

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Lucia Kefurt

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Lucia Kefurt

KOMPOZITNI MATERIJALI IZ NANOCIJEVI I METALNE MATRICE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: Izv. prof. dr. sc. Ivan Brnardić

Članovi ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Tamara Holjevac Grgurić – predsjednica

Izv. prof. dr. sc. Ivan Brnardić – član

Izv. prof. dr. sc. Stjepan Kožuh – član

Izv. prof. dr. sc. Natalija Dolić – zamjenski član

Sisak, rujan 2017.

*Zahvalila bih se svim profesorima Metalurškog Fakulteta bez čijega uloženog truda ne bismo bili danas gdje jesmo, a posebice mentoru na ukazanom povjerenju i pomoći tijekom cijeloga studiranja te nastojanju da nam pokaže kako stvari funkcioniraju van suhoparne teorije, te kakav nas život očekuje kao inženjere.*

*Također bih se zahvalila i svojoj obitelji koja je sve ovo vrijeme vjerovala u mene i nije mi dala da posustanem.*

## SAŽETAK

Ugljične nanocijevi su izuzetan materijal zbog svoje čvrstoće i veoma male težine te se zbog toga koriste za dobivanje kompozita sa metalnom matricom pri čemu uvelike poboljšavaju svojstva nastalog materijala u odnosu na svojstva matrice. Metalu dodane ugljične nanocijevi mu poboljšavaju mehanička svojstva, a da pri tome ne utječe na težinu materijala. Iako su cijevi poznate čovječanstvu već duže vremena još uvijek se razvijaju tehnologije kojima bi se moglo lakše i kvalitetnije pripremiti novi kompozitni materijal na nanoskali.

U ovom radu dan je osvrt na ugljične nanocijevi, nanotehnologiju, kompozitne materijale i njihovu pripremu te na kompozitne materijale s metalnom matricom ojačane ugljičnim nanocijevima. Prikazane su prednosti kompozitnih materijala s metalnom matricom i ugljičnim nanocijevima te što možemo u budućnosti očekivati od ovog materijala.

Ključne riječi: ugljične nanocijevi, kompozitni materijali s metalnom matricom, nanotehnologija

# **COMPOSITE MATERIALS BASED ON NANOTUBES AND METAL MATRIX**

## **ABSTRACT**

Carbon nanotubes are exceptional material due to their strength and very low weight and therefore can be used in preparation of a metal matrix composite, which greatly improves the properties of the material produced in relation to the matrix properties. The carbon nanotube added to the metal improve mechanical properies without affecting the weight of the material. Although nanotubes are known to mankind for a long time, technologies are still being developed to manage the preparation of new nanoscale composite materials.

This paper gives an overview of carbon nanotubes, nanotechnology, composite materials and their preparation, and on composite materials with metal matrices reinforced with carbon nanotubes. The advantages of composite materials with metal matrices and carbon nanotubes are shown and expectations for those materials in the future are given.

Key words: carbon nanotubes, composite metal matrix materials, nanotechnology

# SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Nanotehnologija i nanočestice	2
2.1. Povijest nanotehnologije	5
2.2. Nanomaterijali	5
2.2.1. Proizvodnja nanomaterijala	6
2.2.2. Nanočestice	7
2.2.3. Nanocijevi	8
2.3. Primjena nanotehnologije	10
2.4. Utjecaj nanotehnologije na okoliš i zdravlje ljudi	11
2.4.1. Utjecaj nanočestica na okoliš i zdravlje živih organizama	11
3. Metalni kompoziti	14
3.1. Postupci proizvodnje	15
3.1.1. Postupci u čvrstom stanju	15
3.1.2. Postupci u tekućem stanju	16
3.2. Podjela kompozita s metalnom matricom	17
3.2.1. Kompoziti s aluminijevom matricom	17
3.2.2. Kompoziti s magnezijevom matricom	19
3.2.3. Kompoziti s titanovom matricom	19
3.2.4. Kompoziti s bakrovom matricom	19
3.2.5. Kompoziti s matricom superlegura	20
4. Ugljične nanocijevi u metalnoj matrici	21
4.1. Tehnike proizvodnje	21
4.1.1. Metalurgija praha	21
4.1.2. Taljenje i skrućivanje	22
4.1.3. Termalno raspršivanje	23
4.1.4. Elektrokemijske depozicije	23
4.1.5. Ostale tehnike	24
4.2. Svojstva kompozita s metalnom matricom ojačanih ugljičnim nanocijevima	24
4.3. Primjena MMC-CNT-a	24
4.4. Dosadašnja istraživanja MMC-CNT-a	24
5. Zaključak	27
6. Literatura	28

## 1. Uvod

Razvojem tehnologije razvija se i sama čovjekova znatiželja za novim otkrićima i tehnološkim poboljšanjima te potreba za održavanjem i poboljšanjem životnog standarda. Kako ne postoji fragment čovjekova života u kojega nije upletena metalurgija kao znanost, odnosno tehnologija proizvodnje metalnih legura koje su kao proizvodi prisutni u svim poljima svakodnevnice, tako je i na tom području došlo do zanimanja za mogućim poboljšanjima metalnih materijala koji bi ispunjavali kvalitetu i potrebu svakodnevnice.

Da bi se razumjelo kako su metalni materijali poboljšani, tj. kako su njihova svojstva poboljšana potrebno je razumjeti pojmove kao što su: nanotehnologija, nanočestice, nanocijevi, kompozitni materijali i kompozitni materijali s metalnom matricom.

Nanotehnologija je skup disciplina koje se bave istraživanjem, razvojem i primjenom struktura, uređaja i sustava koje su reda veličina do 100 nanometara, a zbog svojih malih dimenzija imaju izuzetna svojstva za kojima se pokazala potreba na područjima elektronike, medicine, znanosti o materijalima te u kemijskim katalizama. [1]

Nanočestica je čestica veličine od 1 do 100 nanometara, a često se navodi kao mali objekt koji predstavlja cjelinu obzirom na način prijenosa i karakteristike te se u podijeli čestica svrstava u ekstremno fine čestice. [2]

Nanocijevi predstavljaju 1D (jednosmjernu) strukturu nanomaterijala, prema dimenzijskoj podjeli, a izgrađene su od nanočestica formiranih u obliku cijevi. [3]

Kompozitni materijali se definiraju kao kombinacija dvaju ili više kemijski različitih materijala s jasnim graničnim spojem između komponenti te boljim svojstvima od samih komponenti. [4]

Kod kompozitnih materijala s metalnom matricom kontinuirana, tj. matična faza je uglavnom legura, a rjeđe čisti metal, dok se za ojačala, tj. punila koriste neki drugi materijali od kojih će u ovom radu biti objašnjeni visokovrijedni ugljični dodatci, tj. ugljične nanocijevi. [5]

U ovom radu dan je osvrt na ugljične nanocijevi i metalne kompozite te kako zajedno čine kompozite iznimnih svojstava. Ukratko su opisani postupci proizvodnje metalnih kompozita ojačanih ugljičnim nanocijevima te način na koji iskazuju bolje performanse za razliku od neojačanih kompozita, odnosno legura.

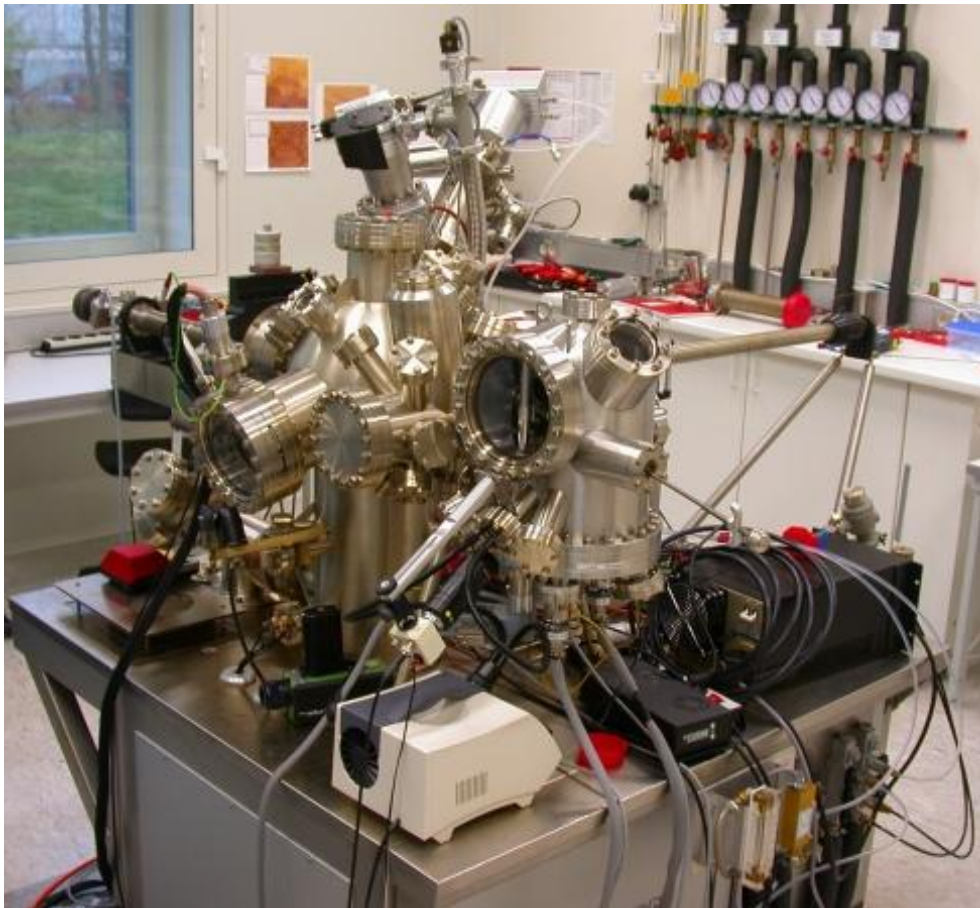
## 2. Nanotehnologija i nanočestice

Nanotehnologija se danas smatra modernom znanosti, no ona ima svoju dugogodišnju povijest a zbog razvoja tehnologije koja prati standard i način čovjekova života u današnje vrijeme se primjenjuje u brojnim područjima.

Naziv nanotehnologija dolazi od grčkih riječi *nanos*, koja znači patuljak, tj. nešto sitno, od riječi *tehnos* koja označava vještinu te *logos* koja znači znanost.

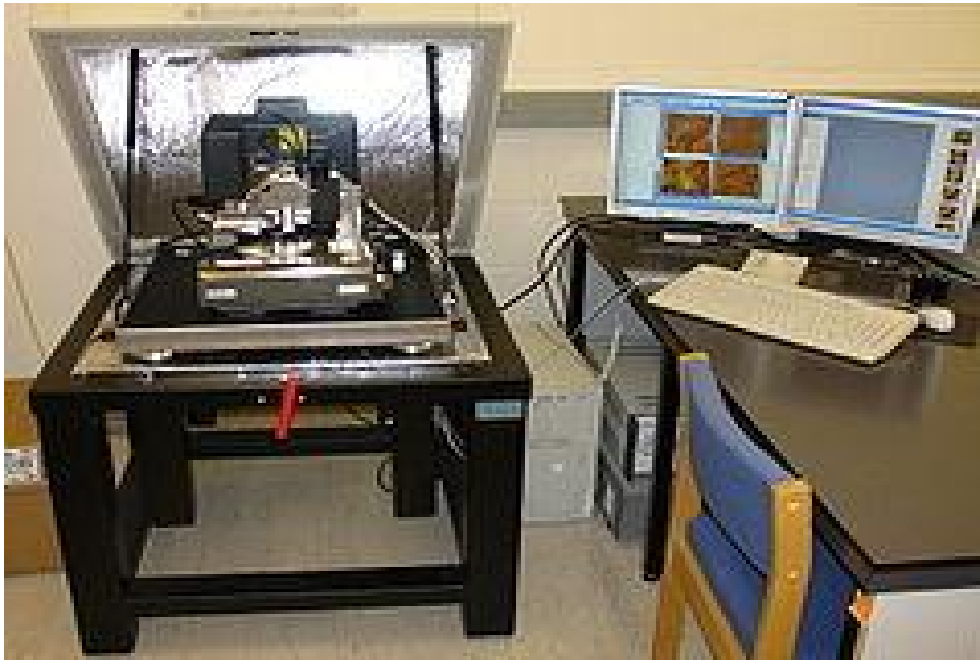
Nanotehnologija je kao veoma sofisticirana tehnologija zaživjela tek u skorije vrijeme iz razloga što sama tehnologija kojom bi bilo moguće istraživanje, razvoj i uporaba na nanometarskoj skali nije bila dovoljno razvijena. [6]

Istraživanje nanočestica i izrada nanostrukture omogućena je pojavom elektronskog mikroskopa te skenirajućeg tunelnog mikroskopa STM (eng. *scanning tunneling microscope*) i mikroskopa atomskih sila AFM (eng. *atomic force microscope*), prikazanih slikama 1 i 2, koji su ujedno i glavni instrumenti korišteni u nanotehnologiji.



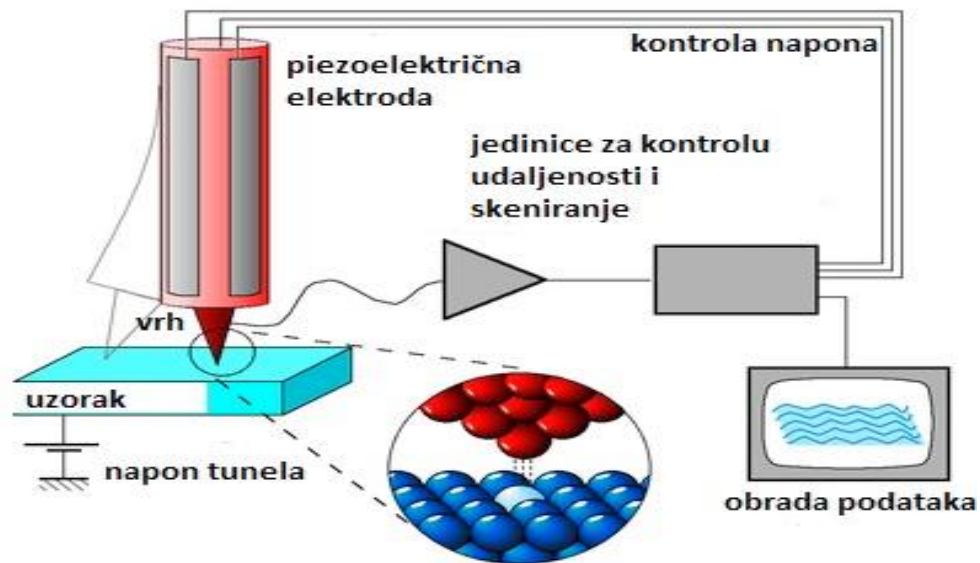
Slika 1. STM mikroskop [7]



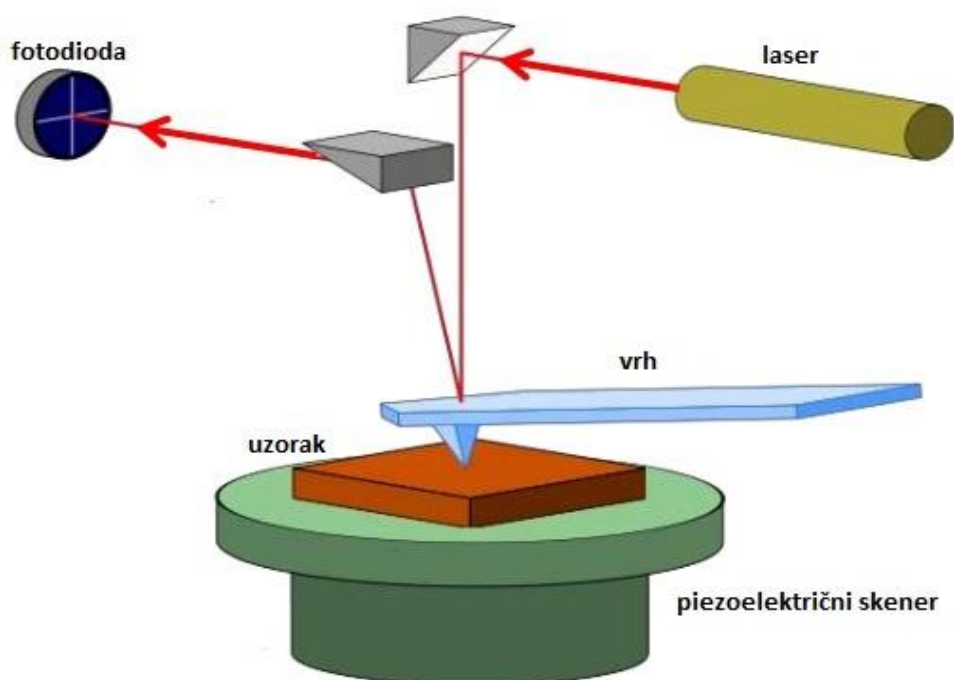


Slika 2. AFM mikroskop [8]

STM mikroskop uporabom električne struje daje sliku rasporeda atoma na kristalnoj površini u realnom prostoru, tj. mjeri struju vodljivih materijala i njihovih površina, dok AFM mikroskop mjeri silu koja djeluje između vrha mikroskopa i materijala, na taj način da vrh mehanički dodiruje uzorak materijala, tj. grebe po njemu pri čemu se i troši. Tako daje profil udubljenja i ispupčenja površine te se može koristiti za materijale koji nisu nužno vodljivi. Sile koje su bitne prilikom uporabe AFM-a su jaka odbojna sila na malim udaljenostima koja se pojavljuje kao rezultat preklopa elektronskih gustoća vrha mikroskopa i uzorka te Van der Waalsovih sila. Sila koja djeluje između vrha i uzorka je proporcionalna pomaku grede na kojoj se nalazi vrh, a njeni pomaci se mjere optički (koristeći laser, interferometrijom) ili električki (piezoelektričnim metodama). Promjene mjerene sile se snimaju te se koriste za rekonstrukciju slike površine. AFM mikroskopom se fizički raspoređuju čestice po površini, na taj način da se šiljkom mikroskopa pomiču i slažu u cjelinu. [9,10] Principi rada oba mikroskopa su prikazani slikama 3 i 4.



Slika 3. Shematski prikaz rada STM mikroskopa [11]



Slika 4. Shematski prikaz rada AFM mikroskopa [12]

Nanotehnologija svoju primjenu nalazi u energetici, medicini, autoindustriji, prehrambenoj industriji, tekstilnoj, vojnoj i farmaceutskoj industriji, građevini, informatičkoj

tehnologiji, očuvanju i zaštiti okoliša te u raznim potrošačkim proizvodima na području optike, poljoprivrede i kozmetike.

Brojne prednosti, kao što su preciznost, učinkovitost, smanjenje količine otpada, proizvodnje materijala sa posebnom namjenom, proizvodnje novih, jačih, lakših i jeftinijih materijala, povećanje nutricionističke vrijednosti hrane, usporavanje starenja, efikasnog liječenja, pročišćavanja vode i zraka i dr., su razlog zbog kojega je nanotehnologija postala područje intenzivnog istraživanja. Premda je sama veličina nanočestica navedena kao najveća prednost i odlika ove tehnologije, ona je ujedno i njezina najveća mana. [13]

## 2.1. Povijest nanotehnologije

Potreba te sama ideja za uporabom nanotehnologije pojavljuje se 1959. godine raspravom koju je potaknuo Richard P. Feynman na sastanku Američkog fizikalnog društva u kojoj govori o problemima manipuliranja i kontroliranja na maloj skali veličina na primjeru zapisivanja i čitanja podataka na što manjim površinama, a začetnikom ove moderne tehnologije se smatra Eric K. Drexler koji je predstavljanjem svojih hipoteza omogućio prikupljanje financijskih resursa za razvoj molekularne nanotehnologije. [14]

Pojava STM-a, koji je napravljen 1981. g. kao ključna naprava za istraživanje i razvoj nove tehnologije, je označila veliku prekretnicu u tehnološkom razvoju, tj. omogućila je realizaciju dotadašnjih ideja. Nedugo nakon pojave STM-a otkriven je i AFM mikroskop. [10]

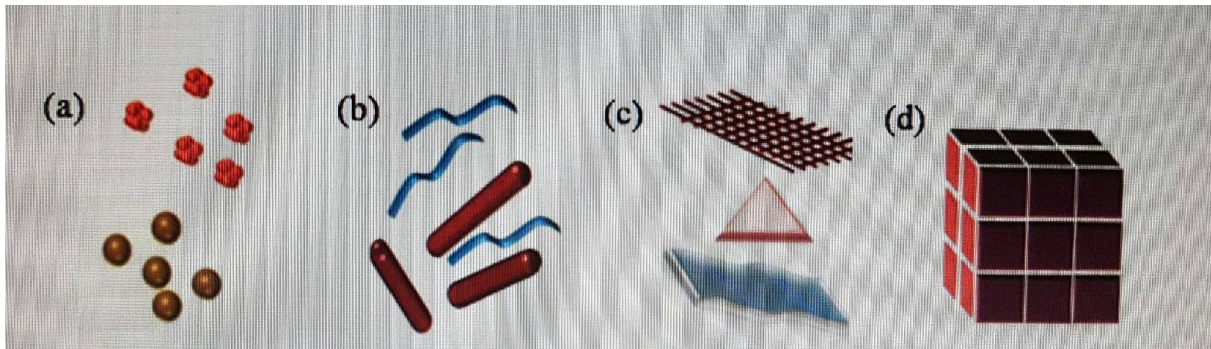
Iako je izraz nanotehnologija uveden već 1974. u Japanu te se koristio za sve procese u kojima se pojavljuju objekti manji od 1 mikrometra, tek se 1997 u Texasu formira prva kompanija, Zyvex, kojoj je glavni cilj razvoj uređaja koji omogućavaju gradnju pojedinim atomima. [15]

## 2.2. Nanomaterijali

Nanomaterijali su materijali sastavljeni od kristalnih ili amorfnih nanočestica, a fizička i mehanička svojstva poput povećanja toplinskog kapaciteta i električne otpornosti te poboljšanja mehaničkih svojstava u odnosu na klasične materijale većih dimenzija su im znatno izraženija.

Prema Europskoj komisiji, koja 18. 6. 2011. definira nanomaterijale kao prirodni, slučajno dobiveni ili proizvedeni materijali koji sadrže čestice ili u vezanom stanju ili kao agregat ili aglomerat, kod kojih jedna ili više vanjskih dimenzija spada u red veličine do 100 nanometara. [16]

Nanomaterijali se dijele prema dimenziji i materijalu od kojega su građeni. Prema dimeziji se dijele na: 0D, 1D, 2D i 3D, tj. na strukture bez smjera (eng. *zero direction*), jednosmjerne strukture (eng. *one direction*), dvosmjerne strukture (eng. *two direction*) i strukture koje idu u tri smjera, odnosno imaju tri dimenzije (eng. *three direction*), kao što je prikazano slikom 5.



Slika 5. Prikaz nanomaterijala prema dimenziji: a) 0D b) 1D c) 2D i d) 3D [17]

0D strukture su nanočestice, nakupine nanočestica (klasteri), nanokristali i kvantne točke. Nanočestice se pojavljuju kao:

- mono i polikristalične,
- građene od jednog ili više kemijskih elemenata,
- različitih oblika poput kuglica i sfernih ljuskica,
- individualne čestice ili kao čestice ugrađene u matricu i
- metalne, keramičke ili polimerne.

1D strukture su nanocijevi, nanovlakna nanožice, polimerni lanci spirale i iglice.

2D strukture su nanoslojevi, nanofilmovi i nanopremazi. 2D nanomaterijali se pojavljuju kao:

- amorfni ili kristalični,
- građeni od jednog ili više kemijskih elemenata,
- jednoslojni ili višeslojni,
- deponirani na podlogu i
- metalni, keramički ili polimerni.

3D strukture su nanomaterijali koji sadržavaju nanočestice, nanožice, nanocijevi ili nanoslojeve. Prema sastavu nanomaterijali se dijele na:

- materijale građene od:
    - o ugljika: fulereni, nanodijamanti, ugljikove nanocijevi, nanokonusi, grafeni
    - o metala: nanočestice, strukture u kojima su zrnca (kristali) nanodimenzija, metalni oksidi
  - dendrimere: visoko razgranate strukture koje se primjenjuju u nanomedicini
  - kompozitne materijale: građene od više vrsta materijala od kojih je barem jedna nanometarskih dimenzija, a mogu biti metalni, keramički i polimerni.
- [17]

### 2.2.1. Proizvodnja nanomaterijala

Kako bi se proizveli nanomaterijali potrebno je raspolagati razvijenom tehnologijom, nanotehnologijom koja podrazumijeva kreiranje funkcionalnih materijala, uređaja i sustava kontroliranjem oblika i veličina na nanometarskoj razini, a može se podijeliti u tri skupine:

- nanomaterijale: jednokomponentni ili višekomponentni materijali kod kojih je barem jedna dimenzija komponente u rasponu između 0,1 i 100 nm. Toj

skupini pripadaju nanočestice, nanovlakna i nanocijevi, nanokompoziti i nanostrukturirane površine.

- nanoalate: alati i tehnike za sintezu nanomaterijala, manipuliranje atomima i proizvodnju struktura za uređaje te za mjerenja i karakterizaciju materijala i uređaja na nanoskali.
- nanouređaje: naprave na nanoskali važne u mikroelektronici i optoelektronici.

Postoje dvije metode proizvodnje nanomaterijala, a to su:

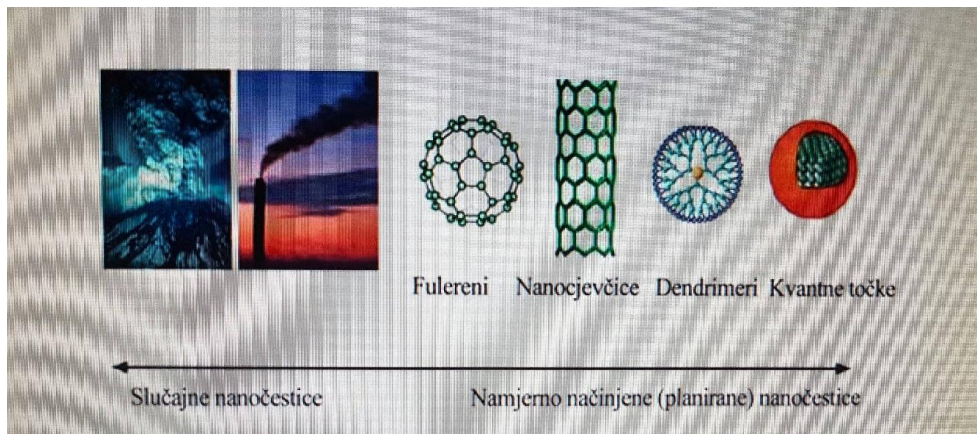
- „*top-down approach*“ koja se sastoji od lomljenja mikrostrukture u nanostrukturui u koju se ubrajaju metode:
  - o mehaničko mljevenje, tj. legiranje,
  - o intenzivnu plastičnu deformaciju masivnih uzoraka i
  - o litografiju.
- „*bottom up approach*“ gdje se nanomaterijala proizvode na način da se spajaju „atom po atom“ ili „sloj po sloj“, a tu se uvrštavaju metode:
  - o sol-gel metoda – kemijska metoda,
  - o depozicija pomoću pare - fizikalna metoda,
  - o kondenzacija u inertnom plinu,
  - o termičko isparavanje,
  - o naparavanje pomoću elektrona,
  - o raspršivanje,
  - o ablacija laserom,
  - o kemijska depozicija para i
  - o epitaksijalni rast. [17]

### 2.2.2. Nanočestice

Nanočestice su općenito „superfine“ čestice veličine od 1 nm do 100 nm, odnosno umanjene čestice nekog elementa koje su zadržale sva svojstva nekog elementa, ali i poprimile neka posebna, poboljšana svojstva. Njihovim dodatkom materijalima se poboljšavaju čvrstoća, tvrdoća te druga mehanička svojstva. Nadalje, velika primjena nanočestica javlja se zbog poboljšavanja magnetskih, optičkih i električnih svojstava materijala. Zbog velike površine i malog promjera, koji su ujedno i preduvjet za biološku aktivnost nanočestica, one su vrlo reaktivne i mogu pokazivati jedinstvenu bioraspodjelu određenu veličinom.

Prema podrijetlu, odnosno nastanku, nanočestice se mogu podijeliti u dvije skupine, čiji je prikaz dan slikom 6:

- Namjerno načinjene (tehničke, planirane, krojene) nanočestice i
- Slučajno načinjene (nenamjerno načinjene) nanočestice



Slika 6. Nanočestice podijeljene prema podrijetlu [18]

Sva svojstva koja čine nanočestice poželjnima i jedinstvenima, mogu biti i štetna te istovremeno izazivaju veliko zanimanje u industrijskoj i biomedicinskoj primjeni i zabrinutost glede sigurnosti.

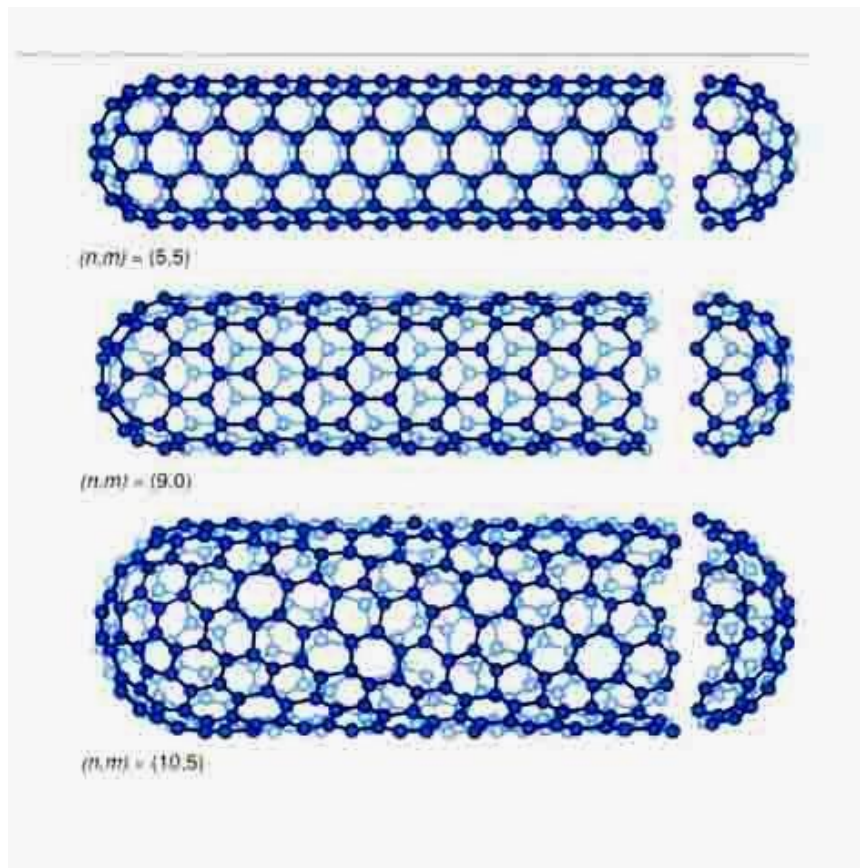
### 2.2.3. Nanocijevi

Nanocijevi CNT (eng. *carbon nanotubes*) su jednosmjerne strukture načinjene od materijala nanometarskih dimenzija, tj. od ugljikovih atoma, a njihovo postojanje dokazao je S. Iijima 1991. te su prepoznate kao obećavajući materijal u budućnosti. [19]

Strukturom su ugljične nanocijevi slične šupljoj žici, odnosno nalikuju strukturi fulerena koji je izrastao u duljinu. Osnovna rešetka im je fulerenska a ugrađivanjem ugljikovih atoma na aktivna mjesta formira se oblik cijevi. Ugljične nanocijevi se sastoje od dva ili više koaksijalna cilindra čiji su promjeri  $\geq 5,5$  nm za vanjski, odnosno oko 2,3 nm za unutarnji promjer, a broj ugljikovih atoma koji se nalaze u tom zaobljenom dijelu grafitnog sloja, koji se naziva grafenski sloj, se kreće do 100.

Ugljične nanocijevi mogu biti otvorene ili zatvorene (s jednog ili oba kraja), kao što je i prikazano slikom 7., te se prema simetriji i rasporedu šesterokuta u strukturi razlikuju tri modifikacije, a prati ih i svojstvo da mogu rasti u duljinu i širinu te se savijati i izvijati, poput serpentina, zbog svoje iznimne savitljivosti. [19]





Slika 7. Prikaz modifikacija ugljičnih nanocijevi [20]

Gornja struktura nanocijevi je vanjskog promjera 5,5 nm, ima visok stupanj simetrije, a poznata je pod nazivom „naslonjač“ (eng. *armchair*) iz razloga što raspored šesterokuta oko opsega se proteže linearno kao naslon za ruku na stolici. Srednja struktura nanocijevi sa slike je poznata pod nazivom „cik-cak“ (eng. *zig-zag*), zbog načina na kojeg su šesterokuti raspoređeni oko opsega a vanjskog je promjera 9,0 nm i također ima visok stupanj simetrije. Donja struktura se najčešće pojavljuje u praksi, promjer joj je 10,5 nm a naziva se kiralna nanocijev što znači da se pojavljuje u dva zrcalno simetrična oblika. [20]

Ugljične nanocijevi se dobivaju u električnom luku ili pirolizom ugljikovodika. U električnom se luku dobivaju sa grafitnim elektrodama u atmosferi helija na temperaturama višim od 3000°C pa se prema tome i nazivaju ACNT (eng. *arc formed carbon nanotubes*). Drugi način je dobivanje pirolizom ugljikovodika, uglavnom benzena, na 1100°C te obradom u struji argona na 3000°C, iz čega im i dolazi naziv PCNT (eng. *pirolitic carbon nanotubes*). Pirolizom dobivene nanocijevi je moguće dobiti i na aparaturi za dobivanje u pari rastućih ugljičnih vlakana VGCF (eng. *vapor-grown carbon fibers*) zbog toga što su kao spomenuta vlakna mikroskog pomjera s kružnim umreženjem i središnjim praznim prostorom promjera svega nekoliko nm. [19]

Pirolitički dobivene nanocijevi imaju vrlo tanke stjenke od samo nekoliko grafenskih slojeva, duljine oko 100 nm i vanjskog promjera 0,38 nm te su iznimno savitljive, odnosno prilikom njihova savijanja i izvijanja ne dolazi do pucanja kao kod drugih ugljičnih vlakana.

Nanocijevi uz svojstva iznimne savitljivosti prati i svojstvo vodljivosti električne energije, odlični su poluvodiči te su iznimno male težine. [19]

### 2.3. Primjena nanotehnologije

Iako čovječanstvo nije niti svjesno, nanotehnologija je implementirana u čovjekov svakodnevni život u gotovo svim područjima ljudskih aktivnosti i djelovanja. Veliku ulogu nanotehnologija odigrava u medicini gdje se koristi za rano dijagnosticiranje i liječenje bolesti, kao i nano-flasteri, koji ubrzavaju proces zacjeljivanja, te u alternativnoj medicini za proizvodnju nano-minerala, kao što su nano-srebro i nano-zlato, tj. prirodni antibiotici koji su u stanju savladati svaku infekciju.

Znanstvenici sa Sveučilišta u Stanfordu su pomoću nanotehnologije razvili novi način liječenja raka kojime se ne oštećuje zdravo tkivo. Pošto su nanocijevčice koje se koriste pri toj metodi u pola manje od molekule DNK, one se ugrađuju u stanice raka i podlože zagrijavanju laserom. Uslijed izloženosti infracrvenom dijelu spektra cijevi načinjene od ugljika nakon 2 minute dolazi do njihova zagrijavanja na temperaturu od 70°C prilikom čega stanice raka odumiru. [21]

Kanadski znanstvenici sa Sveučilišta Alberta smatraju kako bi rak pluća bio lako izlječiv kada bi se u inhalatore stavljale nanočestice koje bi uništavale kancerogene stanice, te da bi taj način liječenja bio znatno brži i efikasniji od postojećih metoda. [21]

Iako nanotehnologija ima veliki potencijal u zaštiti okoliša, komercijalno se još uvijek ne primjenjuje u dovoljnoj mjeri. Jedan od potencijala je za filter načinjenog od nanomaterijala koji služi za pročišćavanje vode za piće. Dokaže li se daljnjim istraživanjima da pri filtraciji vode nanofiltarima nema nikakvih negativnih efekata, pročišćavanje vode bi postala najmasovnija uporaba nanomaterijala u svijetu zbog velike potražnje za pitkom vodom. Nadalje, Južnoafrička Republika eksperimentalno provodi pročišćavanje zagađene vode nanofiltracijom kako bi dobili vodu dovoljne kvalitete da bi se smatrala pitkom.

U automobilskim industrijama se nanomaterijal cerij oksid koristi kao katalizator u ispušnim cijevima čime se uvelike smanjuje količina emisije dušikovih oksida u atmosferu. Također automobilske industrije rade na tome da nanomaterijali uskoro zamijene fosilna goriva, no kako je proizvodnja čvrstih gorivih ćelija sa nanomaterijalima ekonomski neisplativa, ta ideja nije još u potpunosti zaživjela.

Sljedeću veliku primjenu je nanotehnologija našla u polju elektronike, gdje se najviše koristi u proizvodnji mikroprocesora, te u proizvodnji proizvoda sa svojstvom zaštite materijala, kao različiti vodootporni nanopremazi i sredstva za čišćenje, bilo da se radi o automobilima ili kućanstvima.

Nadalje proizvodi u kojima se pučanstvo susreće sa nanomaterijalima su vodootporne jakne, presvlake za madrace, odjeća, štapovi za golf, sredstva za mršavljenje i proizvodi za njegu kože tijela.

Prema učinkovitosti nano-proizvodi su nenadmašivi, zbog svojih izuzetno malih veličina imaju izvanredna svojstva, u odnosu na „klasične“ materijale istog kemijskog sastava, te se stoga svi materijali od interesa primjenjuju u nanostrukturnom stanju, bio da se radi o metalima, legurama, spojevima poput oksida, karbida, nitrida, polimera, fulerena ili drugih kompozitnih materijala. [22]

Razvojem tehnologije razvija se i samo tržište nanotehnologije te je potražnja za nanoproduktima sve veća i u skoroj budućnosti će njezina primjena biti neizostavna u svakodnevnom životu čovječanstva.



## 2.4. Utjecaj nanotehnologije na okoliš i zdravlje ljudi

Razvojem nanotržišta i povećanjem potražnje za proizvodima dobivenima nanotehnologijom postavlja se sve više pitanja o tome kako ta nova i superiorna tehnologija utječe na okoliš. Iako se već pokazalo da bi korištenje nanomaterijala u zaštiti okoliša uvelike poboljšalo ne samo sadašnje stanje okoliša već bi se njegova zaštita podigla na veću razinu još uvijek postoje neodgovorena pitanja u svezi mogućih negativnih utjecaja nanočestica po okoliš i zdravlje ljudi te pribojavanje da su rizici korištenja ove tehnologije veliki.

### 2.4.1. Utjecaj nanočestica na okoliš i zdravlje živih organizama

Ljudi i okoliš su konstantno izloženi različitim nanočesticama, bilo da ih unosimo u organizam preko aditiva u hrani, tretiranjem biljne kulture pesticidima, a time i životinjske i ljudske populacije i okoliša ili direktnom inhalacijom u zagađenim područjima, no istraživanja još uvijek nisu pokazala da li postoji rizik od povećane koncentracije namjerno proizvedenih nanočestica, pa prema tome nisu ni doneseni zakonski propisi kojima bi se regulirao njihov utjecaj na okoliš.

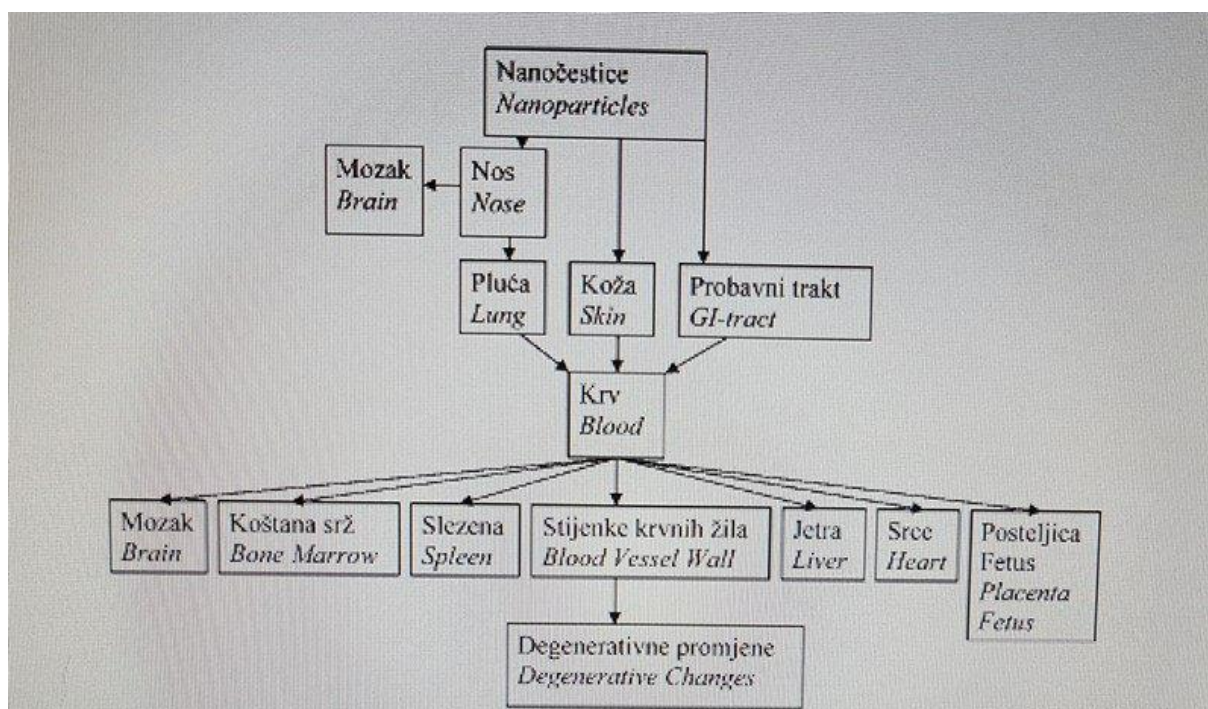
Pošto su nanočestice sitne čestice velike aktivne površine te poboljšanih svojstava kao što su topljivost i aglomeracija treba uzeti u obzir mogućnost njihova nakupljanja u organizmima.

Kod utjecaja nanočestica na okoliš i ljudsko zdravlje razmatraju se dvije vrste čestica; nanočestice uključene u materijal i slobodne nanočestice. Prema dosadašnjim saznanjima veći problem predstavljaju slobodne nanočestice koje se zbog svoje aktivnosti i veličine lako prenose kroz tvari, iako se ne smiju zanemariti niti nanočestice uključene u materijale.

Posljednjih godina se sve više istražuje utjecaj nanočestica na okoliš i živi svijet, pri tome najviše na ljude i životinje. Istraživanja podupiru povezanost između čestica kao zagađivala zraka i bolesti pluća, kardiovaskularnog i središnjeg živčanog sustava, no kako istraživanja nisu provedena samo na česticama nanometarskih dimenzija, ne može se sa sigurnošću odrediti njihov utjecaj na organizam.

Prema dosadašnjim istraživanjima sa sigurnošću se može tvrditi da je mogućnost za translokacijom nanočestica u organizmu velika te da lako ulaze u organizam preko kože, unosom kroz probavni sustav ili inhalacijom i da izloženost ekstremno velikoj količini nanočestica kao zagađivala štetno djeluje na organizam, i to prvenstveno na dišni i živčani sustav, no još uvijek su potrebna daljnja istraživanja kojima bi se odredila doza koja je štetna po ljudsko zdravlje.

Kako se radi o vrlo sitnim i mobilnim česticama njihova akumulacija u tijelu je moguća u gotovo svim organima, kao što je prikazano slikom 8.



Slika 8. Shematski prikaz načina ulaska nanočestica u organizam [18]

Prodiranje nanočestica u organizam putem kože omogućeno je sve većim korištenjem nanočestica u bojama za odjeću, kozmetici i zaštitnim sredstvima za sunčanje. Prema istraživanjima je dokazano da se ultrafine čestice akumuliraju u površinskom sloju kože te ne prodiru dalje kroz nju. Pretpostavlja se da će lošija oštećena koža biti slaba barijera za nanočestice u usporedbi sa zdravom, no ne može se pretpostaviti kakve posljedice nanočestice mogu izazvati na njoj.

Apsorpcija nanočestica u organizam unesenih putem probavnog sustava je iznimno mala, a na taj način ih se može unijeti u organizam putem kontaminirane hrane i vode, gutanjem inhaliranih čestica te unosom čestica sa ruku. Prema rezultatima istraživanja nanočestice unesene na ovaj način se apsorbiraju pretežno u limfnom sustavu i to ukoliko su manje, hidrofobne i neutralne prirode.

Na temelju dosadašnjih istraživanja dišni sustav, iako je potencijalna meta nanočestica, im predstavlja znatnu barijeru koja onemogućava sustavnu izloženost organizma. [18]

Prema nalazima istraživanja kojeg je provelo Vijeće za Nacionalno Istraživanje i bilo sponzorirano od strane Udruga za zaštitu okoliša se doznaje da iako je nanotehnologija vrlo razvijena i uključena u gotovo sve djelatnosti čovjekova života još uvijek nije dovoljno financijskih sredstava uloženo u istraživanje o samom utjecaju nanočestica na čovjekov organizam i okoliš i potencijalne rizike koje ta tehnologija sa sobom nosi. Kako nisu obavljena dostatna istraživanja, stručnjaci nemaju ključne podatke kojima bi se uspostavila zakonska regulativa za nadzor nanotehnologije, tj. za praćenje i kontrolu okoliša po pitanju onečišćenja nanočesticama.

Izvrješćem su nanočestice povezane sa:

- oštećenjem DNK,
- poremećajem stanične funkcije i proizvodnjom reaktivnih oksida,
- patogenozom nalik azbestnoj,

- neurološkim problemima poput konvulzija,
- oštećivanjem organa, kao što su značajne lezije na jetri i bubrezima,
- uništavanjem korisnih bakterija u sustavima za pročišćavanje voda,
- usporenim rastom poljoprivrednih kultura poput kukuruza, soje, mrkve, krastavaca i kupusa i
- oštećenjima škrge, respiratornim problemima i oksidativnim stresom kod riba.

[23]

Zbog nepostojanja zakonskih regulativa, Europska komisija inzistira na praćenju utjecaja nanotehnologije na ljudsko zdravlje. Prema smjernicama ispitivanje bi se podijelilo u nekoliko faza evaluacije. Prvom fazom bi se ispitivali nanomaterijali kod kojih postoji rizik od otpuštanja nanočestica tijekom prijenosa. Drugom fazom bi se utvrđivala sposobnost otpuštenih nanočestica da se prenose i akumuliraju u tkivima. Treća faza bi obuhvaćala selektivne testove toksičnosti izlaganja organa nanočesticama. Posebno bi se trebala vršiti ispitivanja lokalnih i imunoloških reakcija, citotoksičnost, genotoksičnost i poticanje diobe stanice. [24]

### 3. Metalni kompoziti

Kompozit je oblikovan proizvod načinjen od kompozitnog materijala, tj. čvrstog materijala koji se sastoji od kombinacije dvaju ili više jednostavnih materijala i u kojem pojedine komponente zadržavaju svoj zaseban identitet, tj. svoja svojstva.

Uporaba pojma kompozit dolazi sa pretpostavkom o poboljšanim svojstvima, prvenstveno fizikalnim, zbog toga što je glavni tehnološki interes dobivanje materijala sa superiornim fizikalnim, uglavnom mehaničkim, svojstvima u odnosu na svojstva komponenata.

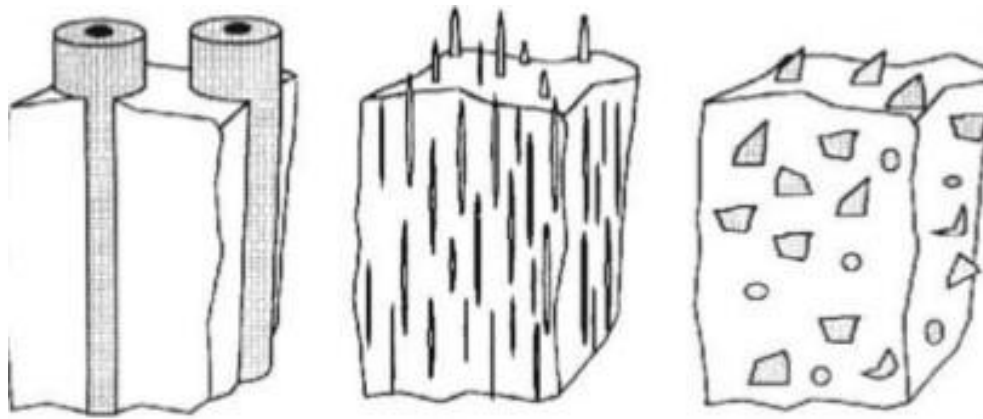
Struktura kompozita je heterogena, sastavljena od dviju ili više faza koje dolaze od njegovih komponenata. Sve faze mogu biti neprekinute (kontinuirane), ili jedna ili više njih mogu biti disperzirane u neprekinutoj matrici. Kako bi se kompoziti mogli u potpunosti opisati potrebno je poznavati sastav faza, geometriju (oblik, veličinu, raspodjelu i orijentaciju čestica) i koncentraciju faza, koja se iskazuje kao volumni udio pojedine faze. [25]

Obzirom na matricu postoje tri vrste kompozita: kompoziti s polimernom, keramičkom i metalnom matricom.

Kompoziti s metalnom matricom MMC (eng. *Metal Matrix Composites*), prikazani slikom 9, su predmet interesa, iz razloga što su sposobni osigurati više uporabne temperaturne granice od njihovih osnovnih metala i mogu se oblikovati tako da se dobije povećana čvrstoća, krutost, toplinska vodljivost, abrazijska otpornost, otpornost puzanju i dimenzijska stabilnost. Najistaknutije karakteristike metalnih matrica vidljive su u različitim oblicima, posebice u tome što metalna matrica daje metalnu prirodu kompozitu u smislu toplinske i električne vodljivosti, proizvodnih procesa i interakcije s okolišem. Dominirajuća mehanička svojstva matrice, kao modul elastičnosti i čvrstoće u poprečnom smjeru kompozita s usmjerenim ojačalima, dovoljno su visoka kod nekih MMC-a da je moguće jednosmjerno slaganje u nekim inženjerskim konstrukcijama.

U MMC-u kontinuirana ili matična faza je općenito legura, rjeđe čisti metal, a ojačalo (punilo) se sastoji od visokovrijednih ugljičnih, metalnih ili keramičkih dodataka. Tijekom proizvodnje kompozita miješaju se zajedno matrica i ojačalo. MMC su nezapaljivi, ne otplinjavaju u vakuumu i minimalno su osjetljivi na organske tekućine kao što su goriva i otapala.

Ojačala, kontinuirana ili diskontinuirana, mogu činiti 10 do 60 vol.% kompozita. Kontinuirano vlakno ili vlaknasta ojačala uključuju ugljik (C), silicijev karbid (SiC), bor, aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ ) i metale visokog tališta. Diskontinuirana ojačala sastoje se uglavnom od SiC u obliku viskera (w), čestica (p) SiC,  $Al_2O_3$  ili titanova diborida ( $TiB_2$ ) i kratkih ili nasjeckanih vlakana  $Al_2O_3$  ili ugljika. [26]



Slika 9. Prikaz MMC-a ojačanih vlaknima, kratkim vlaknima i česticama [27]

### 3.1. Postupci proizvodnje

Procesi proizvodnje kompozita sa metalnom matricom se dijele u primarnu i sekundarnu grupu. Primarni proces je postupak kojim se sintetiziraju kompoziti od osnovnih materijala, matrice i ojačala, pritom je uključena ugradnja ojačala u matricu u odgovarajućoj količini i na odgovarajuća mjesta i razvoj prikladnih veza između konstituenata.

Sekundarni proces se sastoji od svih dodatnih stupnjeva potrebnih za preradu primarnog kompozita u konačni dio. Ovisno o željenom konačnom proizvodu i postupcima proizvodnje korištenim u procesu oba stupnja proizvodnje mogu se odvijati istodobno ili zasebno.

Izbor postupaka za proizvodnju kompozitnog materijala ovisi o mehaničkim i kemijskim svojstvima punila i matrice, dužini i veličini vlakana, njihovom slaganju i željenom razmještaju te o veličini, obliku i raspodjeli čestica. Za proizvodnju kompozita potrebno je poznavati i termodinamiku i kinetiku mogućih reakcija između matrice i ojačanja, ukoliko matrica i ojačalo nisu kompatibilni, u smislu prijanjanja, ili postoji mogućnost od prekomjerne aktivnosti na međugranici tada se ojačala prevlače ili površinski obrađuju te se prilagođava sastav matrice.

Postupci proizvodnje metalnih kompozita se dijele na postupke proizvodnje u krutom stanju (eng. *Solid state processing*) i postupke proizvodnje u tekućem stanju (eng. *liquid processing*).

#### 3.1.1. Postupci u čvrstom stanju

Postupci u čvrstom stanju se odvijaju pri nižim temperaturama s mogućnošću bolje kontrole termodinamike i kinetike graničnih površina. Najčešće korišteni su postupci difuzijskog spajanja materijala u obliku tankih slojeva i sinteriranje, a procesi nanošenja matrice, u kojima se materijal matrice nanosi na vlakna uključuju elektrokemijsko prevlačenje, plazmatsko naštrcavanje i fizikalno nanošenje iz parne faze.

Difuzijsko spajanje se odvija na povišenoj temperaturi i tlaku uz ograničen stupanj difuzije, kako ne bi došlo do porasta krhkih faza. Ukoliko se kao postupak koristi toplo valjanje mora se ograničiti deformacija kako ne bi došlo do pomaka vlakana. Povišenjem temperature olakšava se tečenje matrice no ne smije doći do njezina prekomjerna

zagrijavanja. Nedostatci postupaka su zahtijevane čiste površine prije spajanja, što znači čišćenje sastavnih materijala te postupak u vakuumu. [28]

Visokotemperaturna sinteza (eng. *Self-propagating synthesis, SHS*) toplim prešanjem (eng. *hot pressing, HP*) je proces kojim se proizvode kompoziti s malom poroznošću i trodimenzionalne strukture između intermetalnih spojeva i metalnih matrica s konkurentnom cijenom i jednostavnošću. Istovremena uporaba tlaka i reakcije sinteze omogućuju smanjenje poroznosti i kontrolu geometrije pora te ravnomjernu raspodjelu čestica. [29]

Metalurgijom praha (eng. *Powder Metallurgy, PM*) se ostvaruje povezivanje praha s česticama, pločicama ili viskerima ojačala nizom koraka. Dva ili više odijeljena praha se miješaju, katkada uz pomoć veziva. Keramičke čestice koje trebaju osigurati visoku čvrstoću kompozita su mnogo manje od praha legure matrice, a razlika u veličini čestica praha omogućuje stvaranje neprekinute mreže malih keramičkih čestica oko većih zrna matrice. Tako nastaju mikrostrukturno nehomogena područja, a stvaranjem mreže nastala poroznost mora se popuniti rastaljenom legurom matrice tijekom sjedinjenja (toplo prešanje). Ako se polazni prah lako oksidira, vrlo fini submikronski oksidi mogu se koncentrirati na granicama zrna značajno smanjujući lomnu žilavost izvornog materijala. Dijelovi postupka uključuju: prosijavanje brzo skrućenih čestica, spajanje čestica s fazom ili fazama za ojačavanje sa ili bez veziva, zguščivanje smjese ojačala i matrice na oko 75% gustoće, otplinjavanje i završno sjedinjenje istiskivanjem, kovanjem, valjanjem ili nekom drugom toplom obradom. MMC-i proizvedeni PM tehnologijom obilježeni su visokom cijenom i značajnim svojstvima kao što su čvrstoća i krutost. [30]

### 3.1.2. Postupci u tekućem stanju

Kako bi se bolje povezala matrica s vlaknima poželjno je da taljevina iz matrice teče u međuprostore nerazvrstanog vlakna, za osigurano potpuno pokrivanje vlakana, a takvi se postupci provode u dubokim kupkama. Različitost između potrebe ovlaživanja vlakana i izbjegavanje prevelike kemijske reakcije između vlakana i matrice uvjetuje predobradu istih prevlačenjem. Vlakna s prevlakom provlače se kroz kupku rastaljene matrice u kontinuiranim postupcima. Prodiranje rastaljene matrice između vlakana osigurava njihovu razdvojenost te veznu međupovršinu između vlakna i matrice. Prevlaka na vlaknu pomaže ovlaživanje i zaštitu vlakana od kemijske reakcije pri povišenim temperaturama.

Lijevanje u kalup je najčešći ljevački postupak za proizvodnju velike količine dijelova uz najnižu cijenu, a pri tom postupku se koriste različiti načini pripreme taljevine i tehnike lijevanja. [31]

Lijevanje miješanjem (eng. *Stir Casting*) slično je klasičnom postupku uz blago miješanje taljevine, zbog osiguravanja ravnomjerne raspodjele čestica, te stalne kontrole temperature.

Lijevanje tiskanjem (eng. *Squeeze Casting*) uključuje ulaganje poroznog keramičkog predoblika u predgrijani kalup koji se kasnije ispunjava teškim metalom. Djelovanjem tlaka rastaljeni metal ulazi u keramički predoblik te nastaje kompozit. Postupkom se smanjuje utrošak materijala i energije te daje mogućnost selektivnog odvajanja.

Lijevanje u poluskrućenom stanju (eng. *Compcasting, Rheocasting*) je postupak sličan lijevanju miješanjem s razlikom što se čestice ojačala dodaju u metal koji se nalazi u poluskrućenom stanju, te se mora snažno miješati.

Bestlačna infiltracija metala (eng. *Pressureless metal infiltration*) je postupak poznat pod različitim zaštićenim imenima a vlasništvo je AM LANXIDE-a. Prvim razvijenim postupkom kompoziti se proizvode infiltracijom sloja čestica  $Al_2O_3$  rastaljenim metalom koji



je izložen oksidacijskoj atmosferi. Materijal matrice nastalog kompozita je sastavljen od smjese produkata oksidacijske reakcije i neizreagirane aluminijske legure (LANXIDE), a postupak omogućava dobivanje gotovih oblika i svojstava kompozita koja zadovoljavaju primjerene specifične namjene. Novijim postupkom PRIMEX CONCENCRATE se proizvodi materijal koji se kasnije može pretaljavati i koristiti u ljevaonicama za proizvodnju dijelova od aluminijske MMC-a. Postupak uključuje bestlačnu infiltraciju aluminijske u masu keramičkih čestica za ojačanje te je praćena *in situ* stvaranjem jedinstvene površinske prevlake na česticama ojačala. Razrijeđen kompozit pripremljen za lijevanje je jednolika i stabilna talina. Kod obje tehnologije ojačalo, legura matrice i mikrostruktura kompozita se mogu u potpunosti kontrolirati i varirati što omogućuje pripremu dijelova za određenu primjenu, odnosno ekonomično se proizvode dijelovi završnog ili gotovo završnog oblika, svih veličina i složenih oblika. Zbog mogućnosti projektiranja fizikalnih i toplinskih svojstava ovaj postupak pruža prednosti u smanjenju cijene te povećanju pouzdanosti u materijal u odnosu na druge postupke, osobito kod izrade električnih komponenti.

Nanošenje raspršivanjem (eng. *Spray Deposition*) je postupak koji uključuje atomizaciju taljevine, stvaranje zasebnih kapljica, raspršivanje kapljica rastaljenog metala kroz sapnice, te skupljanje i zgušnjavanje poluskrućenih kapljica na podlozi. Zgušnjavanjem kapljica na podlozi stvara se talog formirajući izravno približno konačne oblike. Brzina skrućivanja nije velika, a prednosti postupka su izravna proizvodnja oblika i izravno uključivanje ojačala u matricu.

Brzo skrućivanje (eng. *Rapid-Solidification Processing*, RSP) je postupak koji se koristi kako bi se poboljšala visokotemperaturna svojstva materijala, poput čvrstoće i otpornosti na koroziju, na taj način što se pri brzom skrućivanju postiže mikrostruktura manja od uobičajene veličine čestice metala. Ovaj postupak omogućava optimiranje svojstava matrice faze te povećanje lomne žilavosti materijala bez gubitka na čvrstoći. Postoje tri načina provođenja postupka: atomizacija, dobivanje traka (eng. *melt-spun ribbon*) i listića (eng. *melt-spun flake*). Zadnji način provođenja postupka se smatra najperspektivnijim zbog svoje ekonomske isplativosti.

Fizikalno prevlačenje iz parne faze (eng. *Physical Vapour Deposition*, PVD) obuhvaća niz postupaka uključujući isparavanje elektronskim snopom. Magnetron taloženje i elektroprevlačenje su postupci kojima se proizvode kompoziti uzastopnim nanošenjem slojeva matrice na vlakna ojačala. Ovaj postupak ne zahtijeva zagrijavanje vlakana na visoke temperature te se uvelike koristi za proizvodnju C/Al-kompozita. [28,29,30,31]

### **3.2. Podjela kompozita s metalnom matricom**

Kod MMC-a kao matrični metal najčešće dolazi aluminij, te je takav kompozit od iznimnog značaja za razne primjene u gotovo svim tehnološkim područjima, a slijede ga magnezij, titan, bakar i superlegure.

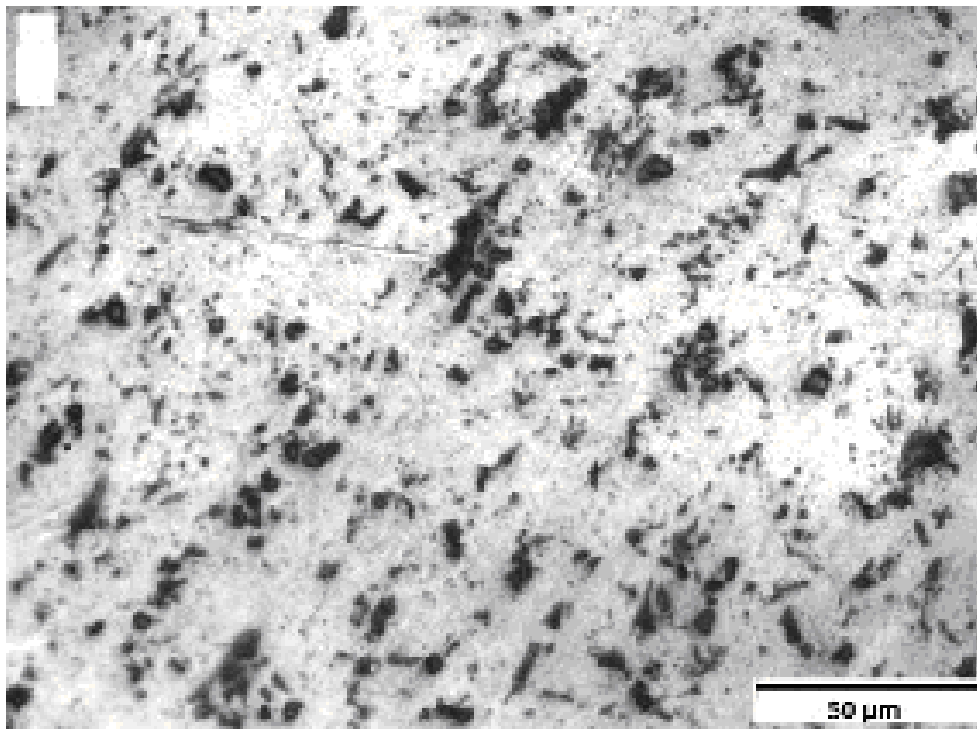
#### *3.2.1. Kompoziti s aluminijskom matricom*

Na aluminij kao matrični metal je usmjeren najveći dio istraživanja i razvoja MMC-a te je on najatraktivniji neželjezni metal osobito za zrakoplovnu industriju. Njegova mala težina i toplinska svojstva su značajan faktor za odabir upravo ovog metala kao matrice kompozita.

Dosada je razvijeno više vrsta aluminijevih kompozita, koji se uglavnom koriste u zrakoplovnoj industriji, a ojačala se aluminiju i njegovim legurama dodaju kako bi se povećala čvrstoća, krutost ili otpornost na umor. Ojačala u aluminijevim kompozitima dolaze kao neprekinuta vlakna (ugljična vlakna) ili kao raznolike čestice, kratka vlakna i viskeri, te su uglavnom anorganske prirode poput aluminijeva oksida, silicijeva karbida ili silicijeva nitrida.

*Bor/aluminij* kompozit je tehnološki razvijen sa neprekinutim vlaknima, a sjedinjuje izvanrednu čvrstoću, krutost i nisku gustoću bornih vlakana s pouzdanošću aluminijevih legura. Također su kao bitna svojstva ovoga kompozita naglašena električna i toplinska vodljivost, duktilnost i žilavost, nezapaljivost te mogućnost prevlačenja, oblikovanja, spajanja i toplinske obrade. Proizvodni postupci ovog kompozita se temelje na metodama difuzijskog spajanja vrućim prešanjem ili plazmatskim raspršivanjem, a primjenjuje se najviše za izradu svemirskih brodova i elektroničkih mikročipova.

*Silicijev karbid/aluminij* je kompozit, strukturom prikazan na slici 10. koji ima povećanu čvrstoću i krutost, veću otpornost na trošenje i bolju temperaturnu stabilnost u odnosu na sami metal bez posljedica na težinu. Čvrstoća kompozita raste s porastom udjela silicijeva karbida. [32]



Slika 10. Strukturni prikaz kompozita SiC/Al [33]

*Diskontinuirani silicijev karbid/aluminij* je kompozit koji uključuje materijale sa SiC česticama, viskerima, nodulama, listićima, pločicama ili kratkim vlaknima u aluminijevoj matrici. na tržištu su dostupni u velikim količinama i po povoljnim cijenama za razliku od drugih kompozita, a proizvode se tehnologijama metalurgije praha ili tehnologijama lijevanja. Važna svojstva ovoga kompozita, osim visoke čvrstoće i granice razvlačenja su predviđanje



koeficijenta toplinske rastezljivosti prilagodbom udjela ojačala te visoka dimenzijska stabilnost ili otpornost na deformaciju pod opterećenjem, tj. puzanje.

*Aluminijev oksid/aluminij* je kompozit koji se uglavnom proizvodi postupcima u tekućem ili poluskrućenom stanju, a ovaj kompozit ima povećanu otpornost na trošenje i deformacije zbog toplinskog umora te smanjeni koeficijent toplinskog rastezanja za razliku od samog metala i njegovih legura. Kompozit se proizvodi na taj način da se dugačko vlakno  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  proizvodi slaganjem traka  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u kalup te se natapaju rastaljenim aluminijem uz mali dodatak litija.

*Ugljik/aluminij* kompozit je razvijen još 60.-ih godina prošloga stoljeća za komercijalne svrhe no zbog toga što su ovi materijali međusobno nepodobni, zbog štetnih reakcija među njima, lošeg kvašenja ugljika aluminijem i oksidacije ugljika, dolazi do značajnih tehničkih zapreka u proizvodnji.

Komercijalni C/Al MMC-i se proizvode na tri načina: infiltracijom tekućim metalom vlakana, nanošenjem matrice u parnom stanju u vakuumu na razastrta vlakna i spajanjem pod tlakom „sendviča“ vlakana između aluminijevih limova. Tako pripremljeni kompoziti se podvrgavaju sekundarnim postupcima kao što su difuzijsko spajanje ili pultruzija kako bi se dobili konstrukcijski elementi. Također ovakve kompozite je moguće proizvesti i lijevanjem tlačenjem. [32]

### *3.2.2. Kompoziti s magnezijevom matricom*

Magnezijevi kompoziti su razvijeni kao zamjena za aluminijske, a magnezijeva manja toplinska vodljivost je često ključan faktor u odabiru između ta dva kompozita. U razvoju su tri vrste magnezijevih kompozita: kontinuirana vlakna C/Mg za svemirske konstrukcije, kratka vlakna  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mg}$  za dijelove automobilskih motora i diskontinuirana vlakna SiC ili B4C/Mg za dijelove motora i materijale u niskonaponskoj elektronici, a proizvodne metode za sve tri vrste jednake su onima za istovrsne aluminijske kompozite. [34]

### *3.2.3. Kompoziti s titanovom matricom*

Titan je odličan izbor za matricu zbog svoje specifične čvrstoće kod sobne i srednjih temperatura, te izvanredne otpornosti na koroziju, čime zamjenjuje aluminij u zrakoplovnoj i raketnoj industriji. Kompoziti se proizvode visokotemperaturnim/kratkotrajnim spajanjem valjanjem, vrućim izostatičkim prešanjem, vakuumskim vrućim prešanjem te plazmatskom metodom raspršivanja titanove matrice na SiC vlakna. SiC/Ti kompozit je od iznimne važnosti za zrakoplovnu industriju. [35]

### *3.2.4. Kompoziti s bakrovom matricom*

Prednosti bakra kao materijala za matricu su toplinska vodljivost i čvrstoća na visokoj temperaturi. Kompoziti bakra ojačanog volframom su proizvedeni još kasnih 50.-tih godina prošlog stoljeća, a danas se smatraju temeljnim materijalima za stijene komora za izgaranje modernih raketnih motora. Ugljikom ojačana bakrena matrica snižava gustoću materijalu, povećava mu krutost, povisuje radnu temperaturu i osigurava mehanizam za oblikovanje koeficijenta toplinskog rastezanja, a dobiva se na način da se ugljično vlakno galvanskim procesom prevuče čistim bakrom. [36]

### 3.2.5. Kompoziti s matricom superlegura

Superlegure se uglavnom koriste u turbinskim motorima te su kompoziti s metalnom matricom prvi materijali uzeti u obzir za poboljšanu izvedbu turbina s ciljem povećanja radne temperature dijelova. Čvrstoća pri visokim temperaturama kompozita s matricom od superlegura postignuta je samo ojačavanjem teško taljivim metalima, tj. vlaknima volframa, molibdena, tantala i niobija sa posebno prilagođenim sastavom toj namjeni. Najjača razvijena vlakna su načinjena od legure volframa.

Kompoziti se proizvode procesima s čvrstom fazom, tekućom fazom ili raspršivanjem. Metoda proizvodnje uključuje precizno lijevanje, spajanje metala matrice u obliku tankih ploča, u obliku ploča dobivenih valjanjem praha s organskim vezivom, tehnike metalurgije praha, „eng. *slip casting*“ praha metalnih legura i raspršivanje električnim lukom.

Osim spomenutih metala, načinjeni su i MMC-i na osnovi željeza, nikla i kobalta čime je postignuta velika lepeza svojstava kao što su vlačna čvrstoća pri povišenim temperaturama, lomna čvrstoća, otpornost na puzanje, otpornost na niskociklični i visokociklični umor, žilavost, oksidacijska otpornost i toplinska vodljivost. [35,37]

## 4. Ugljične nanocijevi u metalnoj matrici

Iako su ugljična vlakna otkrivena još 1960. godine prošloga stoljeća te je prepoznata njihova iznimna važnost za proizvodnju naprednih kompozita koji imaju široku komercijalnu primjenu, od zrakoplovne industrije preko vojne i elektroničke industrije do proizvodnje sportske opreme i građevinarstva, nanocijevi su otkrivene tek 1991. godine. Tim revolucionarnim otkrićem počinje njihova ugradnja i u metalne matrice matrice kako bi se dobio kompozit koji bi kao materijal zadovoljio sve tražene uvjete tržišta.

Nanocijevi su grafenske slojevi načinjene valjanjem samih oko sebe, a višeslojne nanocijevi (eng. *Multiwalled carbon nanotube*) koje su najčešće u primjeni su načinjene od jednoslojnih nanocijevi raspoređenih na koncentričan način.

### 4.1. Tehnike proizvodnje

Kompoziti s metalnim matricama (MMC-CNT) ojačani nanocijevima izrađuju se različitim procesima. Metalurgija praha je najpopularnija i široko primijenjena tehnika pripreme MMC-CNT kompozita. Elektrodepozicija i taloženje elektrolita su sljedeće najvažnije tehnike za taloženje tankog premaza MMC-CNT kompozita, kao i za taloženje metala na CNT. Za metale s niskim talištem kao što je magnezij, topljenje i skrućivanje je najbolja raspoloživa tehnologija proizvodnje.

Proizvodnja MMC-CNT je pred sebe stavila velike izazove koje konačni proizvod treba zadovoljiti, a to su: homogena disperzija ugljičnih nanocijevi kroz metalnu matricu, snažna međupovršinska veza CNT-a i metalne matrice te kemijska i strukturna stabilnost CNT-a. [38]

#### 4.1.1. Metalurgija praha

Metalurgijom praha (eng. *Solid state processing*) se ugljičnim nanocijevima ojačani metalni kompoziti dobivaju procesima mehaničkog legiranja i sintetiziranja, miješanjem i legiranjem uz prešanje na visokim temperaturama, sinteriranjem plazmatskim raspršivanjem te obradom deformacije praškastih kompaktnih materijala. Metalurgija praha je tehnologija proizvodnje praha i gotovih dijelova zagrijavanjem sabijenog praha do temperature nešto niže od temperature taljenja, te se njome uglavnom dobivaju gotove komponente koje ne zahtijevaju daljnju obradu. Tehnološke operacije kojima se provodi metalurgija praha su proizvodnja praha, stvaranje mješavine prahova, sabijenog praha te sinteriranje koje uključuje zagrijavanje do temperature niže od tališta glavne komponente pri čemu njezine čestice gube svoj identitet te postižu tražena svojstva. [39]

Prilikom proizvodnje MMC-CNT-a procesima mehaničkog legiranja i sinteriranja neophodno je da ugljične nanocijevi budu provučene nikolm, postupkom elektrolitnog taloženja kako bi se postigla dobra međufazna čvrstoća kroz procese miješanja, sabijanja i sinteriranja, te da se nanese kemijskim postupkom taloženja para na komponentu praha, kako bi se postigla homogena disperzija. Odgovarajuću raspoređenost CNT-a u kompozitu moguće je dobiti i mehaničkim miješanjem prahova u alkoholnim i kiselim medijima te daljnjim sinteriranjem. Tretiranje CNT-a s kiselinom rezultira smanjenjem njihove dužine, no ne dolazi do njihova oštećenja te se poboljšava površinska aktivnost. Dugotrajnim miješanjem prahova,

u vremenskom okviru od 48 sati se postiže odlična disperzija CNT-a ali i velika poroznost kompozita. [38]

Miješanje i legiranje uz prešanje na visokim temperaturama je kao proces proizvodnje MMC-CNT-a manje pogodan od sinteriranja, zbog toga što u procesu nastaju nakupine CNT-a, te se za postizanje bolje disperzije ugljične nanocijevi moraju elektrolitnim taloženjem prevlačiti niklom prije podvrgavanja visokotemperaturnom prešanju, što u konačnici rezultira poboljšanim mehaničkim svojstvima i otpornošću na trošenje samog kompozita. Kod ovog procesa optimizirano vrijeme miješanja je 5 sati, kako bi se izbjeglo oštećenje CNT-a, a kompoziti nastali njime pokazuju bolja mehanička svojstva, kao što su tvrdoća i tlačna čvrstoća.

Sinteriranje plazmatskim raspršivanjem je relativno nova tehnika sinteriranja u kojoj pulsirajuća direktna struja prolazi kroz prah što dovodi do naglog zagrijavanja te se na taj način znatno povećava brzina sinteriranja. Učinkovito zgušnjavanje praha se postiže utjecajem tlaka, grijanjem strujom i difuzijom električnog polja. Ova metoda je najpogodnija za proizvodnju nanoprahova zbog toga što ne omogućava dovoljno vremena za rast zrna praha. Kompoziti proizvedeni ovom tehnikom imaju bolje dispergirane komponente te poboljšanu gustoću. Mikrostrukture sinterirane na ovaj način sadrže dvije zone CNT-a, slobodno raspršene ugljične nanocijevi u matrici i površine zrna praha obogaćene ugljičnim nanocijevima, te se zbog toga podvrgavaju daljnjim deformacijama i ravnanjima. Proizvodnja praha miješanjem na molekularnoj razini rezultira poboljšanim mehaničkim svojstvima i gustoćom. Kako bi se ovaj proces prikazao kao najprikladniji potrebno je još istražiti da li se CNT-i oštećuju tijekom procesa i da li postoji mogućnost da reagiraju s metalnom matricom.

Deformacijskim obradama dobivaju se veoma izdržljivi praškasti kompoziti s neujednačenom raspoređenošću CNT-a, te ih je potrebno raspršiti po matrici. Proces valjanja se pokazuje pogodnijim od ekstruzije. Ovako dobiveni kompoziti pokazuju veliku otpornost na trošenje. Kutnom obradom se razbijaju aglomerirani CNT-i te se bolje raspoređuju po matrici i time poboljšavaju mehaničku čvrstoću kompozita. Kompoziti sinterirani vrućom ekstruzijom pokazuju slaba mehanička svojstva, zbog nastalih aglomerata CNT-a, tj. nejednolike raspoređenosti CNT-a u matrici, koja se optimizira promjenom oblika komponente, tj. zamjenom praha s vlaknima i peletima. Teškom deformacijom se uspješno razbijaju CNT aglomerati, što rezultira boljom raspršenošću CNT-a u matrici, no ona može doprinijeti oštećenju CNT-a i formiranju međufaznih proizvoda. [38]

#### *4.1.2. Taljenje i skrućivanje*

Taljenjem i skrućivanjem, koje su najkonvencionalnije tehnike proizvodnje MMC-a, se CNT-om ojačani kompoziti dobivaju procesima lijevanja, metalne infiltracije, prelijevanja taline te laserske depozicije. Kako je za ovaj postupak potrebna visoka temperatura koja može uzrokovati oštećenje CNT-a te može doći do reakcije između CNT-a i metalne matrice, ovaj je postupak pogodan samo za kompozite s niskom temperaturom taljenja matrice.

Iako se postupkom lijevanja povećava kristaliničnost matrice ugljične nanocijevi povećavaju tvrdoću kompozita, odnosno prevučene niklom pridonose povećanju mehaničkih svojstava. Kod ekstrudiranih kompozita dolazi do nastanka praznina između matrice i CNT-a što ih čini slabo na opterećenje zamorom. [38]

Kao pogodan način proizvodnje CNT-om ojačanih metalnih kompozita se navodi visokotlačno lijevanje kojim je omogućeno precizno dobivanje proizvoda. Rastaljeni metal se pod pritiskom lijeva u kalup, a brzine punjenja kalupa i stope skrućivanja su izrazito velike

što rezultira brzim ciklusom izrade kompozita u vremenu od nekoliko sekundi do nekoliko minuta čime se ne narušava strukturna postojanost ugljičnih nanocijevi. [40]

Metalnom infiltracijom se kompoziti pripremaju na način da se pripremi porozna čvrsta struktura sa raspodijeljenim CNT-om u čije se pore potom infiltrira talina metala, te se podvrgne skrućivanju. Potrebno je istovremeno pravilno popunjavati pore kako bi kompozit bio dobre strukture. Kompoziti načinjeni ovim postupkom osim poboljšane tvrdoće i otpornosti na habanje imaju i poboljšan modul smicanja.

Kompoziti dobiveni postupkom prelijevanja taline se proizvode na način da se rastaljena legura lijeva kap po kap na rotirajući metalni kotač, prilikom čega se kapi zbog velike brzine hlađenja pretvaraju u vrpce te dobivaju amorfnu strukturu. Ovim postupkom se ne oštećuju ugljične nanocijevi.

Laserskom depozicijom se zadržava postojanost CNT-a ali nastaje mnogo grešaka u strukturi kompozita zbog visoke temperature procesa. [38]

#### *4.1.3 Termalno raspršivanje*

Termalnim raspršivanjem, odnosno plazmatskim raspršivanjem i hladnim raspršivanjem također se proizvode MMC-CNT, na način da se rastaljene ili polu-rastaljene čestice raspršuju po supstratu kako bi se dobila prevlaka. Ova metoda nudi prednost zbog velike stope hlađenja jer tijekom skrućivanja premaz zadržava, odnosno formira nanokristaličnu strukturu. Ovim metodama dobivaju se skoro gotovi proizvodi zbog toga što se rasute nanokomponente nanose na gotove oblike koji se ne moraju u daljnjoj preradi podvrgavati dugotrajnim strojnim obradama. Postupcima se zadržava neoštećenost CNT-a te je njihova raspodjela u matrici jednolika. Hladnim raspršivanjem je moguće izbjegavanje oksidacije i faznih transformacija zbog toga što je temperatura čestica ispod temperature taljenja. Ove tehnike su učinkovit i brz način ugradnje CNT-a u premaze i rasute oblike, a kompoziti nastali njima pokazuju poboljšana svojstva kao što su otpornost na habanje i toplinska vodljivost premaza. [38]

#### *4.1.4 Elektrokemijske depozicije*

Sljedeće tehnike proizvodnje ovih kompozita su elektrokemijske depozicije odnosno galvanskim procesima i procesima taloženja, koje se primarno koriste za stvaranje tankih kompozitnih premaza. Galvanskim procesima se kompozitni film taloži između elektroda, a procesi taloženja ne zahtijevaju vanjski izvor energije već se odvija kemijski proces u kojem dolazi do termokemijske razgradnje metalnih soli, te oslobođeni metalni ioni sa CNT-om formiraju kompozite.

Galvanskim procesima nastali kompoziti imaju jednoliko raspoređene ugljične nanocijevi čiji se sadržaj u matrici povećava sa povećanjem brzine miješanja i koncentracije CNT-a u elektrolitima.

U procesima taloženja ključnu ulogu imaju temperatura kupke u kojoj se odvija taloženje te njezina pH vrijednost, odnosno taloženje se mora odvijati pri nižim temperaturama u kiselom mediju. [38]

#### 4.1.5. Ostale tehnike

Ostale tehnike proizvodnje metalnih kompozita ojačanih ugljičnim nanocijevima su miješanje na molekularnoj razini, tehnike prskanja, slaganje u „sendvič“, torzijsko sljepljivanje, parno taloženje, miješanjem u poluskrućenom stanju te disperzija na nano skali.

Navedene tehnologije proizvodnje su još uvijek u fazi istraživanja, no već je poznato da su na veoma dobrom putu za postanak glavnih tehnika proizvodnje metalnih nanokompozita te se koriste kao rute za proizvodnju komponenti koje ulaze u već razrađene tehnike proizvodnje. [38]

#### 4.2. Svojstva kompozita s metalnom matricom ojačanih ugljičnim nanocijevima

CNT se homogeno dispergiraju kroz metal s jakom međufaznom adhezijom između CNT i metalne matrice. Kompoziti metalne matrice CNT imaju izvrsna električna svojstva i koriste se kao dodatak metalu s ciljem poboljšanja električna svojstva. CNT imaju iznimno visoku toplinsku vodljivost koja omogućuje da se one u matričnom metalu koriste za toplinsko upravljanje. Toplinska svojstva CNT metalnih matričnih kompozita mogu se poboljšati na temelju distribucije i vezivanja CNT s matricom. Kompozitni premazi povećavaju otpornost na koroziju kada im se dodaju CNT. Metalni matrični kompoziti imaju visoku toplinsku vodljivost i mali koeficijent toplinske ekspanzije. [38]

#### 4.3. Primjena MMC-CNT-a

Primjena ovih kompozita je u gospodarskim granama kojima je u cilju izraditi veoma čvrst i izdržljiv no lagan materijal, te stoga najveću primjenu nalaze u sljedećim industrijama:

- Elektronička industrija: lemnice i toplinski odvodnici za termičko upravljanje,
- Automobilska industrija: zupčanici, lomljive stopice, klipni prsteni i košuljice cilindra,
- Sportska industrija: badminton, teniski reketi i lagani bicikli,
- Zrakoplovne industrija: slijetanje i kočnice zrakoplova i
- MEMS (mikroelektromehanički sistemi) i senzori za pohranu električne energije: materijali za pohranu vodika, mikro-grede i mikro-zupčanici, anode i anodne prevlake.

Neke od ostalih primjena MMC-CNT-a su da se koriste kao katalizatori i senzori, dostupni su kao pasta metalnih nano-čestica s CNT u tekućem mediju koji im omogućuje da se osuše kao film, a zatim se koriste kao elektrode u sensorima ili se mogu izravno upotrijebiti kao elektrode u rasutom obliku. [38]

#### 4.4. Dosadašnja istraživanja MMC-CNT-a

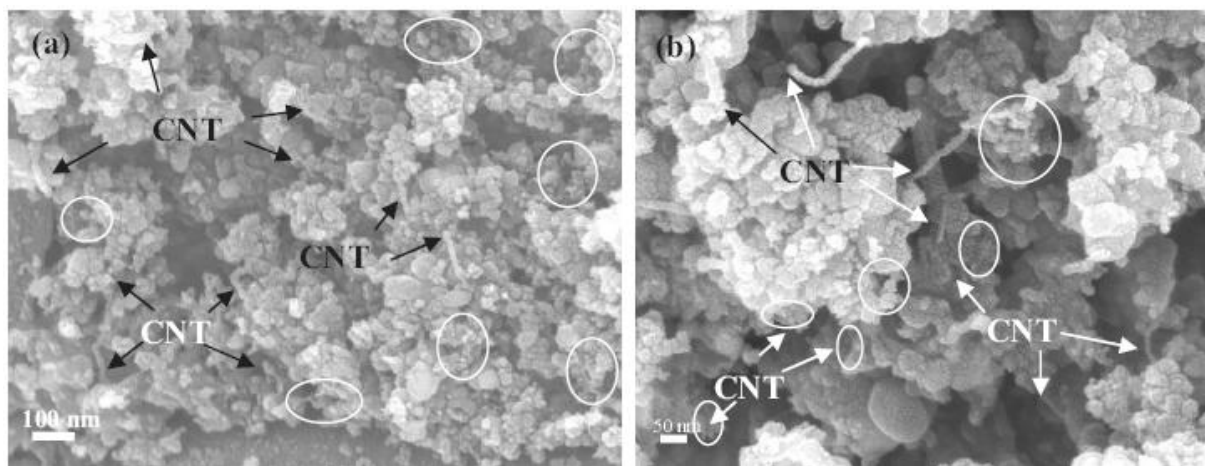
Prema istraživanjima literature provedenim u ovom radu dolazi se do saznanja da su istraživanja vezana uz MMC-CNT kao materijala u porastu zbog povećane dostupnosti kvalitetnih CNT-a po povoljnijim cijenama, te se samim time proširuje i područje primjene ovoga kompozita na različite inženjerske sektore. Razvijene su brojne nove metode za

poboljšanje disperzije CNT i nove tehnike termičkog raspršivanja za sintezu kompozita u znatno većoj mjeri.

Iako su veliki napori usmjereni na razvoj sustava CNT-MMC, još uvijek postoji dovoljno prostora za značajna poboljšanja. To podupire i činjenica da su eksperimentalnim ispitivanjima različiti rezultati dobiveni korištenjem istih metoda obrade kao i istog tipa i količine CNT-a. Takvi rezultati su dobiveni nedostatkom pravilnog poznavanja svakog pojedinog sustava.

Također je još uvijek u tijeku rasprava o najprikladnijim metodama disperzije i miješanja kompozita za određenu primjenu. Nadalje, istraživanja pokazuju da je utjecaj interfaza na fizikalna svojstva kompozita još uvijek nedovoljno razumljiv, te se predviđa vrlo veliki potencijal za dobivanje novih spoznaja o svakom pojedinom sustavu i kasnije postizanje daljnjeg razvoja u ovom području. [38]

Za proizvodnju MMC-CNT-a kao matični metal istraživačima je aluminij veoma pogodan materijal, zbog svoje male težine zbog čega i ima veliku primjenu, te ga nastoje ojačati ugljičnim nanocijevima kako bi materijal i dalje ostao lagan a poprimio puno bolja svojstva. Struktura takvog kompozita je prikazana na slici 11.



Slika 11. Strukturni prikaz: a) CNT- Al/Ni kompozita, b) Al-CNT kompozit [41]

Ispitivanjima je dokazano da aluminijski kompozit ojačan CNT-om postiže visoku kvalitetu. Al kompozit koji je pripremljen procesom metalurgije praha ima optimizirano dispergirane ugljične nanocijevi u matrici. Kompozit aluminijske matrice kojemu su dodana 2,0 težinska postotka ugljičnih nanocijevi pokazao je puno bolje rezultate nego aluminijska legura, kao što je i prikazano tablicom 1. [42]

Tablica 1. Mehanička svojstva aluminija sa i bez CNT [42]

Uzorak	Youngov modul [GPa]	Čvrstoća popuštanja [MPa]	Krajnja vlačna čvrstoća [MPa]	Produljenje [%]
AA5XXX	$73,7 \pm 0,6$	$259 \pm 2$	$363 \pm 2$	$13,7 \pm 0,6$
AA5XXX + 2,0 tež% CNT	$77,2 \pm 0,5$	$283 \pm 4$	$417 \pm 7$	$7,9 \pm 3$

Druga ispitivanja provedena su na aluminijskim kompozitima ojačanim CNT-om proizvedenim lijevanjem tiskanjem i visokotlačnim lijevanjem. U odnosu na legure bez CNT-a kompoziti su pokazali poboljšanje kod otpornosti na zamor materijala te povećanja čvrstoće kao što je prikazano tablicom 2. Rezultati ispitivanja su otkrili da u kompozitima dobivenim visokotlačnim lijevanjem nema nastalih karbida te da je disperzija CNT-a u matrici odgovarajuća. [43]

Tablica 2. Svojstava aluminijska sa i bez CNT[43]

Uzorak	Otpornost na zamor	Tlačna čvrstoća	Vlačna čvrstoća	Produljenje na lom
Al legura	X	X	X	X
Al CNT kompozit	X +40%	X +20%	X+8%	X+27%

Istraživanja ojačanih kompozita su najviše usmjerena na ispitivanje čvrstoće te su ishodi rezultirali saznanjem da porastom udjela CNT-a u kompozitu raste i krajnja vlačna čvrstoća, kao što je prikazano tablicom 3. [40]

Tablica 3. Vlačne čvrstoće aluminijska pri različitim udjelima CNT-a[40]

Uzorak	Krajnja vlačna čvrstoća[MPa]
Al +	170
Al + 0,5 tež%CNT	220
Al + 1,0 tež%CNT	240
Al + 2,0 tež%CNT	255
Al + 5,0 tež%CNT	250

Nadalje istraživanja provedena na aluminijskim kompozitima ojačanim sa CNT-om pokazuju da povećanje udjela CNT-a u kompozitu uvelike utječe na Youngov modul elastičnosti, kao što je prikazano u tablici 4. [44]

Tablica 4. Promjena modula elastičnosti porastom udjela CNT-a[44]

Uzorak	Youngov modul[GPa]
Al + 1,0 tež%CNT	92
Al + 2,0 tež%CNT	114
Al + 4,0 tež%CNT	157
Al + 10,0 tež%CNT	288

Iz svega navedenog vidi se da dodavanjem ugljičnih nanocijevi u metalnu matricu se dobivaju kompozitni materijali boljih mehaničkih svojstava u usporedbi sa samom metalnom matricom. Upravo stoga ti „novi“ kompozitni materijali mogu postati novi ili zamijeniti postojeće materijale u raznim gospodarskim granama.



## 5. Zaključak

Kompoziti kao materijali su temelj današnje industrije i zahtjeva koje tržište stavlja pred nju. Iako je još uvijek u fazi istraživanja, mogućnosti ugljične nanocijevi na poboljšanje svojstava dosada poznatih, korištenih i visokokvalitetnih materijala, među kojima se prvenstveno osvrćemo na metalne materijale, su iznimno velike. Prema dosadašnjim otkrićima postoji veliki prostor za istraživanje i razvoj nove tehnologije koja kao konačni proizvod predstavlja kompozite metalne matrice ojačane ugljičnim nanocijevima.

Disperzija vrlo finih CNT-a u mikrostrukтури na jedinstven način je trenutno popularna tema istraživanja, no u budućnosti se treba usredotočiti ne samo na razvoj i primjenu metalnih matričnih kompozita s CNT-om, već i na sve moguće zdravstvene opasnosti uzrokovane proizvodnjom ili uporabom tih nanokompozita. Upravo zbog nedovoljnog poznavanja same strukture MMC-CNT kompozita treba oprezno pristupiti njihovoj izradi i primjeni jer prema dosadašnjim saznanjima sa sigurnošću se može reći da su CNT zbog svoje veličine podjednako korisni i moguće štetni.

Poznato je da zbog male veličine imaju veliku aktivnu površinu, što im daje svojstvo velike reaktivnosti, no manje je poznato kolika je njihova tendencija da se zadrže u metalnoj matrici, odnosno kolika im je sklonost prema otpuštanju i mogu li time prouzročiti štetu po ljude i okoliš. Odgovore na ta pitanja će donesti samo uporan rad i istraživanja na području kompozitnih materijala s metalnom matricom ojačanih ugljikovim nanocijevima.

Prema dosadašnjim istraživanja jasno se može uvidjeti da dodatkom ugljičnih nanocijevi metalnom kompozitu se znatno poboljšavaju mehanička svojstva kao što su tlačna i vlačna čvrstoća, otpornost na zamor, modul elastičnosti te produljenje na lom, te da porastom udjela ugljičnih nanocijevi u kompozitu ta svojstva dobivaju veće vrijednosti. Iako se dosadašnja istraživanja obavljana većinom na aluminijskim legurama i kompozitima u skoroj budućnosti očekuje se i razvoj i istraživanja drugih metalnih kompozita ojačanih ugljičnim nanocijevima.

## 6. Literatura

1. <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=42898> (24.07.2017.)
2. R. Taylor, S. Coulombe, T. Otanicar, P. Phelan, A. Gunawan, W. Lv, G. Rosengarten, R. Prasher, H. Tyagi, Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids, *Journal of Applied Physics* 113 (2013) 011301-1 – 011301-19
3. L. Bistričić, Uvod u nanoznanost, Fakultet elektrotehnike i računalstva, Skripta, Zagreb, 2017., [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/Uvod\\_u\\_nanoznanost\\_L\\_Bisticic.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Uvod_u_nanoznanost_L_Bisticic.pdf) (24.07.2017.)
4. A. Knežević, Z. Tarle, Kompozitni materijali, *Polimeri* 32 (2011) 136-138
5. T. Filetin, Suvremeni materijali i postupci, F. Kovačićek, I. Žmak, Metalni kompoziti, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
6. <https://geek.hr/clanak/sto-je-to-nanotehnologija> (24.07.2017.)
7. <http://www.ifp.uni-bremen.de/surface-physics/laboratories/> (24.07.2017.)
8. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Atomic\\_force\\_microscope\\_by\\_Zureks.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Atomic_force_microscope_by_Zureks.jpg) (24.07.2017.)
9. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5e/AFMsetup.jpg> (24.07.2017.)
10. T. Matković, P. Matković, Lj. Slokar, Znanost o metalima, Zbirka riješenih zadataka, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010. <https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/preddiplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-preddiplomskog/Zadaci%20iz%20FM%20re-TNR-Boja-1.pdf> (24.07.2017)
11. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/ScanningTunnelingMicroscope\\_schematic.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/ScanningTunnelingMicroscope_schematic.png) (24.07.2017.)
12. <https://www.slideshare.net/joybiitk/atomic-force-microscope-fundamental-principles> (24.07.2017.)
13. [http://www.pfst.unist.hr/~ivujovic/stare\\_stranice/znanost.htm#nano](http://www.pfst.unist.hr/~ivujovic/stare_stranice/znanost.htm#nano) (24.07.2017.)
14. A. Tojnc, Fizika nanomaterijala, Prirodoslovno matematički fakultet, Predavanja, Zagreb, 2011. <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~atonejc/NNNaslovna%20strana.pdf> (24.07.2017.)
15. L. Kefurt, E. Vrdjuka, Nano i ekologija, Seminarski rad, 2012., Sisak
16. <http://www.eho.com.hr/news/nanomaterijali/6120.aspx> (24.07.2017.)
17. [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/proizvodnja\\_nanostruktura.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/proizvodnja_nanostruktura.pdf) (24.07.2017.)
18. M. Ivanković, Nanomaterijali i nanoproizvodi - mogućnosti i rizici, *Polimeri* 32 (2011) 23-28
19. M. Legin-Kolar, A. Rađenović, Ugljični materijali, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2002., Sisak
20. <http://www.personal.reading.ac.uk/~scsharip/tubes.htm> (24.07.2017.)

21. <http://nanoproizvodi.weebly.com/primjena-nanotehnologije-u-medicini-i-o269uvanju-okoliscarona.html> (24.07.2017.)
22. [http://www.phy.pmf.unizg.hr/~dpajic/buksa/nanomaterijali/02\\_nanostruktura\\_10102013.pdf](http://www.phy.pmf.unizg.hr/~dpajic/buksa/nanomaterijali/02_nanostruktura_10102013.pdf) (24.07.2017.)
23. <https://matrixworldhr.com/2012/02/28/istrazivanje-opasnosti-nanotehnologije-nisu-poznate> (24.07.2017.)
24. [http://www.novilist.hr/Zivot-i-stil/Zdravlje-ljepota/Zdravlje/Nanocestice-su-posvuda-aline-znamo-koliko-su-opasne?meta\\_refresh=true](http://www.novilist.hr/Zivot-i-stil/Zdravlje-ljepota/Zdravlje/Nanocestice-su-posvuda-aline-znamo-koliko-su-opasne?meta_refresh=true) (24.07.2017.)
25. S.M. Lee, Dictionary of Composite Materials Technology, 1989., U.S.A.
26. T. Mihaljević, Mehanička svojstva kompozita s polimernom matricom, Veleučilište u Karlovcu, 2015., Karlovac
27. <https://www.slideshare.net/Raghukk/metal-matrix-composites-56710907> (24.07.2017.)
28. R.W. Nichols, Advanced Materials by Design, Metal Matrix Composites, Princeton, 1988., USA
29. F. Delannay, C. Colin, Y. Marchal, L. Tao, F. Boland, P. Cobzaru, B. Lips, M.-A. Dellis, Processing and properties of metal matrix composites reinforced with continuous fibres for the control of thermal expansion, creep resistance and fracture toughness, Journal of Physique IV 111 (1993) 1675-1684
30. [http://www.academia.edu/8932186/PROCESSING\\_TECHNIQUES\\_AND\\_APPLICATIONS\\_OF\\_METAL\\_MATRIX\\_COMPOSITES](http://www.academia.edu/8932186/PROCESSING_TECHNIQUES_AND_APPLICATIONS_OF_METAL_MATRIX_COMPOSITES) (24.07.2017.)
31. B.C. Kandpal, J. Kumar, H. Singh, Production Technologies of Metal Matrix Composite: A review, International Journal of Research in Mechanical Engineering and Technology 4 (2014) 27-32
32. B. Vijaya Ramnath, C. Elanchezian, RM. Annamalai, S.Aravind, T. Sri Ananda Atreya, V. Vignesh, C.Subramanian, Aluminium Metal Matrix Composites- A Review, Reviews on Advanced Materials Science 38 (2014) 55-60
33. M.H. Rahman, H.M.M.A. Rashed, Effect of Magnesium on Wear Characteristics of Silicon Carbide and Alumina Reinforced Aluminum-Metal Matrix Composites, International Journal of Scientific & Engineering Research, 5 (2014) 1210-1213
34. A. Dey, K. M. Pandey, Magnesium metal matrix composites- a review, Reviews on Advanced Materials Science 42 (2015) 58-67
35. R.D. Kissinger, D.J. Deye, D.L. Anton, A.D.C&l, M.V. Nathal, T.M. Pollock, D.A. Woodford, Superalloys, S.A. Sigman, J.J. Jackson, Titanium metal matrix composites for aerospace applications, The Minerals, Metals & Materials Society, 1996., U.S.A.
36. J.W. Kaczmar, K. Granat, A. Kurzawa, E. Grodzka, Physical properties of copper based MMC strengthened with Alumina, Archives of foundry engineering 14 (2014 ) 85-90
37. <http://www.machinedesign.com/basics-design/metal-matrix-composites> (24.07.2017.)
38. S.R. Bakshi, D. Lahiri, A. Agarwal, Carbon nanotube reinforced metal matrix composites - a review, International Materials Reviews 55 (2010) 41-64
39. Lj. Slokar, Metalurgija praha i sinter materijali, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2015. <https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-diplomskog->

studija/METALURGIJA%20PRAHA%20I%20SINTER%20MATERIJALI.pdf/view  
(24.07.2017.)

40. S. Jayalakshmi, M. Gupta, Metallic Amorphous Alloy Reinforcements in Light Metal Matrices, Springer, 2015., Singapore
41. S. Yellampalli, Carbon Nanotubes - Synthesis, Characterization, Applications, J. Kang , Direct Growth of Carbon Nanotubes on Metal Supports by Chemical Vapor Deposition, 2011.
42. J. Stein, High-performance metal matrix composites reinforced by carbon nanotubes, Proceeding book, ICCM-18, 2011., Jeju Island, S. Korea.
43. Q. Li, C.A. Rottmair, R.F. Singer, CNT reinforced light metal composites produced by melt stirring and by high pressure die casting, Composites Science and Technology, 70 (2010) 2242-2247
44. A.K. Srivastava, C. L. Xu, B. Q. Wei, R. Kishore, K.N.Sood, Microstructural features and mechanical properties of carbon nanotubes reinforced aluminium-based metal matrix composites, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences 15 (2008) 247-255

## ŽIVOTOPIS

### **OSOBNI PODACI:**

Ime i prezime: Lucia Kefurt

Datum i mjesto rođenja: 07. prosinca 1991., Zagreb

Adresa: S. i A. Radića 7, 44000 Sisak

Telefon: 044/410-273, 097/755-0069

E-mail: [kefa07@gmail.com](mailto:kefa07@gmail.com)

### **OBRAZOVANJE:**

Osnovna škola: Osnovna škola Ivana Kukuljevića, Sisak

Srednja škola: Tehnička škola Sisak, ekološki tehničar

Sveučilište: Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija, smjer Industrijska ekologija

### **VJEŠTINE:**

Rad na računalu

Strani jezik: Engleski

Vozački ispit – B kategorija

Licencirani plivački sudac HPS-a