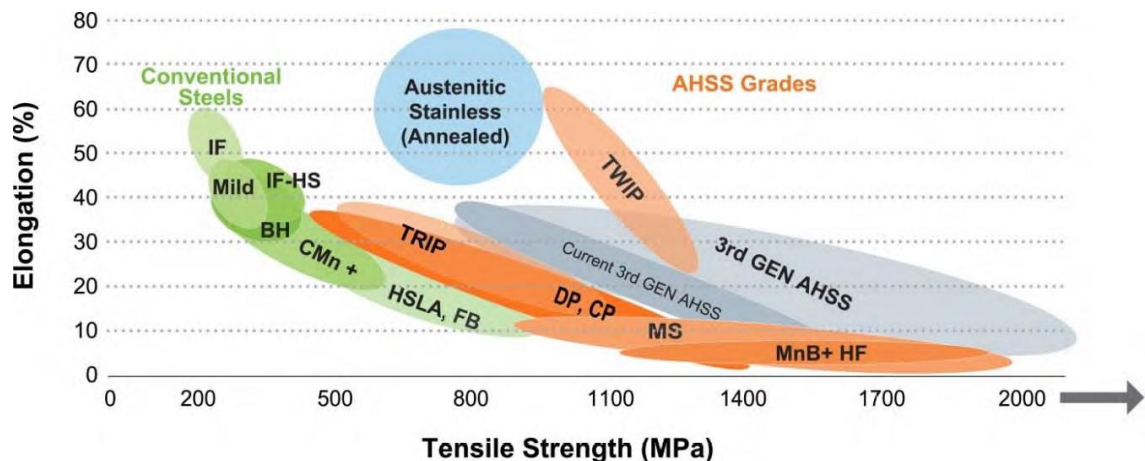
Kolmannen sukupolven AHSS-teräksiä, jotka tunnetaan myös NanoSteel-nimellä, kehitetään vielä. Näitä teräksiä on jo tarjolla eri valmistajille kehitettäväksi ja koekäyttöön. Valmistajista esimerkiksi SSAB kehittää kolmannen sukupolven teräksiä aktiivisesti eri valmistajien kanssa.

Näillä teräksillä mikrorakenteen raekoko on pienempi ja mitataan nanometreissä. Lujuus tulee paljolti pienentyneestä raakoosta. Joillain seoksilla on yli 2000 Mpa:n lujuus ja jopa 40 prosentin venyvyys (kuva 9). Kolmannen sukupolven teräkset ovat kalliita, mutta voivat kilpailla painonsäästöllä ja muokattavuudella verrattuna vanhempiin AHSS-terässeoksiin.

Kolmannen sukupolven teräksiä tulee varmasti olemaan käytössä halvimmista kalliimpiin autoihin. Suurempi suosio voi kuitenkin olla halvempien autojen segmentissä kalliimpien



autojen suunnittelijoiden siirtyessä käyttämään yhä enemmän alumiinia, magnesiumia ja hiilikuitukomposiitteja. Kolmannen sukupolven terästen käyttöä on tässä vaiheessa kuitenkin vielä vaikeaa ennustaa. Kolmannen sukupolven teräksistä voidaan valmistaa esimerkiksi kevyitä akkukoteloita, sivutörmäyssuojia, puskureita, pilareita ja istuimia. Esimerkiksi Volvon XC90 -katumaasturin rungossa käytetään todella paljon suurlujuusteräksiä, joten automerkin siirtyminen kolmannen sukupolven terästen käyttöön ei olisi suuri yllätys. (54; 57.)



Kuva 9. Eri teräslaatujen venyvyys suhteessa lujuuteen. Kuvasta voidaan huomata kolmannen sukupolven teräksien tämänhetkinen ylivoimaisuus (58, s. 3).

Tutkijat ovat Etelä-Koreassa kehittäneet todella kiinnostavan kevyen teräksen, jossa yhdistetään alumiini teräkseen. Korkea alumiinipitoisuus teräksessä tuottaa usein venyvyydeltään heikkoa terästä, joka johtuu teräkseen syntyvistä heikoista intermetallisista vyöhykkeistä. B2 tarkoittaa nanometrin mittakaavassa olevia B2-kiderakenteita, joissa alumiiniatomeja kiteytyy teräksen kiderakenteen sisään. B2-kiderakenne on kova, mutta hauras eli B2:n esiintyminen seoksessa on harmillisia teräksen ominaisuuksille. B2:ta voidaan kuitenkin hyödyntää korkean alumiinipitoisuuden teräksissä vahvistaen terästä ja poistamalla intermetallisten vyöhykkeiden tuoman haurauden hallitsemalla B2:n kiderakennetta ja hajontaa mikrorakenteessa. Korkean alumiinipitoisuuden teräksestä saadaan tällä tekniikalla kevyttä, mutta silti lujaa. Teräksestä saadaan lujuus-painosuhteeltaan titaania vastaavaa vain kymmenesosalla titaanin hinnasta. Tämä tekniikka on kuitenkin vielä kehitteillä. (59, s. 1-2, 4-5, 13; 60.)



## 5.4 Titaani

Titaani, kemialliselta merkiltään Ti, on 45 prosenttia kevyempää kuin teräs, mutta melkein yhtä lujaa. Titaanin tiheys on 4,5 kg/dm<sup>3</sup>. Se on kevyttä, lujaa, säilyttää ominaisuutensa korkeammissakin lämpötiloissa, erittäin hyvä väsymisenkesto ja vastustaa korroosiota erittäin hyvin sen oksidikerroksen vuoksi. Titaanin oksidikerros alkaa tuhoutumaan, mikäli titaaniseoksen lämmönkestoaraja ylitetään. Sen jälkeen titaani on altis korroosiolle. Titaanit jaetaan laatuihin, joista yleisimmät ovat grade 2 ja kovempi ja lujempi grade 5. Koneistettaessa täytyy muistaa hidas lastuamisnopeus. Grade 2:ta on helpompi työstää kuin grade 5. Titaanin käyttö pysyy hyvin todennäköisesti rajoitettuna autotekniikan sovelluksissa tulevaisuudessakin muiden metallien ottaessa sitä kiinni ominaisuuksissa.

Titaanista valmistetaan moottorin venttiilikoneiston osia, kuten venttiileitä ja venttiilijousia. Siitä valmistetaan lisäksi pakoputkistoja, vanteita ja alustan jousia. Titaani on kallista, joten siksi sen käyttö on hyvin rajoittunutta normaaleissa henkilöautoissa. Sovellukset rajoittuvat yleensä enimmäkseen ”pakollisiin” lujuutta, keveyttä ja hyvää lämmönsietoa vaativiin kohteisiin. Titaania on enemmän käytössä juuri moottoriuheilussa ja urheiluautoissa.

Titaania yritetään nyt kuitenkin hyödyntää kylmämuovatuissa alustan jousissa, jotka on valmistettu halvemmasta titaanilaadusta. Titaani on ihanteellinen materiaali jousiin sen ominaisuuksien takia. Käyttämällä titaanijousia säästetään tilaa jousen yläpäästä 50–70 prosenttia, ja paino vähentyy 60–70 prosenttia teräsjoussiin verrattuna. Pakoputkistoja aiotaan valmistaa kaupallisesti puhtaasta titaanista, joka on seostamatonta titaania. Grade 2 -laatua ei suositella käytettäväksi tehokkaiden autojen pakoputkistoissa moottorilta tulevien tulikuumien pakokaasujen takia. Normaalin henkilöauton pakoputken materiaaliksi Grade 2 -laatu sopii, kunhan pakokaasujen lämpötila ei nouse yli 450 celsiusasteen. Seostamattomalla kaupallisesti puhtaalla titaanilla on erinomainen korroosionkesto ja korkeampi lämmönsieto, mutta korkeat lämpötilat pakoputkistoissa tuhoavat oksidikerrosta silti vähitellen syövyttäen titaania. Titaania käytetään myös todella kalliin Carbotaniumin, hiilikuitu-titaanikomposiitin, valmistamiseen, jota autonvalmistaja Pagani käyttää. (61; 62; 63; 64, s. 24.) Carbotanium käydään läpi tämän työn osiossa 7.7.2.

## 5.5 Magnesium

Magnesium, kemialliselta merkiltään Mg, on metalleista kevyin. Maankuoressa sitä on noin 2 prosenttia. Magnesiumin tiheys on vain 1,8 kg/dm<sup>3</sup>. Se painaa 36 prosenttia vähemmän kuin alumiini ja 78 prosenttia vähemmän kuin teräs. Sitä valmistetaan pääasiassa merivedestä. Se on materiaalina tunnettu jo pitkään, mutta se ei ole yleistynyt.

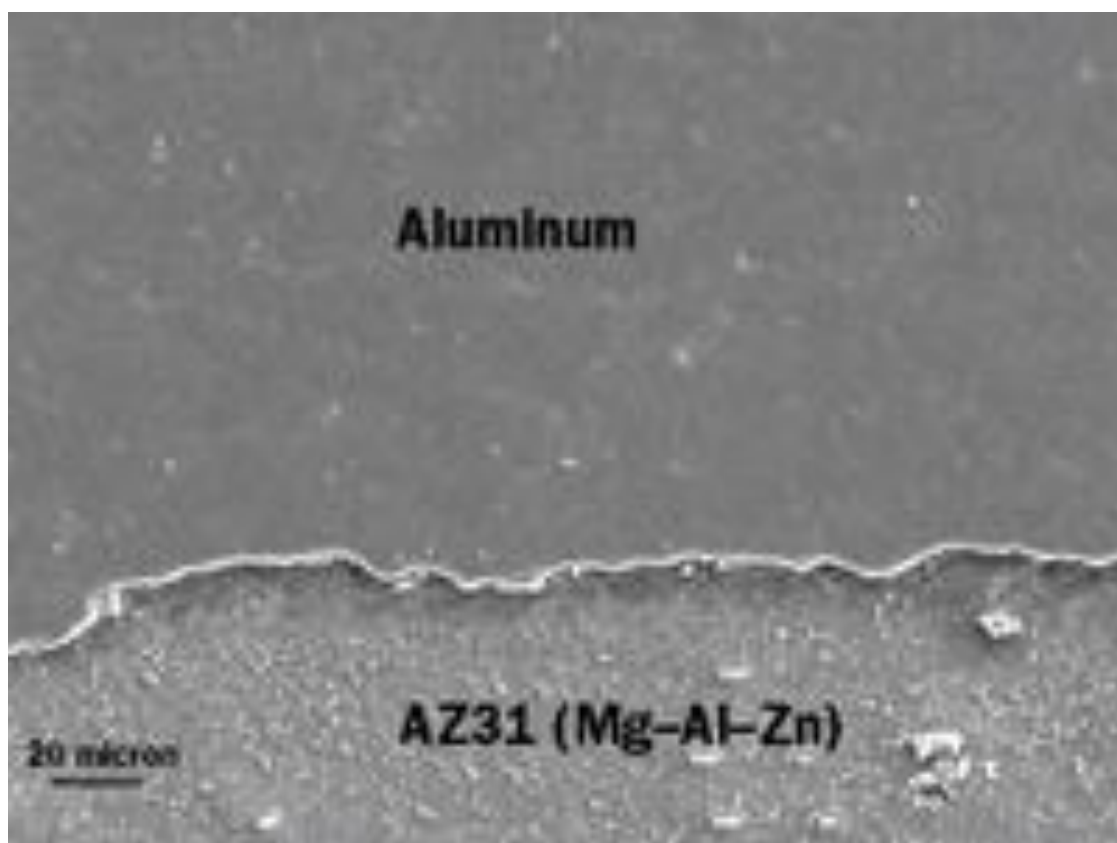
Haluttuja ominaisuuksia ovat sen korkeampi lujuus-painosuhte verrattuna alumiiniin ja teräkseen, venyvyys, iskunkestävyys ja kyky vaimentaa tienpinnasta aiheutuvaa tärinää, ääntä ja ”kovuutta” (NVH). Sen ominaisuuksia voidaan parantaa seostamalla. Magnesiumin negatiivisia puolia ovat hinta, väsymislujuus, huono muokattavuus, syttymisherkkyys ja se on altis korroosiolle. Magnesiumin valmistamisesta muodostuu CO<sub>2</sub>-päästöjä suhteessa enemmän muihin kevyisiin materiaaliratkaisuihin.

Monet valmistajat ovat korvanneet terästä ja alumiinia magnesiumilla. Esimerkiksi teräksestä valmistettuja osakokonaisuuksia on voitu korvata yhdellä magnesiumista valetulla osalla pienentäen valmistuskustannuksia ja muodostaen jäykemmän rakenteen. Autotekniikassa sitä käytetään eniten valettuna esimerkiksi vaihteiston kuorissa, etu- ja takavaimentimien joustintuissa (englanniksi shock tower), moottorin lohossa, öljypohjassa, kattorakenteissa, ratissa, polttoaineluukussa, istuinten, kojelaudan ja ovien rungoissa ja apurungossa.

Magnesium on helposti koneistettava materiaali, mutta se syttyy helposti. Tämän takia koneistettaessa sekä hitsattaessa on oltava tarkkana. Magnesiumin valaminen on halvempaa verrattuna alumiiniin. Sulattaminen on noin 30 prosenttia halvempaa sekä itse valaminen riippuen tekniikasta on 25–500 prosenttia halvempaa. Materiaalina se on kuitenkin kalliimpaa kuin alumiini ja se on herkempää korroosiolle.

Galvaaninen korroosio on voimakasta magnesiumilla, jos se on kosketuksissa muiden metallien kanssa. Alumiini on pääasiassa poikkeus, mutta myös jotkut alumiiniseokset reagoivat magnesiumin kanssa voimakkaasti. Magnesiumia käytettäessä sen pinta täytysikin käsitellä huonon korroosiokeston vuoksi ainakin liitântäalueilta. Magnesiumin pintaa on vaikea suojata tehokkaasti korroosiota vastaan. Maalaamalla pintaa voidaan suojata, mutta maalattu pinta on altis korroosiolle, mikäli maalipinta vaurioituu.

Kylmäruiskutus (englanniksi cold spray) on tekniikka, jossa magnesiumin pintaan ruiskutetaan kovalla paineella alumiinihiukkasia. Iskeytyessään magnesiumin pintaan alumiinihiukkaset kuumenevat ja muodostavat mekaanisen kontaktin sekä metallisidoksen magnesiumin kanssa. Tällä tekniikalla magnesiumin pintaan saadaan tiheä ja paksu, tehokkaasti suojaava suojakerros (kuva 10). (64, s. 24; 65; 66; 67; 68; 69; 70; 71.)



Kuva 10. Tiheä kylmäruiskutettu alumiinisuoja-pinta, jonka näkee selkeästi AZ31-magnesiumseoksen pinnalla (67).

Magnesiumin kierrättäminen vie vain 5 prosenttia energiaa siitä, mitä primäärimagnesiumin valmistaminen vie, ja sen ominaisuudet säilyvät kierrätyksessä. Kierrätysjäte on joko magnesiumipaloja tai koneistuksesta jäänyttä silppua. Koneistusjäte on vaikeampaa kierrättää, ja se täytyy puhdistaa koneistusrasvoista. Pienempi silppu oksidoiduu kierrätysprosessissa herkemmin kuin isommat palat, joten materiaalia menetetään myös enemmän kierrätettäessä koneistussilppua. (72; 73.)

Magnesium on tällä hetkellä autotekniikassa suhteessa vähän käytetty kevytmetalli. Suurimmat negatiiviset käyttöä rajoittavat tekijät ovat varmasti sen hinta ja alttius

korroosiolle. Mikäli hintaa saataisiin alas ja keksittäisiin halpoja tapoja pinnoittaa magnesiumia, niin käyttöä olisi varmasti enemmän. Magnesium on todella mielenkiintoinen materiaali omaten monia sovelluskohteita autotekniikassa.

## 5.6 Superseokset

Superseokset ovat korkeita lämpötiloja kestäviä vaativien olosuhteiden metalliseoksia. Näiden koostumus vaihtelee käyttötärpeen mukaan. Autotekniikassa superseoksista käytössä on enimmäkseen nikkeli-kromiseosmetalleja. Nikkeli-kromisuperseokset tunnetaan kauppanimellä Inconel. Inconelin lujuus-painosuhte on todella korkea. Se on lähes yhtä kevyttä kuin titaani. Inconel sisältää yleensä yli 50 prosenttia nikkeliä. Se on melko muokattavaa ja hitsattavaa sekä se kestää erittäin hyvin korroosiota ja korkeita lämpötiloja paremmin kuin teräs menettämättä ominaisuuksiaan. Inconel-seosten pintaan muodostuu paksu oksidikerros niiden lämmitessä, joka suojaa metallia kulumiselta. Se on helposti kierrätettävää, mutta todella kallista käyttää. Inconelistä on saatavilla eri laatuja. Incoloy on Inconelistä ominaisuuksiltaan heikompi, mutta halvempi seossarja.

Inconelia käytetään esimerkiksi urheiluautojen pakoputkistoissa todella hyvän lämmönsiedon, keveyden ja lujuuden takia. Siitä voidaan valmistaa titaania kevyempiä osia, vaikka se on materiaalina hieman painavampaa, koska siitä voidaan tehdä ohuempia osia. Brittiläinen tehopakoputkistojen valmistaja GoodFabs on käyttänyt moottoriurheilussa pakoputkistoja, jotka ovat olleet 0,35 mm seinäpaksuudeltaan. Inconelistä ja Incoloysta voidaan myös valmistaa moottorin osia, kuten pakoventtiilejä, sytytysjärjestelmiä, sensoreita, turvalaitteita ja sähkökytkimiä. Tavallisimpia autotekniikassa käytettäviä Inconel-seoksia ovat grade 625 -yleislaatu, vaativampiin sovelluksiin grade 716 ja X-750 -seosta käytetään esimerkiksi venttiilijousissa. Katalysaattoreissa käytetään 601- ja X-750 -seoksia. Inconel 625 -seosta on saatavilla myös materiaalia lisäävään valmistukseen paljon halvemmalla hinnalla, mitä perinteisillä menetelmillä tehtynä materiaalilla valmistaminen maksaisi. (61; 74; 75; 76; 77; 78; 79.)

## 5.7 Korkean entropian metallit HEA/Multikomponenttimetallit MCA/MPEA

Korkean entropian metallit, englanniksi high entropy alloys (HEA), ovat kolmen tai useamman metallin seoksia, joissa kaikkia seoksen metalleja on suunnilleen saman verran seoksessa. Korkean entropian metalleissa ei ole ikinä 30 prosenttia enempää

mitään tiettyä metallia. HEA:t koostuvat yleensä metalleista, kuten alumiini, titaani, kromi, pii, niobium, zirkonium jne.

Perinteisiin metalliseoksiin verrattuna korkean entropian metalleilla on hyvä mikrorakenne, korkea lujuus, venyvyys, heikompi väsyminen, erinomainen kovuus ja kulutuskestävyys vaihtelevissa lämpötiloissa ja kyky vastustaa korroosiota ja hapettumista. Korkean entropian metallien mikrorakenne koostuu monipuolisesti erikokoisista rakeista ja kiteistä, eli haje on suuri. Suuri haje mahdollistaa monen metallin käytön tekemättä siitä kuitenkaan heikkoa tai haurasta rakenteeltaan ja vaikuttaa paljon metalliseoksen lopullisiin ominaisuuksiin. Nämä metallit ovat erittäin mielenkiintoisia niiden kylmissä ja kuumissa ympäristöissä säilyvien monipuolisten ominaisuuksien takia.

Korkean entropian metallit voi sekoittaa täysin tilaaja-asiakkaan toiveiden mukaan. Näitä metalleja alettaessa sekoittamaan seoksen koostumus määritetään tietokoneohjelmalla, joka ennustaa erilaisten seosten lopullisen mikrorakenteen valmistaakseen laadukkaimman seoksen kyseisiin metallilta haettuihin ominaisuuksiin.

Korkean entropian metalleille on erilaisia valmistustekniikoita. Valmistustekniikka vaikuttaa huomattavasti korkean entropian metallien ominaisuuksiin, kuten esimerkiksi juuri lujuuteen ja venyvyyteen. Materiaalia lisäävä valmistus on paras valmistustekniikka korkean entropian metalleille sen optimoidessa niiden mikrorakennetta ja mekaanisia ominaisuuksia. Tulostettuna näillä metalleilla on paras venyvyys ja lujuus, mikä johtuu tulostuksessa syntyvästä hienosta mikrorakenteesta. Jälkikäsitteily, kuten high isostatic pressing (HIP), voi parantaa materiaalin ominaisuuksia vähentäen valmistusvirheitä materiaalissa ja jäännösjännitystä. Valmistustekniikka vaikuttaa huomattavasti korkean entropian metallien ominaisuuksiin esimerkiksi lujuuteen ja venyvyyteen.

Pinnoitukset ovat korkean entropian metallien todennäköisin sovelluskohde. Tähän tarkoitukseen korkean entropian metallien ominaisuudet ovat kuin tehtyjä. HEA-pinnoituksella voidaan saada pohjamateriaalille parempi korroosionkesto, kova pinta ja erinomainen kulutuskestävyys sekä pinnoitus toimii myös säteilysuojana ja voidaan käyttää myös diffuusiosuojaukseen. Pinnoituksilla on hyvä mekaaninen sitoutuminen pohjametalliin, ja myös metallisidoksia muodostuu pintojen välille. Kevytmetallien pinnoilla ne voivat toimia kovina keraamivahvikkeina, kuten esimerkiksi alumiinilla ja etenkin magnesiumilla, joka on herkästi korrosoituva. Näin yhdistyvät näiden metallien keveys korkean entropian metallien erinomaisiin ominaisuuksiin. Pinnoitukset ovat myös

ekologisia, nopeita valmistaa ja säästävät pohjamateriaalin käyttöä. HEA-pinnoitukset voidaan jakaa metallipinnoituksiin, keraamipinnoituksiin ja komposiittipinnoituksiin.

HEA-pinnoituksia on tehty yhdellä materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikalla nimeltä laser engineered net shaping (LENS). LENS-tekniikka on hieman erilainen materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikka. LENS-tulostimessa tulostinpää tekee kaiken, eikä metallijauhetta tarvitse erikseen aina lisätä tulosteen päälle. Tämä nopeuttaa valmistusta verrattuna esimerkiksi perinteiseen jauhepetimenetelmään. Tulostinpää koostuu laserista, suojakaasuväylästä ja hienojakoista metallijauheita toimittavista väylistä. Tulostinpään tehokas lasersäde sulattaa metallijauheen suoraan tulostettavan kappaleen pintaan. Tekniikalla voidaan myös korjata kuluneita tai vaurioituneita pintoja.

Plasmaruiskutuksella saadaan myös kovia ja kulutuskestäviä pintoja, jotka toimivat kovissakin lämpötiloissa. Plasmaruiskutettuja HEA-pinnoituksia on tehty esimerkiksi teräkselle, magnesiumille ja incoloy 800H -superseokselle. Plasmaruiskutuksella pinnoitukseen ei tule niin hyvä haja, mutta pinta on silti toimiva ja tiivis (kuva 11). Plasmaruiskutus voidaan jakaa tyhjiöplasmaruiskutukseen (VPS), alipaineplasmaruiskutukseen (LPPS) ja atmosfääriseen plasmaruiskutukseen (APS). Suurnopeusliekkiruiskutuksella (HVOF) saavutetaan vielä parempia pinnoitustuloksia, kuin plasmaruiskutuksella.

(AlCrMoTaTi)SiN-pinnotusta tutkittaessa on huomattu oksidikerroksen olevan pienin ja paras, kun piitä oli seoksessa 7,51 prosenttia vähentäen oksidikerroksen hapettumista huomattavasti. Pienemmillä piin arvoilla hapettava oksidikerros oli huomattavasti syvempi, mitä ei tietenkään haluta, vaan halutaan hapettumisen tapahtuvan mahdollisimman lähellä pinnoituksen ulkopintaa.

Friction stir -hitsaus on osoittautunut korkean entropian metalleilla parhaiten toimivimmaksi hitsaustekniikaksi verrattuna esimerkiksi kaari- ja laserhitsaukseen, ja mahdollistaa paremman kovuuden, venyvyyden ja lujuuden liitosalueella. Venyvyys heikkenee jonkun verran hitsattaessa korkean entropian metalleja, joka täytyy huomioida.

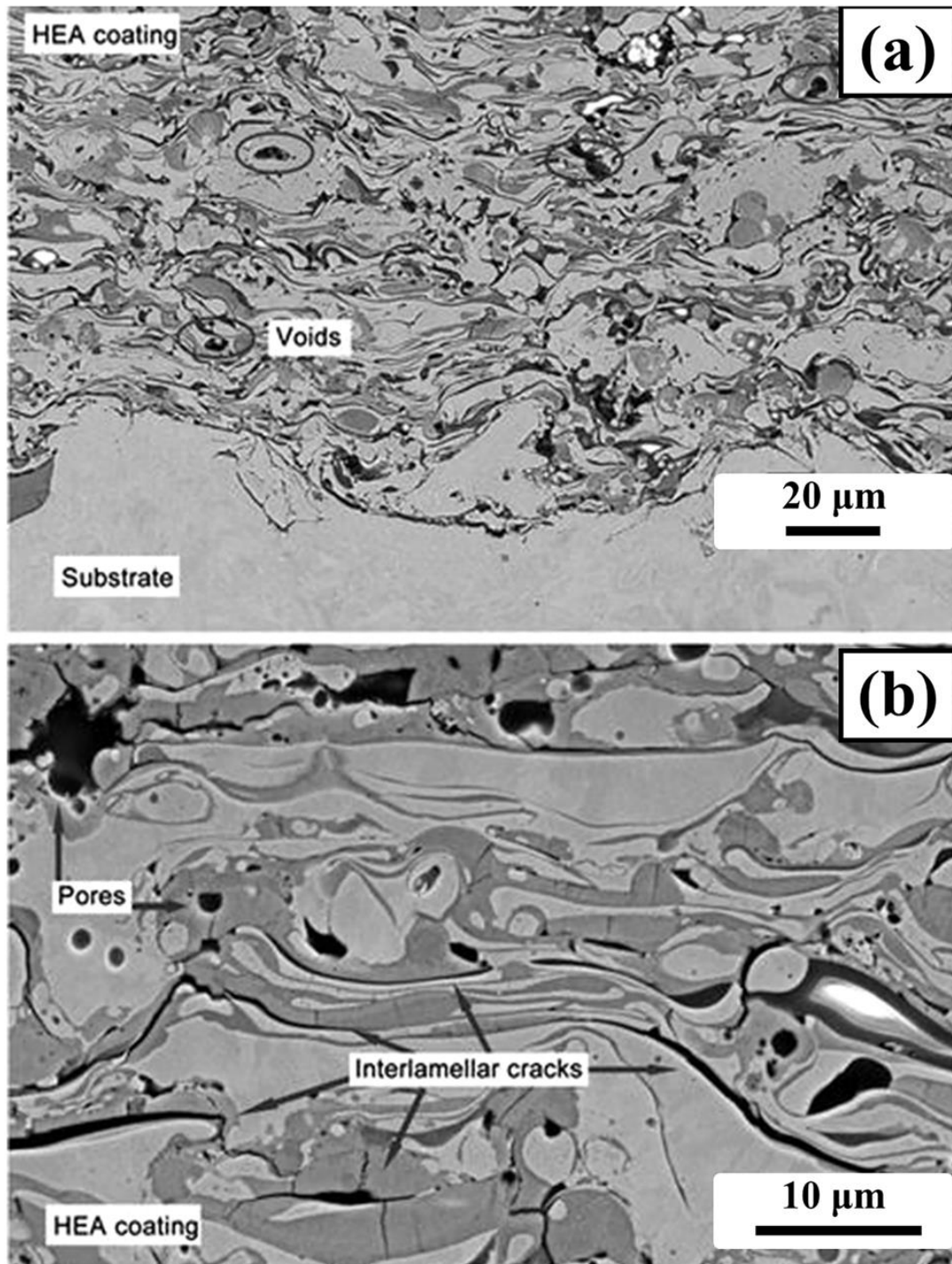
MCA, multicomponent alloy, sekä MPEA, multiple-principal-element alloy vastaavat korkean entropian metalleja, ja usein niistä puhutaan samoinakin selkeän määritelmän selvästi puuttuessa. Suomeksi karkeasti käännettynä multikomponenttimetalli tai useamman ”päämetallin” seos. Samoin kuin korkean entropian metallit,

multikomponenttimetallit ovat useamman metallin seoksia, joissa on selkeästi ainakin neljää eri "päämetallia" sisältäen jopa 12 eri seosmetallia.

Multikomponenttimetallien ero korkean entropian metalleihin on se, että korkean entropian metalleissa kaikkia metalleja on suunnilleen saman verran seoksessa, kun taas multikomponenttimetalleissa seoksen metallit voivat olla eri suhteissa.

Multikomponenttimetallit sekä korkean entropian metallit ovat vielä suhteellisen vähän ymmärrettyjä ja tutkittuja, joten potentiaalia löytää monia uusia käyttökelpoisia seoksia on paljon, koska mahdollisia seoksia on valtavasti ja seoksia on tutkittu enimmäkseen faasidiagrammin rajoilta. Multikomponenttimetalleilla ja korkean entropian metalleilla faaseja on yllättävän vähän, mutta seosmetallien liukoisuus toisiinsa on erittäin laajaa seoksesta riippuen. (80; 81; 82; 83; 84.)





Kuva 11. Plasmaruiskutettuja HEA-pinnoituksia, joista näkyy hyvin pinnan kuvio ja virheet. Ylempänä on AlCoCrFeNi-seos ja pohjametallia. Alempana on MnCoCrFeNi-seos (81).



## 6 Muovit ja komposiitit

Autotekniikassa muoveja käytetään, koska ne ovat kevyitä, niillä on hyvä korroosiokesto, ne sitovat hyvin energiaa eli lisäävät kolariturvallisuutta, pienentävät valmistuskustannuksia ja mahdollistavat monimutkaisia rakenteita. Muovien osuus nykyautojen rakenteesta on noin 50 prosenttia, niiden painon ollessa kuitenkin vain noin 10–20 prosenttia koko auton painosta. Autossa muovien käyttökohteet laajenevat koko ajan viimeisimpänä tutkimuskohteena muovin käyttäminen moottorin lohkon valmistusmateriaalina.

Muoveja on käytössä verhoiluosissa, niin auton ulkona kuin sisällä, moottorissa, vaihteistoissa ja jopa itse auton rungossa. Muovit sopivat erittäin hyvin käyttöön voimansiirrossa, koska ne vaimentavat ääntä ja vähentävät tärinää (NVH). Täyssähköisessä BMW i3 -mallissa muovia käytetään esimerkiksi hujakennorakenteisissa törmäysvyöhykkeissä, jotka sitovat törmäysenergiaa kolareissa.

Neljä eniten käytettyä muovia autotekniikassa ovat polypropeeni (PP), polyvinyylidikloridi (PVC), polykarbonaatti (PC) ja akryyliniitrilibutadie-enistyreeni (ABS).

Polypropeeni on autotekniikassa selvästi eniten käytetty muovi. Siitä voidaan tehdä helposti vaikeitakin muotoja. Sillä on hyvä lämmön- ja kemikaalinkesto ja hyvä iskunkestävyys. Mustalla polypropeenilla on paras UV-vastustuskyky. Sitä käytetään todella laajasti puskureista lattiaverhoilun kuituihin. PP on halpaa verrattuna muihin, ominaisuuksiltaan samankaltaisiin muoveihin.

Polyvinyylidikloridi on kestävä, joustava ja itsestään sammuva hyvä yleismuovi, jota on myös helppo muovata erilaisiin muotoihin. Sitä käytetään esimerkiksi kojelaudoissa.

Polykarbonaatin erottaa muista muoveista sen todella hyvä iskunkestävyys. Se on myös erittäin kulutuskestävää, kevyttä, ja sillä on hyvä säänkesto. Se soveltuu vaihteleviin lämpötiloihin. Sitä käytetään esimerkiksi puskureissa LIDAR-tutkien (Light Imaging Detection and Radar) suojakuvuissa ja valojen linseissä. Polykarbonaatista voidaan myös tehdä läpinäkyviä näkymää vääristämättömiä kattorakenteita korvaten painavampaa lasia.

Akryyliniitrilibutadie-enistyreeni on jäykkä ja iskunkestävä muovi, jolla on laadukas pinta. Sitä on helppo työstää. Käyttökohteita ovat esimerkiksi ratti, puskurit ja kojelauta.

Muovit ovat tärkeä osa komposiitteja. Niitä käytetään komposiittien sidosaineena hartseina. Muovit ovat kiinnostava vaihtoehto. Niiden kierrätettävyys on pääasiassa helppoa. Muoveja voidaan vahvistaa käyttämällä lyhyitä kuituja muovin seassa. Täten muovien lujuutta, joustavuutta, kulutuskestävyyttä ja leikkausmurtolujuutta voidaan listätä sekä väsymistä ja alttiutta lämmölle vähentää. Kuituvahvisteiset muovit sitovat törmäysenergiaa noin nelinkertaisesti verrattuna teräkseen. (85; 86; 87; 88; 89, s. 28-31.)

## 6.1 PEI (ULTEM)

PEI eli polyeetteri-imidi on erikoiskestomuovi. Ultem on kaupp nimi PEI-muoveille. PEI-muoveilla on todella hyvät ominaisuudet. Siksi ne ovat suosittuja materiaalia lisäävässä valmistuksessa. PEI-muoveja voidaan valmistaa monella eri tekniikalla. PEI on halvempi ja usein optimaalisin vaihtoehto ominaisuuksiltaan laadukkaammalle, mutta huomattavasti kalliimmalle PEEK-muoville (polyeetterieetteriketoni).

PEI-muoveilla korkea lujuus-painosuhte jo ilman lujitettakin, pieni lämpölaajeneminen, korkea läpilyöntilujuus, ne sietävät erinomaisesti lämpöä, säteilyä ja kemikaaleja menettämättä ominaisuuksiaan. Ne ovat kosteudenkestäviä, niillä on hyvä palonkesto, ja ne tuottavat vain vähän savua palaessaa. Ne ovat myös elintarvikehyväksytyjä. Niiden huonoja puolia ovat niiden hauraus, valmistuksen vaikeus sen vaatiessa korkeita lämpötiloja, herkkyys vahvoille emäksille, kalliit materiaali- ja valmistuskulut sekä rajoitettu värjättävyys.

Erilaisia seoksia on monia, kuten esimerkiksi 30-prosenttisesti lasikuitulujitteinen paremmin muotonsa pitävä ULTEM 2300. ULTEM 1010 on moottoriloihin soveltuva seos, jolla on paras lämmönkesto ja uusin ULTEM 9085, joka soveltuu toimivien prototyyppien valmistukseen. ULTEM 9085 on suosittu esimerkiksi lentokoneissa ja junissa sen FST-hyväksynnän (flame, smoke, toxicity) vuoksi. Siitä on kahta eri versiota toinen yleiseen ja toinen ilmailukäyttöön.

Autotekniikassa PEI-muoveja käytetään sähkö- ja valaistusosiin sekä moottoritalan osiin esimerkiksi vaihteistoissa, kaasuläppäkoteloidissa, käynnistyksen osissa, termostaatin rungoissa, heijastimissa, lamppujen liittimissä, sulakkeissa, rattaissa, laakereissa, magneettiventtiileissä ja öljypumpun osissa. (90; 91; 92.)

## 6.2 UHMWPE

UHMWPE tulee sanoista ultra high molecular weight polyethylene. Pinnaltaan todella sileää, ja sen ominaisuutena onkin todella hyvä kulumisenesto pinnan alhaisen kitkakertoimen takia. Sillä on todella hyvä iskunkesto, kemikaalinkesto, kovuus, ja kosteus ei imeydy siihen ollenkaan. Se kestää hyvin korkeita lämpötiloja, mutta on kallista valmistaa.

Sitä käytetään vähentämään metalli- ja muovimateriaalien kulumista, enimmäkseen ohjaamon paneelien vinkunan ja räminän estoon teipin muodossa. Teipin toisen puolen kumihartsiliimapinta tarttuu todella hyvin muovi- ja metallipinnoille jopa vaikeisiin muotoihinkin ja voidaan käyttää auton ulko- tai sisäosiin. Teippiä on saatavilla esimerkiksi 3M:ltä ja DeWalilta läpikuultavana ja mustana. Autotekniikassa muita sovelluskohteita ovat esimerkiksi kytkinpolkimen laakerointi, moottorin jakoketjun kiristimen laakeripinta ja pohjapanssarit. (93; 94; 95; 96; 97.)

## 6.3 CFRP

Komposiitteja käsitellessä täytyy huomioida mahdolliset terveysriskit. Esimerkiksi lyhyet kuidut, kuitupöly ja hartsit saattavat aiheuttaa mm. hengitystie-, iho- ja silmäoireita, yliherkkyyttä sekä syöpää. Kunnolliset henkilökohtaiset ja muut suojaustoimenpiteet ovat suositeltavia. (98.)

Komposiitit rakentuvat kahdesta osasta, kuiduista ja niitä sitovasta liimasta. Kuiduista puhutaan usein myös lujitteena, ja tällä tarkoitetaan kuitujen lisäksi mahdollisia täyteaineita. Matriisi on taas useimmin käytetty nimitys komposiittien liimasta. Muovikomposiiteista puhutaan silloin, kun matriisina toimii joku polymeerimuovi.

Hiilikuitukomposiitit rakentuvat siis hiilikuiduista, jotka ovat joko punottuna kuituna tai irrallisia kuituja, ja liimasta eli matriisista. Hiilikuitukomposiitti painaa vain kuudesosan teräksen painosta. Sen lujuus-paino- ja jäykkyys-painosuhteet ovat todella hyvät. Tästä syystä se on erittäin suosittu materiaali urheiluautoissa. Hiilikuituja valmistetaan pääasiassa polyakrylinitriilistä (PAN). (86; 99, s. 3, 6, 11.)

Autojen turvallisuutta ja keveyttä saataisiin lisättyä valmistamalla monia autojen osia hiilikuitukomposiiteista, mutta niiden käyttöä rajoittaa niiden korkea hinta, valmistettavuus ja kierrätettävyys. Kierrätettävyys on hiilikuidulla iso ongelma, koska

hiilikuituvahvisteisen kertamuovin kierrättäminen on työlästä, ja kierrättäminen tuhoaa sen parhaat ominaisuudet pilkkomalla kuidut lyhyemmiksi. Pitkäkuituiset hiilikuitukomposiittien käyttö tulee luultavasti rajoittumaan normaaleissa henkilöautoissa pieniin optimoituihin käyttökohteisiin. Pitkäkuituisten hiilikuitukomposiittien suosio kalliimmissa urheiluautoissa tulee kuitenkin todennäköisesti kasvamaan. Tätä näkemystä tukee nykyiset autovalmistuksen trendit. (100.)

Autojen vetoakseli (autoissa, joissa sellainen on) kannattaa valmistaa hiilikuitukomposiitista. Painosäästöä saavutetaan noin 50 prosenttia teräksestä valmistettuun verrattuna sekä toisin kuin teräksinen, kokoonpuristavassa voimassa hiilikuitukomposiitti antaa periksi ja leviää silppoutumalla (englanniksi brooming), mikäli voima tulee kuidun pituuden suunnassa esimerkiksi nokkakolarissa.

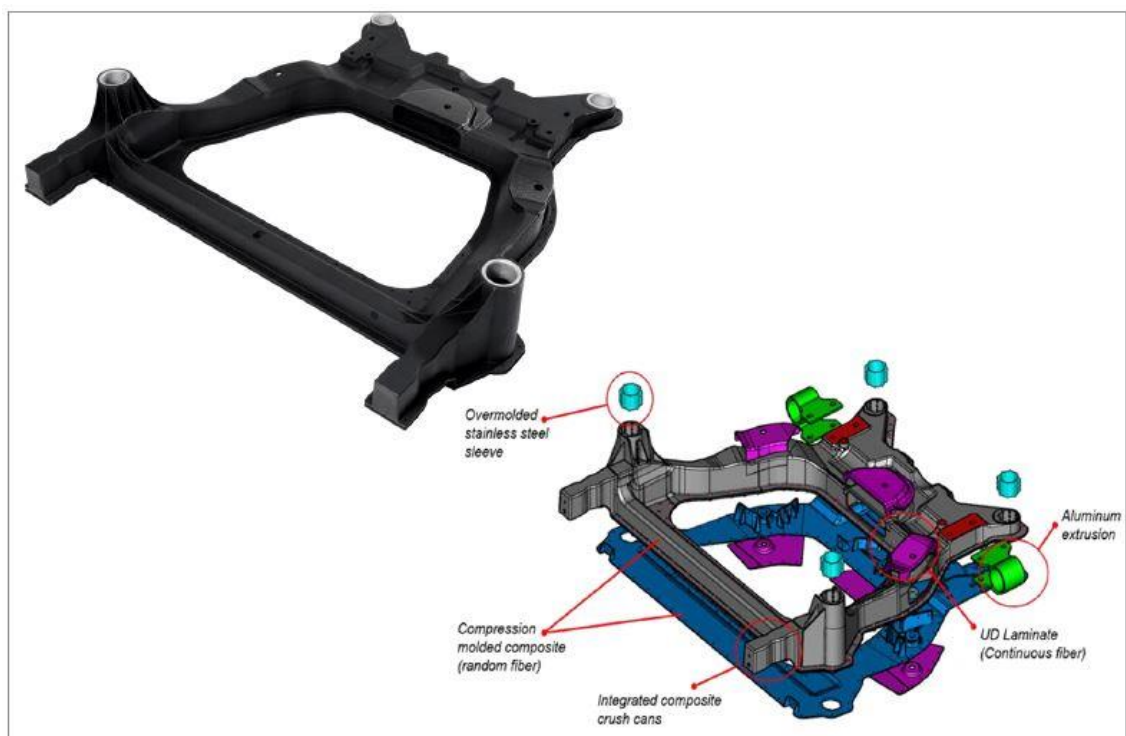
Hiilikuitu siitoo energiaa 12-kertaa enemmän teräkseen verrattuna. Täten siitä voitaisiin valmistaa tehokkaita törmäysvyöhykkeitä. McLaren Senna -urheiluautossa penkistä on saatu tehtyä todella kevyt penkin koostuessa ontosta hiilikuiturakenteesta. Kertamuoviset hiilikuitukomposiitit soveltuvat myös todella monien muiden osien valmistukseen korvaten muovi- sekä metalliosia. Hiilikuitukomposiitteja käytetään esimerkiksi koripaneeleissa, imusarjoissa, monokokeissa ja auton katossa alentaen auton painopistettä. Niitä käytetään myös esteettisistä syistä joskus esimerkiksi sisätilojen verhoilulistojen valmistukseen. (86; 101.)

Hiilikuituvahvisteinen kestopuovi todella kiinnostava materiaali, joka eroaa hiilikuituvahvisteisesta kertamuovista paremmalla kierrätettävyydellään. Tästä kestävästä ja kevyestä materiaalista olisi mahdollista valmistaa esimerkiksi auton ulkopinnat ja muita muoviosia korvaten täten metallin ja perinteisen muovin tietyissä sovelluskohteissa keventäen painoa. Hiilikuituvahvisteisen kestopuovin kierrätys on helppoa. Kierrätystä tämän muovin kanssa ei täytyisi kuitenkaan ajatella niin, että tämän muovin täytyisi olla jotenkin hävitettävissä tai sen täytyisi maantua. Paine kun on ollut koko ajan siirtyä fossiilipohjaisista muoveista pois päin. Tätä materiaali täytyisi miettiä enemmänkin samalla tavalla, kuin esimerkiksi alumiinia ja terästä, että sitä käytetään uudelleen, uudelleen ja uudelleen.

Kierrätetyn hiilikuituvahvisteisen kestopuovin, recycled carbon fibre (rCF), materiaalia lisäävä valmistus on helppoa sen tulostuessa helposti ja laadukkaasti, eikä valmistustekniikka vaurioita lyhyitä hiilikuituja. rCF eroaa CF-PLA:sta esimerkiksi

kuitujen pituudella; rCF:ssä kuidut ovat paljon pidempiä. CF-PLA:ssa kuidut ovat todella lyhyitä, ja niistä voitaisiin melkeinpä puhua täytekuituina.

Patentoidulla DiFTs-tekniikalla (Discontinuous Fiber-reinforced Thermoplastic sheet) on saatu valmistettua laadukkaita ja kestäviä lyhyillä hiilikuiduilla vahvistettuja kestopuoviarkkeja. Fordille kehitetty etuapurunko koostuu kahdesta lyhyillä 50K-hiilikuiduilla vahvistetusta muovikappaleesta, jotka on valmistettu SMC-valmistustekniikalla (sheet molding compound)(kuva 12). Näin valmistettu apurunko on melkein 10 kiloa, 34 prosenttia, kevyempi kuin vastaava teräksestä valmistettu etuapurunko. (86; 102; 103.)



Kuva 12. Fordin kevyt hiilikuituvahvisteisesta muovista valmistettu etuapurunko. Etuapurunko olisi mahdollista tehdä kierrätetystä hiilikuidusta (102).

### 6.3.1 Carbotanium

Carbotanium on Modena Designin kehittämä hiilikuitu-titaanikomposiitti. Se valmistetaan hiekkapuhaltamalla ensin Timetal 15-3 -beta-titaani alumiinioksidilla, pinnoittamalla ohuella platinakerroksella, vanhentamalla sitä 8-16 tuntia noin 500 asteessa, suihkuttamalla BAR 127 -primeri platinapinnoitettuun titaaniin, lisäämällä liimaaine, esimerkiksi AF163-2, primeripuolelle ja liittämällä hiilikuitu liimapuolelle. Tällä keinolla

hiilikuitu saadaan liitettyä titaaniin. Sillä on korkea lujuus ja jäykkyys eli erinomainen lujuus-jäykkyys-painosuhte ja hyvät väsymisominaisuudet, mutta se on erittäin kallis materiaali. Pagani on käyttänyt materiaalia esimerkiksi Zonda R- ja Huayra-malleissaan. Toisin kuin normaalilla hiilikuidulla, Carbotaniumin yksi hyvä puoli on se, että Carbotanium eri repeydy tai silppoudu esimerkiksi törmäyksessä. (104; 105; 106.)

### 6.3.2 CF-PLA

Materiaalista käytetään myös nimiä PLA+CF, PLA-CF ja CFR PLA. Nimi tulee sanoista carbon fiber (reinforced) polylactic acid.

Pelkkä PLA on biohajoavaa muovia, jota valmistetaan uusiutuvista raaka-ainesta. Sitä käytetään paljon 3D-tulostuksessa. PLA kilpailee perinteisten muovien kanssa ja on samankaltainen ominaisuuksiltaan sillä erolla, että se on täysin kompostoitava. Se voidaan kierrättää myös uudelleen muoviksi. (107; 108.)

CF-PLA on lyhyillä hiilikuiduilla vahvistettua muovia. Sen lujuusominaisuudet ovat hieman normaalia PLA- ja ABS-muovia paremmat, mutta vain kuitujen suuntaisesti eli printtaussuunnan mukaan suoraan (kuva 13). Materiaali on helposti printattavaa ja pintojen lopputulos on laadukas. CF-PLA:n hiilikuidut eivät kompostoidu. (109.)



Kuva 13. CF-PLA-muovin lyhyet hiilikuidut kulkevat materiaalissa printtaussuunnan mukaan. Skaala mikrometreissä (109).



Huomioitavaa CF-PLA-muovissa on siinä mahdollisesti piilevä terveysriski, niin materiaalia tulostavalle, kuin sitä käsitteleville henkilöille sekä tilan kontaminoitumisvaaran. Materiaalia ei ole ilmeisesti tutkittu tarpeeksi ennen sen päästämistä markkinoille. Perusteellisimmissa testeissä on ilmennyt, että nämä pienet muovin vahvikkeena toimivat lyhyet hiilikuidut, saattavat irrota materiaalin pinnalta iholle käsiteltäessä kappaletta sekä tulostaessa levitä huoneilmaan. Tämä voi olla myös vääränlaisen tulostimen tai huonojen tulostusasetusten syytä. Kuitenkin kunnolliset henkilökohtaiset ja muut suojaustoimenpiteet ovat suositeltavia. (98; 109.)

#### 6.4 GFRP

Lasikuitukomposiitti, englanniksi glass fibre reinforced plastic (GFRP), on yhteinäisestä punottua lasikuitua tai lasikuituvahvisteista kesto- tai kertamuovia. Lasikuitukomposiitteja käytetään halvemmissa autoissa hiilikuitukomposiittien korvaajana. Lasikuitukomposiiteista voidaan valmistaa esimerkiksi koripaneeleja, konepeltäjä ja alusta ja rungon vahvikkeita, joidenkin lasikuitukomposiittien yltäessä lujuudeltaan hiilikuitukomposiittien tasolle. Lasikuitukomposiitit eivät ole yhtä jäykkiä, mitä hiilikuitukomposiitit ovat. Lasikuitua on vaikea kierrättää ja päätyy usein kaatopaikoille. (110.)

#### 6.5 Biokomposiitit (NFRPC)

Biokomposiiteista puhutaan myös luonnonkuitukomposiitteina tai NFRPC:nä. NFRPC tulee sanoista natural fibres reinforced polymer composite. Biokomposiitit voidaan jakaa kolmeen eri alakategoriaan; ei biohajoaviin fossiilipohjaisiin luonnonkuitukomposiitteihin, biohajoaviin biopohjaisiin luonnonkuitukomposiitteihin ja ei biohajoaviin biopohjaisiin synteettisiä kuituja käyttäviin komposiitteihin. Esimerkiksi työssä käsiteltävä CF-PLA lasketaan biopohjaiseksi synteettisiä kuituja käyttäväksi komposiitiksi.

Biokomposiiteissa rakennetta vahvistavana kuituna toimii yleensä luonnosta saatavat kuidut. Luonnonkuidut toimivat muoveissa samalla periaatteella kuin synteettisesti valmistetut kuidut, mutta ne ovat kuitenkin ympäristöystävällisempi vaihtoehto. Etenkin se, etteivät ne kilpaile ruoantuotannon kanssa, on erittäin positiivinen tekijä. Esimerkiksi viljan tuotannossa jää aina yli olkea, josta on mahdollisuus valmistaa luonnonkuituja. Pellava- ja hamppukuidut on autotekniikassa yleisimmin käytetty luonnonkuidut, mutta myös puusta, juutista ja oljesta voidaan valmistaa muovien vahvikkeena toimivia kuituja.

Luonnonkuitujen käytön hyödyt ovat siis ympäristöystävällisyys, suhteellinen keveys, halpa hinta, muokkaamisen helppous, biohajoavuus riippuen käytetystä muovilaadusta ja se, että niiden käyttö tukee kestävästä kehitystä.

Luonnonkuitujen käytössä on kuitenkin huonoja puolia kuten esimerkiksi niiden herkkyys kosteudelle, etenkin jatkuvalla kosteudelle. Luonnonkuidut imevät helposti kosteutta itseensä muovissa, mikäli sitovana muovilaatuna ei ole käytetty kosteutta hyvin vastustavaa muovia. Mitä enemmän kuitu imee kosteutta itseensä, sitä enemmän kuidun muovia vahvistava ominaisuus heikkenee. Kuitujen laatu myös vaihtelee riippuen keräysajasta, vallineista sääoloista, kasvualustasta ja niiden käsittelystä.

Biokomposiitteja on käytetty esimerkiksi ovipaneelien, penkkien takaosien, hattuhyllyn ja takakontin verhoiluun sekä moniin muihin sovelluksiin. Biokomposiiteilla voidaan siis karkeasti korvata perinteisiä muoveja ja synteettisillä kuiduilla vahvistettuja muoveja niiden käyttökohteissa. Esimerkiksi UPM:llä on tarjolla selluloosakuituisia UPM Formi ja UPM ProFi -biokomposiitteja.

Autotekniikassa prototyyppikappaleiden valmistamisessa 100-prosenttisesti hajoavat muovit ja biokomposiitit ovat kiinnostava vaihtoehto valmistaa kappaleita ympäristöystävällisesti, silloin kun prototyyppikappaleelta ei vaadita vielä tarkempia ominaisuuksia. (111; 112, s. 1–6; 113.)

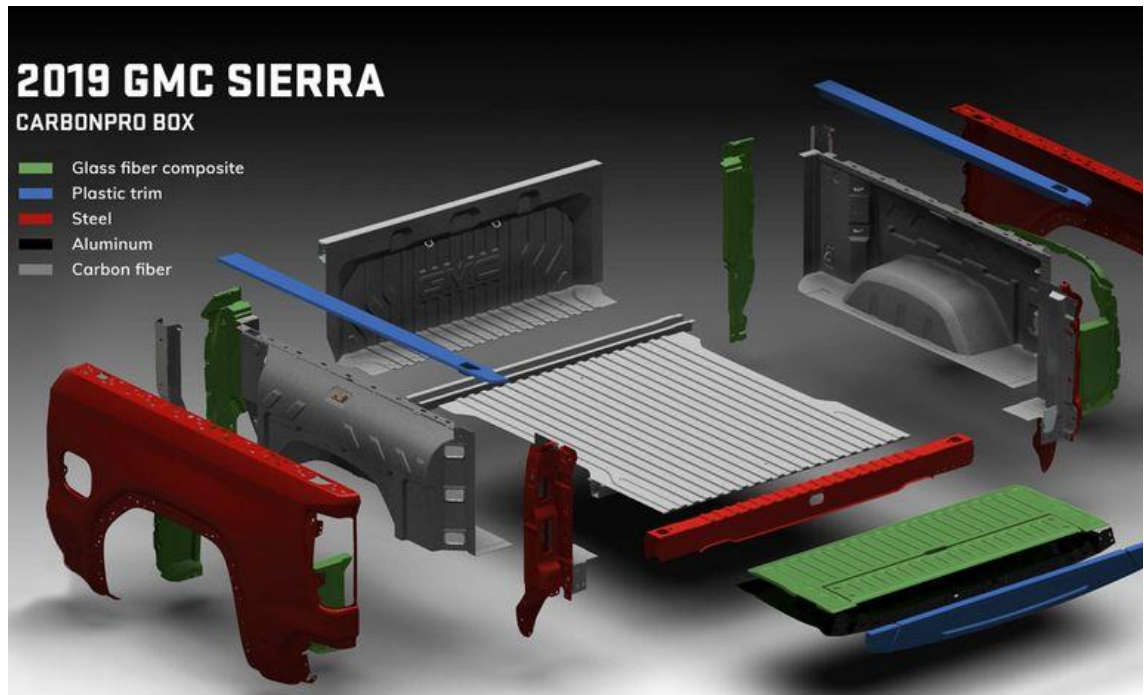
## 6.6 Komposiittien kierrätys

Komposiitit täysin 100-prosenttisiä biokomposiitteja lukuun ottamatta ovat haastavia kierrättää. Kierrätyksen vaikeus on juuri suurin negatiivinen puoli hiili- ja lasikuitukomposiiteissa. Kierrätettäessä komposiitteja kuitujen ehyden, laadun ja mahdollisen ristipunonnan säilyttäminen olisi ihanteellista, sillä ne vaikuttavat komposiittien ominaisuuksiin todella paljon. Menetelmiä kehitetään kierrättämisen parantamiseksi ja valmistuksessa tapahtuvan materiaalihukan minimoimiseksi.

Yleinen menetelmä kierrättää kuituja on pilkkoa niitä lyhyemmiksi hartsin poistamisen jälkeen ja tehdä niistä irtosilppua. GMC:n uudessa lava-autossa tällaisia pilkottuja hiilikuituja käytetään hienosti hyväksi auton lavassa (kuva 14). Lava on valmistettu hiilikuituvahvisteisesta nylonpohjaisesta kestumuovista, missä noin 2,5 cm pituiset hiilikuidut ovat järjestyneet satunnaisesti. Tätä hiilikuituvahvisteista muovia voidaan helposti kierrättää sulattamalla se ja valamalla uudelleen. Irtosilpusta voidaan myös



muodostaa sidosaineen (esim. ABS, PP) kanssa pellettejä, joita voidaan käyttää esimerkiksi SMC- ja BMC-tekniikoissa tai 3D-tulostamisessa. Pellettejä on helpompi kuljettaa, ja ne ovat skaalautuvampi sarjavalmistukseen. Kuituja voidaan myös jauhaa hienoksi pölyksi materiaalien täyteaineeksi, mutta tällöin menetetään suurin osa kuitujen hyödyistä.



Kuva 14. GMC Sierra -avolavan Carbonpro-lavassa käytetään hiilikuituvahvisteista kestomuovia. Lava koostuu useammasta palasta (kuvassa harmaalla), jotka liimataan yhteen lopullisen muodon saamiseksi (114).

Lasikuitujätettä on paljon hiilikuitujätettä enemmän. Tällä hetkellä esimerkiksi tanskalainen lasi- ja hiilikuituvalmistaja Fiberline kierrättää lasikuitujätteensä sen saksalaisten yhteistyöyritysten Zajonsin ja Holcimin avulla. Saksassa lasikuitujäte murskataan käytettäväksi sementin valmistukseen, ja lasikuitujen sisältämä energia saadaan myös hyödynnettyä kierrätysprosessissa. Tämä on vaihtoehtoinen tapa saada lasikuitujäte hyödynnettyä. Lasikuitujätettä päätyy silti vielä paljon kaatopaikoille, koska se on verrattaen halpaa materiaalia ja sen kuljettaminen kauempaa kierrätyspaikoille on taloudellisesti kannattamatonta.

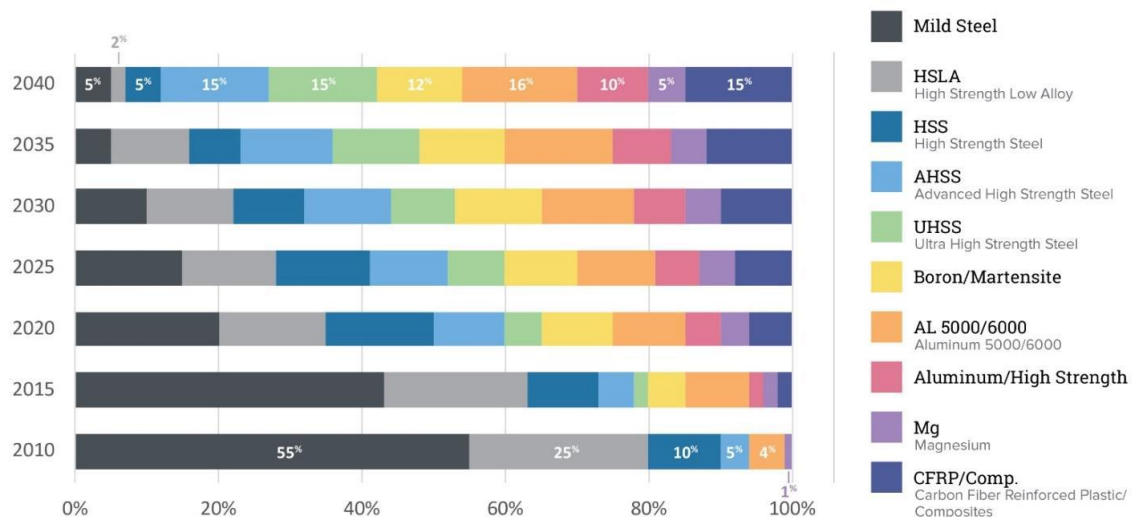
Hiilikuitujätettä yritetään kierrättää mahdollisimman tehokkaasti sen korkeamman hinnan takia. Nyt on kehitetty tekniikka, jolla voitaisiin hyödyntää hiilikuitujätettä tehokkaasti ilman, että sen alkuperäiset ominaisuudet kärsivät oleellisesti. Tämä kierrätysmenetelmä

säilyttää kuitujen halluttuja ominaisuuksia, mutta on riippuvainen kuitujen pilkontapituudesta.

Tutkijat testaavat Yhdysvalloissa lentokonevalmistaja Boeingin toimittaman hiilikuitujätteen käyttämistä huokoisen asfaltin vahvistamisessa. Alustavissa testeissä asfaltin vahvistamiseen käytetty hiilikuitujäte on toiminut toivotunlailla vahvistaen materiaalia. Ennen laajempaa käyttöä selvitettäviä asioita ovat esimerkiksi kulumisen ja tämänkin materiaalin kierrätys. Kuitujätteen käyttö asfaltissa voi lisätä vaarallisten pienhiukkasten määrää, mikäli asfaltin sisältämät kuidut irtoavat liikenteen aiheuttaman kulumisen myötä. Maissa, joissa nastarenkaiden käyttö talvella on sallittua, tämä kulumisen ja mahdollisten kuitujen tai kuitupölyn irtoaminen on todennäköisesti suurempaa. (86; 103; 115; 116; 117; 118; 119; 120; 121.)

## 7 Tulevaisuus

Auton rakenne sekä autojen valmistus tulevat varmasti lähivuosina muuttumaan uusien tekniikoiden ja yhä kovenevien päästöjen vähennystarpeiden vuoksi. Materiaaleista voi esittää vain valistuneita arvauksia tällä hetkellä, mihin suuntaa aletaan kehittämään. Kuvassa 15 on yhdysvaltalaisen Car Researchin tuottama ennuste materiaalien osuuksista Yhdysvalloissa valmistetuissa autoissa vuoteen 2040 asti.



Kuva 15. Car Researchin tuottama ennuste materiaalien osuuksista autoissa Yhdysvalloissa vuosina 2010–2040 (122, s. 15).

Kestävän kehityksen toteutuminen täytyisi varmistaa. Etenkin toimia aggressiivisesti ekologisen kestävyuden varmistamiseksi tukemalla yrityksiä rahallisesti kehittämään ja siirtymään ekologista kestävyyttä varmistaviin toimintamalleihin ja materiaaleihin. Materiaalien kierrätettävyys täytyisi yhä vahvemmin huomioida sekä keskittyä ensisijaisesti kierrätysmateriaalien käyttöön. Autojen materiaalit ovat mahdollista kierrättää 100-prosenttisesti. (86.)

Ajattelemalla autojen rakenne kokonaan uudelleen voitaisiin saada uusia ideoita materiaalien vähentämiseksi autoissa. Esimerkiksi osien vielä tehokkaampi suunnitteleminen yhtenäisinä kokonaisuuksina osana auton jäykkyyttä ja kolariturvallisuutta voisi poistaa turhaa materiaalia. Autojen suunnittelemista materiaalitehokkaammin voi tulevaisuudessa myös vauhdittaa materiaalia lisäävä tulostus. Materiaalia lisäävä tulostus mahdollistaa materiaalien tulostamisen huokoisemmiksi niiden menettämättä haluttuja lujuusominaisuuksia, materiaalin tulostamisen vain niihin kohtiin, joissa on tarvetta sekä materiaalien yhdistämisen. Integroidut osat voisivat olla osa auton ulkopintaa ja samalla toimia sisäpintana sekä jäykistävänä kolarirakenteena koostuen esimerkiksi tiheämmästä sekä harvemmasta materiaalista, kuten alumiiniseoksesta ja vaikka biomuovista. Hinta, huollettavuus, valmistettavuus, hiljaisuus ja korjattavuus ovat kuitenkin avoimia kysymyksiä.

Autojen kokoa täytyisi ajatella kriittisesti, sillä koko tuo painoa lisää. Voisi väittää, että nykyään ollaan autojen koon suhteen tilanteessa, johon täytyisi puutua esimerkiksi EU-tasolla. Trendi mittojen kasvattamiseen on ollut koko ajan nousussa, joten miksi autonvalmistajat ottaisivat riskiä malliensa mittojen pienentämisellä ja mahdollisesti menettäisivät asiakkaita autojen sisätilojen koon pienuuden takia verrattuna kilpailijoihin. Tulevaisuudessa autot tulevat luultavasti olemaan fyysisiltä mitoiltaan nykyisiä autoja pienempiä, mutta muutosnopeus riippuu paljon vaikuttajista.

Auto on selvästi lähestymässä kehityksessä pistettä, jossa auton muuttuminen nykyisestä radikaalisti, nopealla aikataululla, voi olla hyvinkin mahdollista yhä nopeammin kehittyvien tietokoneiden, uusien mullistavien valmistustekniikoiden ja materiaalien kehittymisen vuoksi. Nämä tulevat mahdollistamaan entistä futuristisempia kevyitä ratkaisuja.

## 8 Yhteenveto materiaaleista ja niiden sovelluksista autotekniikassa

Jotta saisimme järkevästi lähestytyä kevyiden materiaalien optimaalisimpia ratkaisuja autot täytyisi jakaa niiden käyttökohteen ja odotettavan käyttöiän perusteella. Autot ovat monille ihmisille keino liikkua, ja auto on tarkoitus jossain vaiheessa kierrättää. Erikoisemmat autot, kuten urheiluautot, usein kuitenkin löytävät oman harrastekuntansa ja keräilijänsä. Ne säilyvät liikenteessä todennäköisemmin pidempään, ja jotkut eivät poistu ikinä, ajatellaanpa vaikka Ferrari 250 GTO:ta tai Bugatti Chironia. Tämän vuoksi hiilikuitukomposiittien laaja käyttäminen näissä urheiluautoissa olisi perusteltua. Ne tehdään säilymään omina insinööritaidon taideteoksinaan ikuisuuden, jos vain aika suo, eikä niiden kierrättämistä tarvitse miettiä.

Taas, jos palataan takaisin normaaleihin käyttöautoihin, parhaiten kierrätettävä vaihtoehto materiaalissa olisi varmasti paras, mikäli ajatellaan kestävän kehityksen kannalta. Kuitenkin parhaiten kierrätettävä ei välttämättä ole paras vaihtoehto kevyeksi materiaaliksi auton koko elinkaaren päästöjen kannalta. Täytyy myös ottaa huomioon auton hintaluokka, koska eksoottisia materiaaleja ei voi loputtomasti käyttää, mikäli halutaan säilyttää automallin hintataso.

Nykyiset käytössä olevat kevyet materiaalit voitaisiin jakaa karkeasti auton hintaluokan mukaan, kun tiedetään suunnilleen, että muovien käyttö on halvinta, sitten tulevat lyhyillä kuiduilla vahvistetut muovit, suurlujuusteräkset, alumiini, magnesiumin ja titaani. Unohdetaan tässä harvinaisemmat materiaalit esimerkiksi kalliit superseokset ja Carbotanium-komposiitti, joiden käyttö isommissa määrissä rajoittuu usein enimmäkseen edellä käytyihin kalliisiin urheiluautoihin.

Halvemmissa noin 15 000 euroa – 25 000 euroa maksavissa autoissa olisi kevyiden materiaalien ratkaisut luultavasti rajoitettava suurlujuusteräksien optimointuun käyttöön auton pilareihin rungossa sekä suosia muoveja ja lyhyillä hiilikuiduilla vahvistettua muovia esimerkiksi etuapurongossa, koripaneeleissa, konepellissä, törmäysvyöhykkeissä ja takakontissa.

Keskiluokan noin 25 000 euroa – 45 000 euroa maksavissa autoissa voitaisiin tehdä jotain kehittyneempiä kevyiden materiaalien ratkaisuja. Suurlujuusterästä voitaisiin käyttää auton rungon pilareissa, ja tehdä esimerkiksi etuapurunko, koripaneelit, konepelti, törmäysvyöhykkeet ja takakontti lyhyillä hiilikuiduilla vahvistetusta muovista.

Magnesiumia voitaisiin käyttää etujoustintukiin ja alumiinia tai magnesiumia vaihteistoon ja moottorin lohkoon lähestyttäessä auton hinnan ylärajaa.

Ylemmän keskiluokan noin 45 000 euroa – 70 000 euroa maksaviin autoissa voitaisiin käyttää jo kalliimpia kevyitä materiaaleja, kuten esimerkiksi titaania, magnesiumia ja alumiinia isoimissa määrin. Titaania voitaisiin hyödyntää pakoputkistossa ja jousissa, magnesiumia etu- ja takajoustintuissa, moottorin lohkoissa ja vaihteistossa. Runko voitaisiin valmistaa alumiinista. Lyhyillä hiilikuiduilla vahvistetusta muovista voitaisiin tehdä etuapurunko, koripaneelit, konepelti, törmäysvyöhykkeet ja takakontti.

Toisin sanoen suurlujuusteräket, alumiini- ja magnesiumseokset tulevat hyvin luultavasti kehittämään autotekniikan päämateriaaleiksi muovien ohella. Hiilikuitu- ja lasikuitukomposiittien käyttöä täytyisi rajoittaa vain välttämättömiin jäykistäviin tai törmäysturvallisuutta lisääviin sovelluksiin, kuten B-pilarin tukiin ja alustaa jäykistäviin tukiin niiden huonon kierrätettävyyden vuoksi tai ainakin niin kauan, kun näiden materiaalien kierrätettävyyteen ei ole keksitty järkevämpiä ratkaisuja.

## Lähteet

1. History of aluminum in the aerospace industry. 2016. Verkkoaineisto. Metal supermarkets. <<https://www.metalsupermarkets.com/history-of-aluminum-in-the-aerospace-industry/>>. 8.2.2016. Luettu 15.11.2019.
2. Runge, Jude Mary. 2018. The metallurgy of anodizing aluminum/The first aluminum automobiles. Verkkoaineisto. Springer Scientific Publishing Co. <<https://www.anodizing.org/page/1stALCar/The-First-Aluminum-Automobiles.htm>>. Luettu 15.11.2019.
3. Early cars: Fact sheet for children. 2001. Verkkoaineisto. Smithsonian. <<https://www.si.edu/spotlight/early-cars>>. 4.2001. Luettu 15.11.2019.
4. Tucker, Harold "Hap" & Rigdon, Bill. 2010. Aluminum bodies?. Verkkoaineisto. Model T Ford Club of America Forum. <<http://www.mtfca.com/discus/messages/118802/169440.html?1289142713>>. 6.11.2010; 7.11.2010. Luettu 15.11.2019.
5. Johnson, Erik. 2019. Introduction to electric vehicle battery systems. Verkkoaineisto. All about circuits. <<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-electric-vehicle-battery-systems/>>. 31.7.2019. Luettu 15.11.2019.
6. Wienkötter, Mayk. The battery: Sophisticated thermal management, 800-volt system voltage. Verkkoaineisto. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG. <<https://newsroom.porsche.com/en/products/taycan/battery-18557.html>>. Luettu 6.11.2019.
7. Nieminen, Jussa; Niemi, Aimo. 2019. Porsche Taycan esiteltiin juhlamenoin – Huipputekniikkaa kurvikkaissa kuorissa. Verkkoaineisto. Tekniikan maailma. <<https://tekniikanmaailma.fi/porsche-taycan-esiteltiin-juhlamenoin-huipputekniikkaa-kurvikkaissa-kuorissa/>>. 4.9.2019. Luettu 6.11.2019.
8. Unibody vs Body On Frame – Which Is Best?. 2015. Verkkoaineisto. Engineering Explained/Youtube.

- <<https://www.youtube.com/watch?v=IhbXPzPlzNI>>. 16.09.2019. Katsottu 16.11.2019.
9. Aluminum Jaguar chasing BMW 3-series and C-class. Verkkoaineisto. Latest Super Car. <<https://latestsupercar.com/aluminum-jaguar-chasing-bmw-3-series-and-c-class/>>. Luettu 20.11.2019.
  10. What Actually Is A Monocoque Chassis? | Carfection 4K. 2019. Verkkoaineisto. Carfection/Youtube. <<https://www.youtube.com/watch?v=gvgOVbV3KE>>. 14.06.2019. Katsottu 15.11.2019.
  11. How does a monocoque work?. 2018. Verkkoaineisto. Lamborghini Palm Beach. <<https://www.lamborghinipalmbeach.com/blog/what-is-a-monocoque/>>. 05.09.2018. Luettu 15.11.2019.
  12. Rajput, Ashutosh. 2018. What is monocoque chassis in cars?. Verkkoaineisto. Quora. <<https://www.quora.com/What-is-monocoque-chassis-in-cars>>. 30.08.2019. Luettu 15.11.2019.
  13. McLaren reveals details of new carbon fibre chassis plant. 2017. Verkkoaineisto. Carsifu. <<https://www.carsifu.my/news/mclaren-reveals-details-of-new-carbon-fibre-chassis-plant>>. 10.02.2017. Luettu 20.11.2019.
  14. Spinks, Jez. 2017. Geek Speak: Carbon Chassis. Verkkoaineisto. WhichCar. <<https://www.whichcar.com.au/features/geek-speak-carbon-chassis>>. 03.06.2017. Luettu 15.11.2019
  15. Audi R8 Coupé. 2015. Verkkoaineisto. CARICOS. <[https://www.caricos.com/cars/a/audi/2016\\_audi\\_r8\\_v10/images/48.html](https://www.caricos.com/cars/a/audi/2016_audi_r8_v10/images/48.html)>. 03.2015. Luettu 20.11.2019.
  16. Simpson, Campbell. 2014. The Tesla Model S 'Skateboard' Rolling Chassis Is A Thing Of Beauty. Verkkoaineisto. Gizmodo. <<https://www.gizmodo.com.au/2014/12/the-tesla-model-s-skateboard-rolling-chassis-is-a-thing-of-beauty/>>. 09.12.2014. Luettu 15.11.2019.



17. Abuelsamid, Sam. 2016. Meet The Father Of The Auto 'Skateboard' Chassis Used By Tesla: Chris Borrani-Bird. Verkkoaineisto. Forbes. <<https://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2016/05/23/the-father-of-the-skateboard-chassis-dr-chris-borrani-bird/#420e84ec7b30>>. 23.05.2016. Luettu 15.11.2019.
18. Horn, Gerhard. 2017. Ladder frames and monocoques. Verkkoaineisto. Leisure Wheels. <<https://www.leisurewheels.co.za/blogs/ladder-frames-monocoques/>>. 18.06.2017 Luettu 15.11.2019.
19. Tesla Model S Weight Distribution. 2013. Verkkoaineisto. Teslarati. <<https://www.teslarati.com/tesla-model-s-weight/>>. 19.07.2013. Luettu 20.11.2019.
20. Additive manufacturing. 2019. Verkkoaineisto. Autodesk. <<https://www.autodesk.com/solutions/additive-manufacturing>>. 2019. Luettu 01.11.2019.
21. Mäkinen, Simo & Andersin, Joni. 2018. Suorakerrostus ja 3D-tulostus roboteilla. Verkkoaineisto. Savonia. <<https://blogi.savonia.fi/3dtulostus/2018/11/29/suorakerrostus-ja-3d-tulostus-roboteilla/>>. 29.11.2018. Luettu 24.11.2019.
22. 1st. esa workshop on advanced manufacturing. Verkkoaineisto. ESA. <<https://atpi.eventsair.com/QuickEventWebsitePortal/19m26---1st-esa-workshop-on-advanced-manufacturing/home>>. Luettu 17.11.2019.
23. George, Alexander. 2014. The Germans Have Figured Out How to 3-D Print Cars. Verkkoaineisto. Wired. <<https://www.wired.com/2014/03/edag-3-d-printed-car/>>. 19.03.2014. Luettu 4.11.2019.
24. 3D Printing Metal! Press Tour Siemens UK Materials Solutions AND Free STL!. 2018. Verkkoaineisto. 3D Printing Nerd/Youtube. <<https://www.youtube.com/watch?v=6D2PHRDK4Co>>. 19.12.2018. Katsottu 28.10.2019.

25. V., Carlota. 2019. University of Maine creates the world's largest 3D printed boat. Verkkoaineisto. 3D natives. <<https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-boat-university-of-maine-161020195/>>. 16.08.2019. Luettu 28.10.2019.
26. Terässtandardit. 2019. Verkkoaineisto. METSTA; SFS. <[https://www.sfs.fi/files/1483/Teraskirjanen\\_A5\\_2019-11\\_web.pdf](https://www.sfs.fi/files/1483/Teraskirjanen_A5_2019-11_web.pdf)>. 11.2019. Luettu 14.11.2019.
27. 1.4301 Stainless Steel – An Overview. 2015. Verkkoaineisto. MEAD info. <<https://www.meadinfo.org/2015/06/1.4301-x5crni18-10-304-stainless-steel-properties.html>>. 05.06.2015. Luettu 14.11.2019.
28. 304/304L Stainless Steel. Verkkoaineisto. Nationwide Stainless. <[https://www.nationwidestainless.co.uk/materials/304\\_304l\\_stainless\\_steel/](https://www.nationwidestainless.co.uk/materials/304_304l_stainless_steel/)>. Luettu 14.11.2019.
29. 304 Stainless Steel (UNS S30400); Annealed Plate. Verkkoaineisto. MatWeb. <<http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=ec1666b2959f4746906341d6d91cfd29>>. Luettu 14.11.2019.
30. Materiaali- ja aineenkoetusstandardit. Verkkoaineisto. METSTA. <[https://www.sfsedu.fi/files/130/Materiaali-\\_ja\\_aineenkoetusstandardit.pptx](https://www.sfsedu.fi/files/130/Materiaali-_ja_aineenkoetusstandardit.pptx)>. Luettu 14.11.2019.
31. Fysikaaliset ominaisuudet. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto. <<https://docplayer.fi/52479681-Fysikaaliset-ominaisuudet.html>>. Luettu 9.11.2019.
32. Väisänen, Päivi. 2007. Teräs – Perustietoa arkkitehtiopiskelijalle. Verkkoaineisto. TKK, arkkitehtiosasto, rakennusoppi. <[http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/40/66e53a5/Teras\\_web.pdf](http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/40/66e53a5/Teras_web.pdf)>. Luettu 31.10.2019.
33. How To Prevent Corrosion When Two Dissimilar Metals Come Into Contact – Electrolysis. 2017. Verkkoaineisto. ets. <<https://embossingtapesupplies.com.au/blog/post/how-to-prevent-corrosion->

when-two-dissimilar-metals-come-into-contact-causing-electrolysis/>.

05.4.2017. Luettu 16.11.2019.

34. Galvanic/Dissimilar Metal Corrosion. Verkkoaineisto. ASSDA. <<https://www.assda.asn.au/technical-info/technical-faqs/galvanicdissimilar-metal-corrosion>>. Luettu 16.11.2019.
  
35. Gullino, Alessio; Matteis, Paolo & D'Aiuto, Fabio. 2019. Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications. Verkkoaineisto. MDPI. <<https://www.mdpi.com/2075-4701/9/3/315/htm>>. 23.2.2019. Luettu 15.11.2019.
  
36. Aircraft Corrosion Research Project. 2017. Verkkoaineisto. BEASY. <<https://www.beasy.com/latest-news/corrosion-simulation-newsletter.html?start=6>>. 2017. Luettu 15.11.2019.
  
37. Caicedo-Martinez, C.E.; Schoen, J.; Vrenken, J.; Bakels, J. & Brash, R.A.. 2003. Corrosion behavior of aluminium-steel joints prepared by a laser brazing process. Verkkoaineisto. Research gate. <[https://www.researchgate.net/publication/294342212\\_Corrosion\\_behaviour\\_of\\_aluminium-steel\\_joints\\_prepared\\_by\\_a\\_laser\\_Brazing\\_process](https://www.researchgate.net/publication/294342212_Corrosion_behaviour_of_aluminium-steel_joints_prepared_by_a_laser_Brazing_process)>. 9.2003. Luettu 15.11.2019.
  
38. Wiley, Ben. 2016. Proceed with caution: Welding dissimilar metals. Verkkoaineisto. Wiley Metal. <<https://www.wileymetal.com/proceed-with-caution-welding-dissimilar-metals/>>. 11.8.2016. Luettu 15.11.2019.
  
39. Hybrid-aluminium-construction. Verkkoaineisto. Audi. <<https://www.audi.fi/fi/web/fi/models/layer/technology/hybrid-aluminium-construction.html>>. Luettu 15.11.2019.
  
40. Liu, Ming; Guo, Yang; Wang, Jeff & Yergin, Mark. 2018. Corrosion avoidance in lightweight materials for automotive applications. Verkkoaineisto. Nature. <<https://www.nature.com/articles/s41529-018-0045-2>>. 03.09.2018. Luettu 13.11.2019.

41. Takehisa, Shoki & Iizuka, Takashi. 2014. Galvanic corrosion related to steel/aluminum dissimilar joining tailored blank. Verkkoaineisto. Scientific.Net. <<https://www.scientific.net/KEM.611-612.1460>>. 23.5.2014. Luettu 15.11.2019.
42. Kang, Minjung; Kim, Cheolhee; Kim, Junki; Kim, Dongcheol & Kim, Jonghoon. 2014. Corrosion Assessment of Al/Fe Dissimilar Metal Joint. Verkkoaineisto. <[https://pdfs.semanticscholar.org/291c/280be938369abb118340b99a2dba2a56401d.pdf?\\_ga=2.49428134.1437760091.1574160527-199245010.1573846162](https://pdfs.semanticscholar.org/291c/280be938369abb118340b99a2dba2a56401d.pdf?_ga=2.49428134.1437760091.1574160527-199245010.1573846162)>. 30.06.2014. Luettu 15.11.2019.
43. Mitä on kestävä kehitys? Verkkoaineisto. kestavakehitys.fi. <<https://kestavakehitys.fi/kestava-kehitys>>. Luettu 31.10.2019.
44. Sawe, Benjamin Elisha. 2018. The Most Abundant Elements In The Earth's Crust. Verkkoaineisto. WorldAtlas. <<https://www.worldatlas.com/articles/the-most-abundant-elements-in-the-earth-s-crust.html>>. 17.07.2019. Luettu 31.10.2019.
45. Ympäristövaikutukset. Verkkoaineisto. Kaiva.fi. <<https://kaiva.fi/vastuullinen-toiminta/ymparistovaikutukset/>>. Luettu 24.11.2019.
46. What is aluminium? Verkkoaineisto. UC RUSAL. <[https://www.aluminiumleader.com/about\\_aluminium/what\\_is\\_aluminum/](https://www.aluminiumleader.com/about_aluminium/what_is_aluminum/)>. Luettu 31.10.2019.
47. Kangas, Terhi. Alumiini – kiertotalouden kuningasraaka-aine. Verkkoaineisto. Kuusakoski Recycling. <<https://www.kuusakoski.com/fi/finland/yritys/yritys/uutiset/2017/alumiini---kiertotalouden-kuningasraaka-aine>>. Luettu 15.10.2019.
48. Alumiinit, Raaka-aine käsikirja 5. 2002. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy. Luettu 17.11.2019.
49. Djukanovic, Goran. 2018. Latest Trends for Aluminium Demand in Automotive Industry. Verkkoaineisto. SpotLightMetal. <<https://www.spotlightmetal.com/latest-trends-for-aluminium-demand-in-automotive-industry-a-736213/>>. 24.07.2019. Luettu 29.10.2019.

50. Seidensticker, Mike. 2018. Aluminium 2018 Presents Solutions for Lightweight Automotive Construction. Verkkoaineisto. SpotlightMetal. <<https://www.spotlightmetal.com/aluminium-2018-presents-solutions-for-lightweight-automotive-construction-a-739613/>>. 6.8.2018. Luettu 29.10.2019.
51. Djukanovic, Goran. 2019. Aluminium Alloys in the Automotive Industry: a Handy Guide. Verkkoaineisto. Aluminium Insider. <<https://aluminiuminsider.com/aluminium-alloys-automotive-industry-handly-guide/>>. 28.2.2019. Luettu 3.11.2019.
52. Li, Qiang; Xue, Sichuang; Wang, Jian; Shao, Shuai; Kwong, Anthony H.; Giwa, Adenike; Fan, Zhe; Liu, Yue; Qi, Zhimin; Ding, Jie; Wang, Han; Greer, Julia R.; Wang, Houfeng & Zhang, Xinghang. 2018. High-Strength Nanotwinned Al Alloys with 9R Phase. Verkkoaineisto. Research gate. <[https://www.researchgate.net/publication/322648854\\_High-Strength\\_Nanotwinned\\_Al\\_Alloys\\_with\\_9R\\_Phase](https://www.researchgate.net/publication/322648854_High-Strength_Nanotwinned_Al_Alloys_with_9R_Phase)>. 1.2018. Luettu 16.11.2019.
53. Researchers develop high-strength nanotwinned aluminum alloy. 2018. Verkkoaineisto. Green Car Congress. <<https://www.greencarcongress.com/2018/01/20180126-nt.html>>. 26.1.2018. Luettu 16.11.2019.
54. Docol the automotive steel – Kestävän kehityksen mukaisin ratkaisu. Verkkoaineisto. Docol. <<https://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/docol>>. Luettu 11.11.2019.
55. Schliephake, Ulf. 2019. Verkkoaineisto. SpotlightMetal. <<https://www.spotlightmetal.com/lighter-than-aluminum-harder-than-steel-a-825726/>>. 22.5.2019. Luettu 20.11.2019.
56. Austempered Ductile Iron. 2019. Verkkoaineisto. Total Materia. <<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=243>>. 02.2009. Luettu 24.11.2019.
57. All-new Volvo XC90: two world-firsts, one of the safest cars in the world. 2014. Verkkoaineisto. Volvo Cars. <<https://www.media.volvocars.com/global/en>>

gb/media/pressreleases/148123/all-new-volvo-xc90-two-world-firsts-one-of-the-safest-cars-in-the-world>. 22.7.2014. Luettu 24.11.2019.

58. Keeler, Stuart; Kimchi, Menachem & Mooney, Peter J.. 2017. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0. Verkkoaineisto. World Auto Steel.  
<[http://www.worldautosteel.org/download\\_files/AHSS%20Guidelines%20V6/00\\_AHSSGuidelines\\_V6\\_20170430.pdf](http://www.worldautosteel.org/download_files/AHSS%20Guidelines%20V6/00_AHSSGuidelines_V6_20170430.pdf)>. 2017. Luettu 23.11.2019.
59. Kim, Sang-Heon; Kim, Hansoo & Kim, Nack J. 2015. Brittle intermetallic compound makes ultrastrong low-density steel with large ductility. Verkkoaineisto. Nature, 518, s. 77–79.  
<[https://www.researchgate.net/publication/272081850\\_Brittle\\_intermetallic\\_compound\\_makes\\_ultrastrong\\_low-density\\_steel\\_with\\_large\\_ductility](https://www.researchgate.net/publication/272081850_Brittle_intermetallic_compound_makes_ultrastrong_low-density_steel_with_large_ductility)>. 05.02.2015. Luettu 31.10.2019.
60. Korean researchers discover 'super steel'. 2015. Verkkoaineisto. Building design + Construction. <<https://www.bdcnetwork.com/korean-researchers-discover-super-steel>>. 10.2.2015. Luettu 31.10.2019.
61. Performance automotive engineering. Verkkoaineisto. CGR Automotive. <<https://www.cgrautomotive.co.uk/>>. Luettu 19.11.2019.
62. Peacock, David. 2001. Titanium for Automotive Applications. Verkkoaineisto. AZO Materials. <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=553>>. 20.6.2019. Luettu 14.11.2019.
63. Titaani. Verkkoaineisto. Savonia-ammattikorkeakoulu.  
<<http://alvo.savonia.fi/tietopankki/materiaalit/metallit/12-titaani>>. Luettu 22.11.2019.
64. Lukkari, Juha. 2001. Alumiinit ja niiden hitsaus. Tampere: Metalliteollisuuden kustannus Oy.
65. Protecting magnesium alloys from corrosion. 2007. Verkkoaineisto. The fabricator.

- <<https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/metalsmaterials/protecting-magnesium-alloys-from-corrosion>>. 6.11.2007. Luettu 16.11.2019.
66. Kardys, Gary. 2017. Magnesium Car Parts: A Far Reach for Manufacturers? Part 1. Verkkoaineisto. Engineering360. <<https://insights.globalspec.com/article/7243/magnesium-car-parts-a-far-reach-for-manufacturers-part-1>>. 25.11.2017. Luettu 16.11.2019.
67. Villafuerte, Julio & Zheng, Wenyue. 2007. Protecting magnesium alloys from corrosion. Verkkoaineisto. The Fabricator. <<https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/metalsmaterials/protecting-magnesium-alloys-from-corrosion>>. 6.11.2007. Luettu 16.10.2019.
68. Kumar, D. Sameer; Sasanka, C. Tara; Ravindra, K. & Suman, K. N. S. 2015. Magnesium and Its Alloys in Automotive Applications – A Review. Verkkoaineisto. Research gate. <[https://www.researchgate.net/publication/272488098\\_Magnesium\\_and\\_Its\\_Alloys\\_in\\_Automotive\\_Applications\\_-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/272488098_Magnesium_and_Its_Alloys_in_Automotive_Applications_-_A_Review)>. 31.1.2015. Luettu 17.11.2019.
69. Pappas, Stephanie. 2014. Facts About Magnesium. Verkkoaineisto. LiveScience. <<https://www.livescience.com/28862-magnesium.html>>. 17.12.2014. Luettu 17.11.2019.
70. Automotive Uses of Magnesium Alloys: Part One. 2010. Verkkoaineisto. Total Materia. <<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=246>>. 7.2010. Luettu 17.11.2019.
71. Magnesium Vision 2020: A North American Automotive Strategic Vision For Magnesium. 2006. Verkkoaineisto. USAMP. <[https://www.tms.org/Communities/FTAttachments/MG\\_2020\\_-\\_Released\\_11\\_1\\_%5b1%5d.1.06.pdf](https://www.tms.org/Communities/FTAttachments/MG_2020_-_Released_11_1_%5b1%5d.1.06.pdf)>. 11.1.2006. Luettu 11.11.2019.
72. International Magnesium Association. Verkkoaineisto. IMA. <<https://www.intlmag.org/>>. Luettu 17.11.2019.



73. Lowering of CO<sub>2</sub> Emission for Magnesium Production by Gossan-Zuliani Process. 2012. Verkkoaineisto. Process Research ORTECH Inc. <<http://www.gossan.ca/projects/pdf/MgGHGReport.pdf>>. 20.4.2012. Luettu 17.11.2019.
74. What is the Difference Between Inconel and Incoloy?. 2015. Verkkoaineisto. Continental Steel & Tube Company. <<https://continentalsteel.com/blog/what-is-the-difference-between-inconel-and-incoloy/>>. 14.5.2015. Luettu 19.11.2019.
75. Superseokset. Verkkoaineisto. ALGOL. <<https://www.algoltechnics.fi/muut-tuoteryhmat/metallit/?p=superseokset>>. Luettu 7.11.2019.
76. The applications of the INCONEL, INCOLOY alloys for automotive industries. 2017. Verkkoaineisto. Corrotherm. <<https://www.corrotherm.co.uk/blog/the-applications-of-the-inconel-incoloy-alloys-for-automotive-industries>>. 25.01.2017. Luettu 19.11.2019.
77. Inconel alloy 718. Verkkoaineisto. Special Metals. <[https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel\\_alloy\\_718.pdf](https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/inconel_alloy_718.pdf)>. 7.9.2007. Luettu 14.11.2019.
78. De Lille, Didier. 2017. The use of different materials in exhausts. Verkkoaineisto. Goodfabs. <<https://www.goodfabs.com/single-post/use-of-materials-in-exhausts>>. 13.2.2017. Luettu 16.11.2019.
79. Weiss, Charlotte. 2019. Introducing 3D Printed Inconel 625. Verkkoaineisto. Markforged. <<https://markforged.com/blog/introducing-3d-printed-inconel/>>. 24.09.2019. Luettu 10.11.2019.
80. Gupta, Ajay. 2018. Forging Process Innovations: High Entropy Alloy (HEA) Tooling. Verkkoaineisto. Medium. <<https://medium.com/@ajayg0833/forging-process-innovations-high-entropy-alloy-hea-tooling-302823917ae6>>. 28.06.2018. Luettu 21.11.2019.
81. Li, Junchen; Huang, Yongxian; Meng, Xiangchen & Xie, Yuming. 2019. A Review on High Entropy Alloys Coatings: Fabrication Processes and Property Assessment. Verkkoaineisto. Research gate.

- <[https://www.researchgate.net/publication/333706579\\_A\\_Review\\_on\\_High\\_Entropy\\_Alloys\\_Coatings\\_Fabrication\\_Processes\\_and\\_Property\\_Assessment](https://www.researchgate.net/publication/333706579_A_Review_on_High_Entropy_Alloys_Coatings_Fabrication_Processes_and_Property_Assessment)>. 6.2019. Luettu 21.11.2019.
82. Laser engineered net shaping, LENS. Verkkoaineisto. Manufacturing Guide. <<https://www.manufacturingguide.com/en/laser-engineered-net-shaping-lens-0>>. Luettu 23.11.2019.
83. Cantor, Brian. 2014. Multicomponent and High Entropy Alloys. Verkkoaineisto. Research gate. <[https://www.researchgate.net/publication/277675569\\_Multicomponent\\_and\\_High\\_Entropy\\_Alloys](https://www.researchgate.net/publication/277675569_Multicomponent_and_High_Entropy_Alloys)>. 26.8.2014. Luettu 23.11.2019.
84. Guo, Jing; Tang, Cong; Rothwell, Glynn; Li, Lisa; Wang, Yun-Che; Yang, Qingxiang & Ren, Xuejun. 2019. Welding of High Entropy Alloys – A Review. Verkkoaineisto. MDPI. <<https://www.mdpi.com/1099-4300/21/4/431/htm>>. 24.4.2019. Luettu 22.11.2019.
85. Chen, Shuying; Tong, Yang & Liaw, Peter K. 2018. Additive Manufacturing of High-Entropy Alloys: A Review. Verkkoaineisto. MDPI. <<https://www.mdpi.com/1099-4300/20/12/937/htm>>. 6.12.2018. Luettu 23.11.2019.
86. The World of Automotive Plastics. Verkkoaineisto. Automotive Plastics. <<https://www.automotiveplastics.com/>>. Luettu 7.11.2019.
87. 4 Types Of Plastic Used In Cars And Car Parts. Verkkoaineisto. A&C Plastics Inc.. <<https://www.acplasticsinc.com/informationcenter/r/plastic-used-in-cars>>. Luettu 20.11.2019.
88. Maccarrone, Simona. 2018. Four Reasons Why Plastic Is Used in Car Manufacturing. Verkkoaineisto. Matmatch. <<https://matmatch.com/blog/four-reasons-why-plastic-is-used-in-car-manufacturing/>>. 16.2.2018. Luettu 21.11.2019.
89. Szeteiová, Katarina. 2010. Automotive Materials Plastics in Automotive Markets Today. Verkkoaineisto. Semantic Scholar.

- <<https://pdfs.semanticscholar.org/e2d3/16ca62ec296bfc66ef3f2f5a4daf974bd65c.pdf>>. 2010. Luettu 21.11.2019.
90. Polyetherimide (PEI): A Comprehensive Review. 2010. Verkkoaineisto. Omnexus. <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetherimide-pei-high-heat-plastic>>. 2010. Luettu 26.11.2019.
91. Polyether Imide (PEI) Plastic. Verkkoaineisto. Prospector. <<https://plastics.ulprospector.com/generics/28/polyether-imide-pei>>. Luettu 26.11.2019.
92. ULTEM RESIN. Verkkoaineisto. Sabic. <<https://www.sabic.com/en/products/specialties/ultem-resins/ultem-resin>>. Luettu 1.11.2019.
93. UHMW Polymer Tape suits automotive applications. 2005. Verkkoaineisto. Thomas. <<https://news.thomasnet.com/fullstory/uhmw-polymer-tape-suits-automotive-applications-465817>>. 1.8.2005. Luettu 21.11.2019.
94. Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE). 2018. Verkkoaineisto. Braskem. <<http://www.utec.com.br/portal/principal/arquivos/UTEC%20Brochure%202018.pdf>>. 2018. Luettu 21.11.2019.
95. 3M UHMW-Polyeteenikalvoteippi 5423. Verkkoaineisto. 3M. <[https://www.3msuomi.fi/3M/fi\\_FI/company-ndc/all-3m-products/~/3M-UHMW-Polyeteenikalvoteippi-5423/?N=5002385+8709313+8709324+8710676+8710815+8711017+8713614+3293242548&rt=rud](https://www.3msuomi.fi/3M/fi_FI/company-ndc/all-3m-products/~/3M-UHMW-Polyeteenikalvoteippi-5423/?N=5002385+8709313+8709324+8710676+8710815+8711017+8713614+3293242548&rt=rud)>. Luettu 21.11.2019.
96. 3M 5425 UHMW-Polyeteeniteippi. Verkkoaineisto. Lamtekno. <<https://www.lamtekno.fi/p9793-3m-5425-uhmw-polyeteeniteippi-25-mm-x-33-m-9-pakkaus-fi.html>>. Luettu 21.11.2019.
97. What are the applications of UHMWPE in automobile sector? 2015. Verkkoaineisto. Research gate.

- <[https://www.researchgate.net/post/What\\_are\\_the\\_applications\\_of\\_UHMWPE\\_in\\_automobile\\_sector](https://www.researchgate.net/post/What_are_the_applications_of_UHMWPE_in_automobile_sector)>. 30.7.2015. Luettu 21.11.2019.
98. Polymer Matriz Materials: Advanced Composites. Verkkoaineisto. OSHA. <[https://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm\\_iii/otm\\_iii\\_1.html](https://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_iii/otm_iii_1.html)>. Luettu 11.11.2019.
99. Vuorinen, Jyrki; Mustakangas, Mika & Annala, Minna. Komposiitit. Verkkoaineisto. Patria. <[https://www.patria.fi/sites/default/files/attachments/komposiitit\\_-\\_loputtomasti\\_mahdollisuuksia-\\_mobile.pdf](https://www.patria.fi/sites/default/files/attachments/komposiitit_-_loputtomasti_mahdollisuuksia-_mobile.pdf)>. Luettu 23.11.2019.
100. Malnati, Peggy. 2018. Hybrid composite struts reduce vehicle weight, improve handling. Verkkoaineisto. CompositesWorld. <<https://www.compositesworld.com/articles/hybrid-composite-struts-reduce-vehicle-weight-improve-handling>>. 29.1.2018. Luettu 29.10.2019.
101. Innovation. Verkkoaineisto. McLaren. <<https://cars.mclaren.com/gb-en/ultimate-series/mclaren-senna/innovation>>. Luettu 15.11.2019.
102. Gardiner, Ginger. 2017. JEC 2017 – Aiming for Industrialization. Verkkoaineisto. CompositesWorld. <<https://www.compositesworld.com/blog/post/jec-2017-aiming-for-industrialization>>. 24.3.2017. Luettu 25.11.2019.
103. Gardiner, Ginger. 2018. Sustainable, inline recycling of carbon fiber. Verkkoaineisto. CompositesWorld. <<https://www.compositesworld.com/blog/post/sustainable-inline-recycling-of-carbon-fiber>>. 24.09.2018. Luettu 11.11.2019.
104. Carbotanium. The Zonda R's heritage. 2015. Verkkoaineisto. CarThrottle. <<https://www.carthrottle.com/post/w37drl2/>>. 2015. Luettu 29.10.2019.
105. Kingston, William R.. 1993. Carbon-titanium composites. Verkkoaineisto. Google Patents. <<https://patents.google.com/patent/US5733390>>. 18.8.1993. Luettu 29.10.2019.

106. Timetal 15-3. Verkkoaineisto. TIMET.  
<<https://www.timet.com/assets/local/documents/datasheets/metastablebetaalloys/15-3.pdf>>. Luettu 24.11.2019.
107. Biohajoavat muovit. Verkkoaineisto. Muovien kierrätys.  
<<https://muovienkierratys.wordpress.com/biohajoavat-muovit/>>. Luettu 31.10.2019.
108. Lamminen, Katja. 2018. VTT:n tutkija: Biohajoava muovi sopii kompostointiin ja osin kierrätykseenkin. Verkkoaineisto. Maaseudun tulevaisuus.  
<<https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/ymparisto/artikkeli-1.228025>>. 15.03.2018. Luettu 31.10.2019.
109. 3D PRINTING with CARBON FIBERS – ColorFabb XT-CF20 REVIEW. 2018. Verkkoaineisto. CNC Kitchen/Youtube.  
<<https://www.youtube.com/watch?v=LTmuwfyYUJQ>>. 01.07.2018. Katsottu 31.10.2019.
110. Gardiner, Ginger. 2019. Automated joining of hybrid metal-thermoplastic composite structures. Verkkoaineisto. CompositesWorld.  
<<https://www.compositesworld.com/blog/post/automated-joining-of-hybrid-metal-thermoplastic-composite-structures>>. 24.9.2019. Luettu 11.11.2019.
111. Luonnonkuitukomposiitti. Verkkoaineisto. Luonnonkuitu.fi.  
<<http://www.luonnonkuitu.fi/tietoja.html>>. Luettu 14.11.2019.
112. Fogorasi, MS & Bardu, I. 2017. The potential of natural fibres for automotive sector review. Verkkoaineisto. IOP.  
<<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/252/1/012044/pdf>>. 2017. Luettu 20.11.2019.
113. UPM Biocomposites. Verkkoaineisto. UPM.  
<<https://www.upm.com/fi/liiketoiminnot/upm-biocomposites/>>. Luettu 29.10.2019.
114. Halvorson, Bengt. 2018. Fiber Supplement: In Depth with the First Ever Carbon-Fiber Pickup Bed. Verkkoaineisto. CAR and DRIVER.

- <<https://www.caranddriver.com/news/a20745955/fiber-supplement-in-depth-with-the-first-ever-carbon-fiber-pickup-bed/>>. 18.5.2018. Luettu 16.11.2019.
115. Harris, Mark. 2017. Carbon fibre: the wonder material with a dirty secret. Verkkoaineisto. The Guardian. <<https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/mar/22/carbon-fibre-wonder-material-dirty-secret>>. 22.3.2017. Luettu 11.11.2019.
116. Job, Stella. 2013. Recycling glass fibre reinforced composites – history and progress (Part 1). Verkkoaineisto. Materialstoday. <<https://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/recycling-glass-fibre-reinforced-composites/>>. 3.9.2013. Luettu 11.11.2019.
117. Hilding, Tina. 2018. Researchers use recycled carbon fiber to improve permeable pavement. Verkkoaineisto. WSU Insider. <<https://news.wsu.edu/2018/03/01/carbon-fiber-improves-permeable-pavement/>>. 1.3.2018. Luettu 11.11.2019.
118. Glass fibre recycling – reinforced thermoplastics. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <[http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE07\\_ENV\\_E\\_000802\\_LAYMAN.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE07_ENV_E_000802_LAYMAN.pdf)>. Luettu 11.11.2019.
119. Breakthrough: Recycling of fibreglass is now a reality. 2010. Verkkoaineisto. Fiberline. <<https://fiberline.com/news/miljoe/breakthrough-recycling-fibreglass-now-reality>>. 14.9.2010. Luettu 11.11.2019.
120. Jahromi, Saeed Ghaffarpour; Khodaii, Ali. 2008. Carbon fiber reinforced asphalt concrete. Verkkoaineisto. Research gate. <[https://www.researchgate.net/publication/281313506\\_Carbon\\_fiber\\_reinforced\\_asphalt\\_concrete](https://www.researchgate.net/publication/281313506_Carbon_fiber_reinforced_asphalt_concrete)>. 10.2008. Luettu 11.11.2019.
121. Zurschmeide, Jeff. 2019. How GMC built a carbon-fiber truck bed that laughs at cinder blocks. Verkkoaineisto. Digital Trends. <<https://www.digitaltrends.com/cars/gmc-carbon-fiber-pickup-bed/>>. 10.5.2019. Luettu 16.11.2019.

122. Technology Roadmaps: Intelligent Mobility Technology, Materials and Manufacturing Processes, and Light Duty Vehicle Propulsion. 2017. Verkkoaineisto. CAR Group. <[http://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2017/07/Technology\\_Roadmaps.pdf](http://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2017/07/Technology_Roadmaps.pdf)>. 2017. Luettu 17.11.2019.