# Primjena nanomaterijala u strojarstvu

**Čižmek, Ivan**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:870646

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

**SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA**

**PROIZVODNO STROJARSTVO**

IVAN ČIŽMEK

# PRIMJENA NANOMATERIJALA U STROJARSTVU

**ZAVRŠNI RAD**

Karlovac, 2016.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

**SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA**

**PROIZVODNO STROJARSTVO**

IVAN ČIŽMEK

# PRIMJENA NANOMATERIJALA U STROJARSTVU

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Tihana Kostadin, mag.ing.stroj.

Karlovac, 2016.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Trg J. J. Strossmayera 9
HR • 47000 Karlovac • Croatia
tel. +385 (0)47 843-510
fax. +385 (0)47 843-579
e-mail: referada@vuka.hr

# VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / **specijalistički studij**: STROJARSTVO
(označiti)

Usmjerenje: PROIZVODNO STROJARSTVO, Karlovac, 02.11.2016.

# ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: IVAN ČIŽMEK Matični broj: 01111414017

Naslov: **PRIMJENA NANOMATERIJALA U STROJARSTVU**

.....
Opis zadatka:

U radu je nakon uvoda u teorijskom dijelu potrebno opisati nanostrukturirane materijale i njihova svojstva. Također opisati metode i tehnike izrade nanostrukturiranih materijala. Zatim opisati primjenu nanotehnologije i nanomaterijala, sa posebnim naglaskom na primjenu u području strojarstva. U eksperimentalnom dijelu prikazati ispitivanje svojstava nanomaterijala, te usporedbu sa svojstvima klasičnih materijala. Na kraju napisati zaključak. Rad urediti prema pravilima VUK-a.

| Zadatak zadan: | Rok predaje rada: | Predviđeni datum obrane: |
|---|---|---|
| 02.11.2016. | 13.12.2016. | 20.12..2016. |
| ..... | ..... | ..... |
| Mentor: | | Predsjednik Ispitnog povjerenstva: |

## IZJAVA:

Izjavljujem da sam ja – student Ivan Čižmek, OIB: 20223772087 , matični broj: 0111414017, upisan u IV semestar akademske godine 2015./2016. godine, radio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć i vođenje mentorice Tihane Kostadin, mag.ing.stroj., kojoj se ovim putem zahvaljujem.

Ivan Čižmek

_____

Karlovac, 5. prosinca 2016. godine

# SAŽETAK

Nanotehnologija je znanost o malim tvarima, reda veličine nanometra. Znanost koja se bavi izučavanjem nanomaterijala podrazumijeva stvaranje, proučavanje, te manipulaciju elementima koji nisu vidljivi golim okom. Moguće je raditi male promjene u strukturi pojedinih elemenata ili materijala, te time utjecati na njihovu izvornu karakteristiku kojom su isti opisani. Takvi novonastali materijali predstavljaju evolucijski napredak svih grana znanosti i struke. Teorijski je moguće iskorijeniti bolesti, produžiti život, stvoriti novu vrstu hrane i pića, zamijeniti odjeću i obuću kvalitetnijom inačicom materijala, a sve to zahvaljujući novoj vrsti izrade i manipulacije materijala na nanometarskoj razini. Oprečno teoriji, praksa pokazuje da još nisu dovoljno razvijeni materijali kojima bi se moglo manipulirati tvarima na tako malenoj veličini, kao i ekonomska isplativost pojedinih procesa zaslužnih za dobivanje novih materijala kvalitenijih svojstava.

Eksperimentalnim dijelom rada prikazano je kako nanomaterijali imaju veoma osjetnu prednost, što se tiče karakteristika materijala gotovog proizvoda, naspram klasičnih materijala koji se koriste u svakodnevnoj upotrebi. Naravno, isto tako treba jako dobro promisliti koliko daleko se možemo upustiti u manipulaciju materijalima, te kakve posljedice bi mogle nastati neopreznim načinom upotrebe istih. Stoga je veoma važan čimbenik kod primjene nanomaterijala, poznavati utjecaj društveno-etičkih implikacija na svijest društva, te kuda nas evolucijski napredak vodi.

**Ključne riječi:** nanomaterijali, klasični materijali, manipulacija materijalima

# Application of nanomaterials in mechanical engineering


## SUMMARY

Nanotechnology is a science about small things, things that are the size measured in nanometers. It is a science that focuses on studying nanomaterials and by that it studies creating and manipulating the elements that are not visible by the naked eye. It is possible to do minor changes in the structure of the elements or materials, thus changing their original characteristics by which they are described. Those new materials represent an evolutionary progress of all aspects of today's science. Theoretically, it is possible to wipe out all desieases, prolong our life expectancy, create new types of foods and drinks and even create new types of clothing by enhancing the materials from which they are made of. All of that is possible because of the new type of manufacturing and manipulating materials on a nanometer scale. Opposed to theory, practice shows that the industry is not yet ready for that kind of progress since there are no materials developed that could manipulate matter on such a small scale. The other problem is the economic profitability of particular processes credited for obtaining new materials with better characteristics.

With the experimental part of the thesis, it is presented how nanomaterials have a very considerable advantage, as for the characteristics of the final products matter, as opposed to conventional materials that are used every day. On the other hand, we have to think about how far can we go in manipulating the materials and what kind of consequences could happen if we handle those materials recklessly. That being said, knowing the impact of social-ethical implications on our society's consciousness should be an important factor in using nanomaterials. That, and knowing where the evolution progress leads us as a society.



**Keywords:** nanomaterials, conventional materials, manipulation of materials

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA ..... I

POPIS TABLICA ..... II

POPIS OZNAKA ..... III

1. UVOD ..... 1

1.1. Povijest nanotehnologije ..... 1

1.2. Definicija nanotehnologije ..... 3

1.3. Priroda i nanotehnologija ..... 3

1.4. Budućnost nanotehnologije ..... 4

2. VRSTA KEMIJSKIH ELEMENATA ZA IZRADU NANOSTRUKTURNIH MATERIJALA ..... 7

2.1. Razvoj kemijskih elemenata ..... 7

2.2. Silicij ..... 7

2.3. Germanij ..... 8

2.4. Metali i metalne legure ..... 8

2.5. Piezoelektrični materijali ..... 9

3. METODE I TEHNIKE IZRADE NANOSTRUKTURNIH MATERIJALA ..... 10

3.1. Litografija ..... 10

3.2. Mikroelektromehanički sustavi - tehnologija izrade ..... 11

3.3. Nanoelektromehanički sustavi - tehnologija izrade ..... 12

3.4. Površinska i unutrašnja mikrooblikovanja ..... 13

3.4.1. Unutrašnja mikrooblikovanja podloge ..... 14

3.4.2. Površinska mikrooblikovanja podloge ..... 14

3.5. „Top-down“ metoda izrade nanoelektromehaničke tehnologije ..... 15

3.6. „Bottom-up“ metoda izrade nanoelektromehaničke tehnologije ..... 16

4. PRIMJENA NANOTEHNOLOGIJE ..... 17

4.1. Tehnološki procesi izrade ..... 17
4.2. Sol-gel metoda ..... 17
4.3. Nanostrukturirani materijali punog volumena ..... 20
4.4. Žilaviji i tvrđi alatni materijali ..... 20
4.5. Primjeri primjene nanostrukturiranih materijala ..... 20
4.6. Biomimetički materijali ..... 23
5. UREĐAJI U SVOJSTVU NANOTEHNOLOGIJE ..... 25
5.1. Ugljikove nanocijevi ..... 25
5.2. Fulereni (Buckyball) ..... 28
5.3. Mikroelektromehanički uređaji ..... 28
5.4. Nanoelektromehanički uređaji ..... 29
6. DRUŠTVENO-ETIČKI UTJECAJ NANOTEHNOLOGIJE ..... 31
7. POSTAVKA ZADATKA ..... 33
8. EKSPERIMENTALNI DIO ..... 34
8.1. Eksperimentalni dio istraživanja ..... 34
8.2. Mehanička svojstva ..... 34
8.3. Električna svojstva ..... 38
8.4. Magnetska svojstva ..... 42
8.5. Toplinska svojstva ..... 44
8.6. Analiza eksperimentalnog dijela rada ..... 46
9. ZAKLJUČAK ..... 48
LITERATURA ..... 50

# POPIS SLIKA

Slika 1 Primjer nanostroja ..... 1

Slika 2 Gray Goo efekt [24] ..... 2

Slika 3 Ugljične nanocijevi ..... 5

Slika 4 Primjer nanoutiskivanja (nanoimprint) ..... 11

Slika 5 Prikaz robota izrađenog MEMS tehnologijom ..... 12

Slika 6 Izgled nanorobota u krvotoku ..... 13

Slika 7 Primjer različitih metalnih mikrodijelova korištenih u industriji ..... 15

Slika 8 Top-down i Bottom-up metoda izrade ..... 16

Slika 9 Mogućnosti primjene SOL-GEL metode [20] ..... 19

Slika 10 Prikaz zastupljenosti nanotehnologije u raznim granama industrije [23] ..... 22

Slika 11 Tipovi ugljikovih cijevi ..... 25

Slika 12 Fulleren C60 [19] ..... 28

Slika 13 Izgled bioničkog stršljena u izvedbi vojne nanotehnologije [15] ..... 30

Slika 14 Dijagram naprezanja [25] ..... 35

Slika 15 Mljevenje elementarnih prahova smjese Ni-Nb ..... 36

Slika 16 Konačna veličina kristalita s različitim temperaturama taljenja ..... 37

Slika 17 Smanjenje veličine kristalita s udjelom Fe ..... 38

Slika 18 Utjecaj mikrodeformacija na otpornost materijala ..... 39

Slika 19 Ponašanje otpornosti materijala nakon grijanja i hlađenja kristalita ..... 40

Slika 20 Krivulja histereze s kombinacijama amorfnih traka ..... 42

Slika 21 Usporedba metalnih stakala s amorfnim magnetskim materijalima ..... 43

Slika 22 Temperatura taljenja zlata ..... 44

Slika 23 Temperatura taljenja kadmijevog sulfida ..... 45

Slika 24 Temperatura taljenja bakra ..... 45

# POPIS TABLICA

Tablica 1 Svojstva ugljikovih nanocijevi ..... 27

Tablica 2 Ovisnost temperature o mikrodeformacijama ..... 39

Tablica 3 Razlika otpornosti polikristalnih, nanokristalnih i amorfnih materijala..... 41

Tablica 4 Magnetska svojstva amorfnih traka sa slike 20..... 43

## POPIS OZNAKA

| OZNAKA | MJERNA JEDINICA | ZNAČENJE |
|---|---|---|
| $I_s$ | T | magnetizam zasićenja |
| $I_r$ | T | remanentni magnetizam |
| $\lambda$ | W/mK | toplinska vodljivost |
| $\rho$ | $g/cm^3$ | gustoća |
| G | $A/cm^2$ | električna vodljivost |
| $\varepsilon$ | mm/mm, % | istezanje, stupanj deformacije |
| T | K, °C | temperatura |
| t | sec, min, h | vrijeme |
| v | mm/s | brzina |
| B | T | magnetska indukcija |
| H | A/m | magnetsko polje |
| $\lambda_s$ | - | zasićena magnetostrikcija |
| $\mu_e$ | - | relativna permeabilnost |
| $T_m$ | K, °C | temperatura taljenja |
| L | nm | veličina kristalnog zrna |
| d | mm, nm, μm | promjer |
| $E$ | $N/mm^2$ | Young-ov modul elastičnosti |
| $F$ | N | sila produljenja |
| $A_0$ | $mm^2$ | poprečni presjek |
| $\Delta L$ | m | produljenje materijala |

# POPIS OZNAKA

| OZNAKA | MJERNA JEDINICA | ZNAČENJE |
|---|---|---|
| $L_0$ | m | početna duljina |
| $\sigma$ | N/mm2 | naprezanje |
| $\varepsilon$ | - | omjer produljenja i početne duljine |
| $T_g$ | K | granična temperatura |
| $T_x$ | K | krajnja temperatura |
| $\Delta T_x$ | K | razlika temperature |
| $H_c$ | A/m | koercitivno magnetsko polje |
| XRD | - | rendgenska difrakcija praha |
| $\rho_0$ | $\Omega$m | specifični električni otpor |
| k | - | koeficijent |
| MEMS | - | mikroelektromehanički sustavi |
| NEMS | - | nanoelektromehanički sustavi |
| HVOF | - | High Velocity Oxy Fuel |
| SWNTs | - | Single-Walled Carbon Nanotubes |
| MWNTs | - | Multi-Walled Carbon Nanotubes |

# 1. UVOD

## 1.1. Povijest nanotehnologije

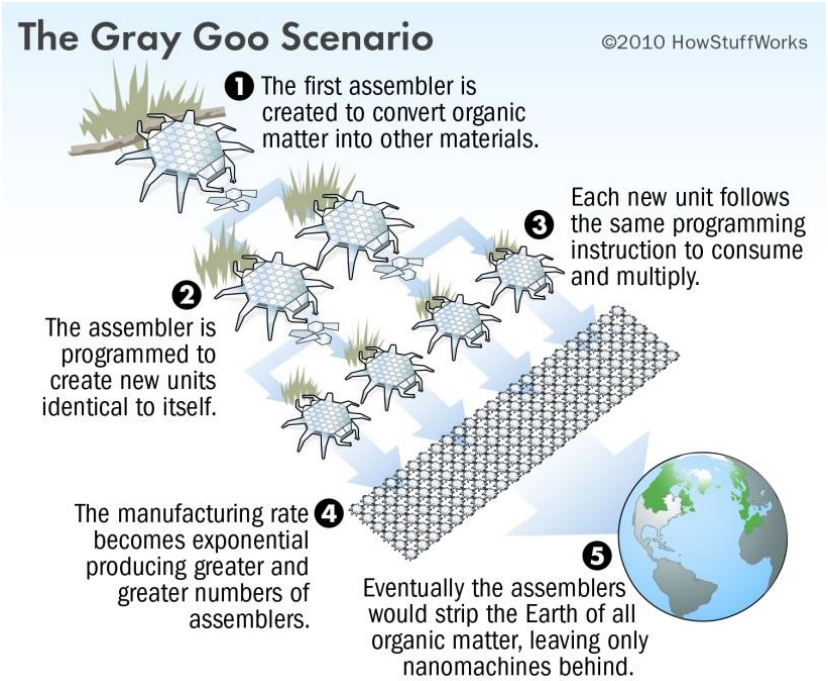
Prvi koji je objasnio pojam nanotehnologije bio je fizičar i nobelovac Richard Philips Feynman. U Kalifornijskom institutu tehnologije, 29. prosinca 1959. godine, Richard Philips Feynman održao je govor na godišnjem skupu „Američkog udruženja fizičara“ pod nazivom „Postoji mnogo prostora na dnu“. Predvidio je mogućnost preuređenja atoma i molekula prema želji. Vodeći se fizikalnim zakonima i koristeći prirodne mehanizme, prezentirao je ideju o malim strojevima koji bi mogli stvoriti tvornice za stvaranje više minijaturnih strojeva na molekularnoj razini kao što se može vidjeti na slici 1.[7]

Taj je koncept dodatno proširen deset godina kasnije, kada je fizičar Kim Eric Drexler počeo pisati o ideji mikroskopskih strojeva u znanstvenim publikacijama. Američki inženjer Kim Eric Drexler, rođen 25. travnja 1955. godine, smatra se začetnikom nanotehnologije. Naime, on je kasnih 70-tih godina razvio teoriju molekularne tehnologije koja se temelji na konceptu pozicioniranja atoma i ostvarenja samoumnožavanja već spomenutih molekularnih strojeva. Cilj tog koncepta bio je stvaranje bilo kakve željene strukture postavljanjem svakog pojedinačnog atoma na odgovarajuće mu, pripadajuće mjesto. Stvaranje takvih struktura mora biti u skladu s fizikalnim zakonima i zakonima kemije uz ekonomičnost same proizvodnje.



**Slika 1 Primjer nanostroja**

Termin nanotehnologija, K.E. Drexler, prvi je put upotrijebio 1986. godine u svojoj knjizi „Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology“ kako bi opisao pojam koji je danas poznat pod imenom molekularna tehnologija. U istoj knjizi, po prvi put, spominje se pojam „gray goo“ koji opisuje što bi se moglo dogoditi ukoliko zamišljeni samoumnožavajući mikrostrojevi izmaknu kontroli ljudi kako je prikazano na slici 2. [9]




**Slika 2 Gray Goo efekt [24]**

Prepreka kod stvaranja nanotehnologije je nedostatak učinkovitog načina stvaranja strojeva reda veličine molekula. Drexlerova ideja bila je da se izradi „assembler“, odnosno računalno vođeni nanostroj koji bi bio programiran da radi slijedeću generaciju molekularnih strojeva. Novostvoreni nanostroj imao bi ulogu stvaranja novih strojeva i tako redom. Ta ideja i dan danas nije zaživjela.[4]

## 1.2. Definicija nanotehnologije

Postoje različite vrste definicija nanotehnologije, obzirom da je to veoma širok pojam. Naime, nanotehnologija je suvremena „znanost o malom“ jer proučava svojstva materije u vrlo maloj jedinici mjere reda veličine nanometra, što je milijarditi dio metra. To je takva vrsta tehnologije zasnovana na sintezi i primjeni materijala nanoveličine, kojom se manipulira atomima i molekulama. Isto tako, nanotehnologiju možemo smatrati vještinom izrade minijaturnih stvari koje se ne mogu vidjeti golim okom već samo modernim, moćnim mikroskopima. Na taj način se izrađuju mali strojevi pomoću računalne tehnologije na način da se spaja atom po atom. U poslijednjih 20 godina nanotehnologija je doživjela ekspanzivni „boom“ u kojem se zavukla u sve pore svakodnevne primjene: odjeća, obuća, ambalaža, medicina, elektronika, strojarstvo. Uvukla se „pod kožu“ svim granama industrije, proizvodnje i farmacije, te svakim danom ima sve veći udio u primjeni kod proizvodnje i eksploatacije.

## 1.3. Priroda i nanotehnologija

Zemlja postoji već više od četiri milijarde godina i stalno se razvija i evoluira. Nakon razvoja prvih molekula počeo se formirati život jednostavnih organizama. Molekule su počele stvarati veće i kompleksnije strukture koje su zatim dobivale svoje zadaće u daljnoj evoluciji Zemlje. Prvo je nastao biljni pokrivač na zemlji, koji je omogućio stvaranje zraka pomoću fotosinteze biljaka. Na taj se način stvori omotač oko Zemlje koji je pružio zaklon od direktnog utjecaja Sunčevih zraka kao i kisik koji je potreban za život svog živog svijeta nastanjenog na kopnu. Fotosinteza je proces u kojem se energija Sunca pretvara u kemijsku energiju koja se pohranjuje u organskim molekulama. Takav način pohranjivanja Sunčeve energije vrši se većinom u biljkama, no i u nekim algama i bakterijama, odnosno u svim živim organizmima koji u svojim stanicama sadrže klorofil[1]. Daljnji proces fotosinteze odvija se u kloroplastima[2] gdje se energija svijetlosti Sunca kombinira s vodom i ugljičnim dioksidom. Produkt uloženog su ugljikohidrati, a kao nusproizvod ovog procesa nastaje kisik, bez koje

[1] Klorofil jest zeleni pigment u kloroplastima biljaka koji je odgovoran za fotosintezu

[2] Kloroplast jest vrsta plastida koji posjeduje pigmente klorofila i karotenoida, te je mjesto sinteze i skladištenja hrane kod nekih organizama

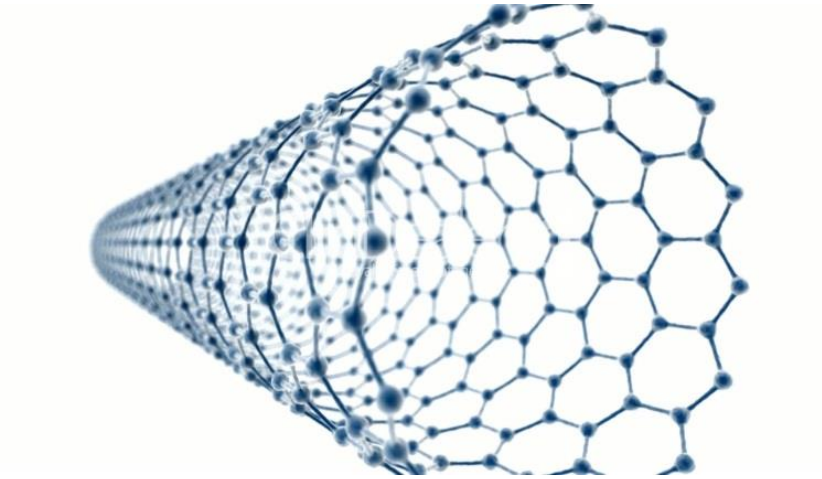
nema života na Zemlji. Upravo ti procesi, koji su važni za svaki organizam na Zemlji, vrše se na nanorazini. Tako se uočava važnost promjene struktura u mikrosvijetu na utjecaj struktura makrosvijeta. Vidi se da priroda gradi molekule na nanorazini modularnim metodama, slaganjem manjih gradbenih blokova jedan na drugi, kako bi se dobili veći i boljih svojstava. Gradbeni blokovi međusobno se povezuju kemijskim vezama kako bi stvorili jaku međusobnu vezu i ojačali ili stvorili nova svojstva. Takav prirodni „bottom-up“ proces primjenjuje se i danas u proizvodnom procesu nanotehnologije.

## 1.4. Budućnost nanotehnologije

U današnje vrijeme znanstvenici su najviše fokusirani na pronalazak različitih primjena takozvanih nanocijevi i nanonožica. Ideja je da bi nanonožice mogle pridonijeti izgradnji procesora veoma malih dimenzija kao i ostalih elektroničkih uređaja. Samim time, automobilska, elektronička, brodograđevna, zrakoplovna i ostale industrije drastično bi izmjenile izgled i funkcionalnost svojih proizvoda na višu, bolju razinu. Takav razvoj znanosti promijeniti će paradigmu znanosti koju sada smatramo suvremenom, te joj dodati dodir nečeg „svemirskog“ što se dosad moglo vidjeti samo na *sci-fi* filmovima.

Nanocijevi su cijevi veoma malih dimenzija precizno napravljene od složenih atoma ugljika za koje je opće poznato da imaju veoma zavidna svojstva materijala. Primjer nanocijevi može se vidjeti na slici 3. Najpoznatije alotropske modifikacije ugljika su grafit i dijamant. Grafit predstavlja veoma mekan materijal koji je masan, lomljiv, sive boje te provodi struju. Dok se drukčijim preslagivanjem rešetke molekule ugljika dobiva dijamant. To je najtvrđi poznati mineral na Zemlji, prozirne strukture i ne provodi struju. Jasno se vidi da kombinacije slaganja rešetki molekula mogu uroditi novim, jačim i boljim svojstvima istog elementa. Prilikom stvaranja takvih materijala, atomi se slažu po određenom i uređenom rasporedu. Obzirom da se atomi ugljika mogu slagati različitim rasporedima, tako se i dobivaju nova svojstva primjenjiva u različitim poljima industrija. Primjerice, urede li se nanocijevi na način da im se kristalne rešetke ugljika poslože na određen način, one mogu poboljšati svojstva materijala na način da isti postane i do stotinu puta čvršći od čelika, a da mu se pritom smanji težina do šest puta. Takva zavidna svojstva mogu pridonijeti u svakoj

grani industrije na svijetu. Od super snažnih automobila, brodova i zrakoplova gdje je smrtnost prilikom nesreća smanjena na svega nekoliko posto, pa do veoma malih elektroničkih uređaja koji mogu stati u svaki džep, a imaju mogućnost primjene stolnog računala. Na taj bi se način pokrenula revolucija industrije i znanosti u veoma kratkom periodu. [10]



**Slika 3 Ugljične nanocijevi**

Upravo zbog navedenih prednosti, nanotehnologija se kreće u smjeru molekularne proizvodnje. Svrha i ideja takvog načina rada je dobivanje željene strukture na makrorazini manipulirajući atomima i njihovim slaganjem na mikrorazini. Takvim formiranjem strojeva na nanorazini moguće bi bilo stvoriti kopiju bilo kakvog materijal koji se poželi: meso, sok, pamuk, željezo, drvo i ostale materijale koji korisniku padnu na pamet. Stvorio bi se i veoma velik lansirni skok u grani medicine. Raspravlja se da bi nanoroboti mogli sami raditi operativne zahvate na živim organizmima, a pritom ne ostavljati nikakve tragove niti ožiljke, dok bi ih čovjek samo nadzirao. Mogao bi se stvoriti koktel nanorobota koji imaju cilj uništiti stanice tumora u ljudskom organizmu, te bi se na taj način postotak izliječenih popeo na 100%. Samim time, sa razvojem medicine došlo bi i do produljenja života ljudske vrste čime bi se napravila prekretnica u evoluciji čovječanstva, a možda bi se i spriječilo starenje i smrt. Špekulacije znanstvenika idu toliko daleko da se spominje i krpanje ozonskih rupa, pročišćavanja vode pa sve do uništavanja smoga iz tvornica i automobila kao i proizvodnja prirodnih dobara. Nanotehnologija omogućava privid božanskih moći kojima se mogu stvarati

i uništavati svi organski i anorganski materijali na zemaljskoj kugli, čime bi ljudski rod zasigurno ostao na vrhu hranidbene piramide u ovom solarnom sustavu, a možda i šire.

Trenutno je sve to mit, ali tko zna što će biti kroz deset, dvadeset ili trideset godina? Možda mit postane stvarnost i opet se dogodi prekretnica u ljudskom životu kao u vrijeme čovjekovog prvog doticaja s vatrom, prvog viđenja kotača, prvog osvijetljenja prostorije sijalicom kao i parnog stroja. Sve u svemu, budućnost će pokazati koliko je čovjek daleko dogurao.[3][8]

# 2. VRSTA KEMIJSKIH ELEMENATA ZA IZRADU NANOSTRUKTURNIH MATERIJALA

## 2.1. Razvoj kemijskih elemenata

Jedno od važnijih dostignuća u području tehnike proteklih dva desetljeća je razvoj nanoelektromehaničke tehnologije. Napredak u tom dijelu tehnologije ostavio je iza sebe strukture i procese zasnivane na silicijskoj infrastrukturi za proizvodnju integriranih krugova. Da bi se nanoelektromehanički sustavi koristili, potrebno je dobro poznavati i razumijeti sastav materijala i njegovu funkciju u novoizgrađenom sustavu. Uređaji su dizajnirani na način da se proizvode od više različitih materijala, gdje svaki od njih doprinosi poboljšanju njemu svojstvenih funkcija u novonastalom sustavu. Na taj se način koristi samo najbolje od svih uključenih elemenata u sustav i stvara se materijal koji ima bolja svojstva od svih materijala koji su uključeni u njegov nastanak zasebno.

## 2.2. Silicij

Silicij je kemijski element koji se u prirodi ne nalazi u elementarnom stanju već u obliku silicijeva(IV) oksida i mnogih drugih silikata. Korištenje silicija potiče od 50-ih godina prošlog stoljeća, kada su otkrivena povoljna svojstva silicija (Si) i germanija (Ge). Uočilo se da kemijski elementi silicij i germanij imaju značajno bolja svojstva u odnosu na konvencionalne uređaje za mjerenje naprezanja. Razvojem metoda mikrooblikovanja rezultiralo je masovnom proizvodnjom silicijskih osjetila što je postavilo jake temelje za kasniju integraciju s integriranim krugovima za računala. Nakon razvoja integriranih krugova, kemijski element silicij smatra se primarnim elementom za korištenje mikroelektromehaničke tehnologije.

Upravo za mikroelektromehaničku primjenu najviše se koristi monokristalni silicij kao materijal za mikrooblikovanje unutar podloge zbog dobrih mehaničkih svojstava. Takav monokristalni silicij koristi se za stvaranje podloge na platformi na kojoj se proizvode nesilicijski uređaji. Svojstva monokristalnog silicija su veoma povoljna za takvo korištenje jer omogućuju stvaranje pregradbenih blokova, greda i membrana. Postoji još modifikacija

silicija koje se koristi u mikroelektromehaničkoj tehnologiji. To je, primjerice, silicijev dioksid ($SiO_2$) koji je ujedno i je jedan od najraširenijih materijala za proizvodnju pomoću mikroelektromehaničke tehnologije.

Pomoću toplinske oksidacije i kemijskog prevlačenja iz parne faze pri niskom tlaku, proizvode se silicij dioksid folije za mikrooblikovanje polisilicijskih površina. Spomenuti polisilicij je najčešće korišten kao strukturni materijal, dok je silicijev dioksid materijal koji služi za rastapanje pomoću otapala koje ne napadaju polisilicijski materijal. Nakon što se nanese tanak film, koji može biti od različitih materijala, on se depozira i selektivno ugravira kako bi se dobio željeni oblik mehaničke strukture. Kod električnih izolacija za strukturne uređaje koristi se silicijev nitrid ($Si_3N_4$). Silicijev nitrid ima svojstvo visoke postojanosti na oksidaciju, te je zbog toga veoma pogodan za primjenu kod mikroelektromehaničke tehnologije izrade električnih izolacija, graviranje nagrizanjem, površinsko pasiviziranje i na mjestima gdje je potrebna visoka kemijska postojanost.

## 2.3. Germanij

Germanij je kemijski element sivobijele boje, koji se u prirodi nalazi samo u spojevima silikata i sulfidnih ruda. Isto kao i silicij, koristi se za proizvodnju poluvodičkih uređaja. Dobiva se redukcijom iz oksida, kao sporedni produkt proizvodnje cinka iz sfalerita. Najvažnija primjena mu je u tehnici kod proizvodnje detektora i tranzistora.

## 2.4. Metali i metalne legure

Prednost metala i metalnih legura je u tome što mogu biti naneseni na uređaj koristeći široku paletu tehnika za nanošenje. Tanki metalni filmovi koriste se u gotovo svim mikroosjetilnim uređajima zbog svojih dobrih svojstava. Imaju jako dobra električna i magnetska svojstva kojima se mogu inducirati magnetska polja koja služe za pokretanje uređaja. Najpoznatiji materijali za široku upotrebu mikroelektromehaničke proizvodnje elektronskih i elektromehaničkih uređaja, svakako su aluminij i zlato zbog svojih izvanrednih svojstava vodljivosti električne energije.

## 2.5. Piezoelektrični materijali

Piezoelektrični materijali imaju svojstvo da kod mehaničkog naprezanja dolazi do induciranja napona, odnosno induciranjem razlike potencijala dobiva se mehaničko naprezanje ili pomak. Jedna strana pieozoelektričnog kristala (dielektrik) nabija se negativno, a druga strana pozitivnim nabojem. Tako kristal postaje električki polariziran. Najveća polarizacija kristala nastaje kada je naprezanje u pravcu piezoelektrične osi kristala. Ukoliko se promjeni deformacija, odnosno umjesto vlaka nastane tlak i obratno, tada se mijenja smjer polarizacije piezoelektričnog kristala. Takvo svojstvo veoma je korisno kod mikorelektromehaničke tehnologije za mehaničko pobuđivanje. Piezoelektrični materijali imaju široku primjenu korištenja. Koriste se kod radioprijemnika, sonarnih uređaja, za elektronsko skeniranje tunelirajućem mikroskopiranju, kod tintnih pisaća i dr.

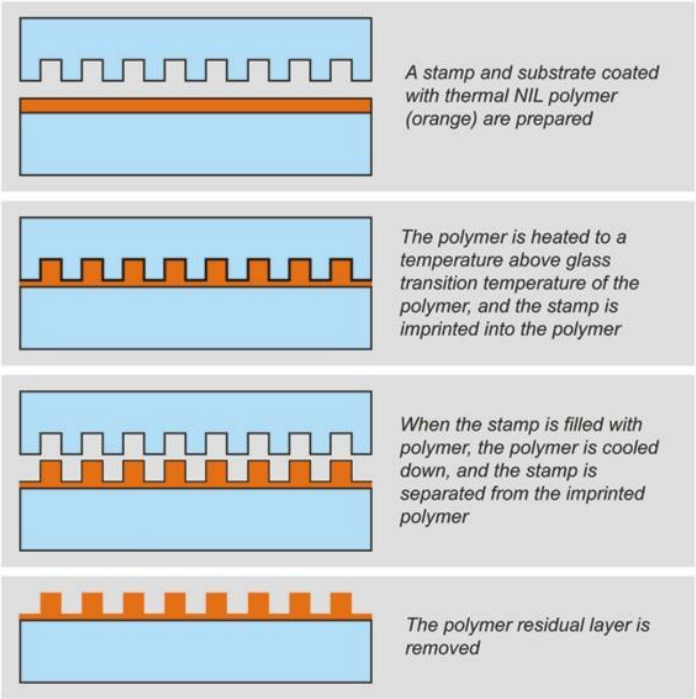
# 3. METODE I TEHNIKE IZRADE NANOSTRUKTURNIH MATERIJALA

## 3.1. Litografija

Litografija je postupak ili tehnika preslikavanja računalno generiranih uzoraka na „substract“, odnosno podlogu koja može biti od silikona, stakla, polimera i dr. Takav preslikani uzorak koristi se za stvaranje podslojnog tankog filma koji se koristi za razne namjene poput graviranja i premazivanja čiji se prikaz stvaranja može vidjeti na slici 4. Cilj je stvoriti nanostrukturne reljefne površine za područje elektronike ili npr. stvoriti nanodijelove koji će se koristiti za slaganje nanorobota.

Postoje različite metode stvaranja litografskih postupaka, a neke od njih su:

- Fotolitografija: UV zrakama, optička – najstariji postupak,
- Litografija sa snopom elektrona/iona,
- Laserom fokusirana litografija,
- Litografijia X-zrakama,
- Nano utiskivanje (nanoimprint).



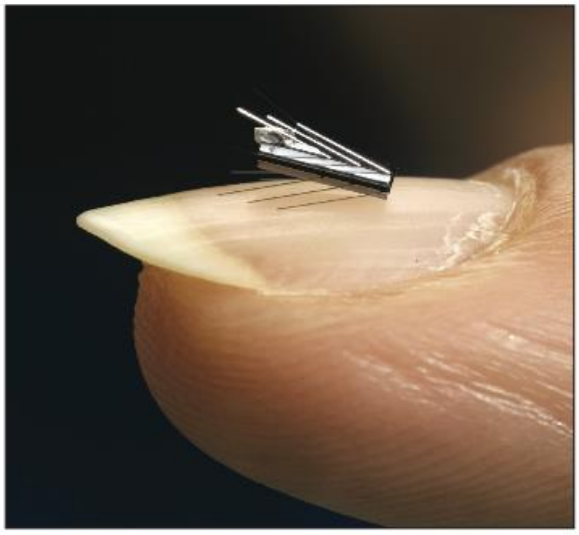

**Slika 4 Primjer nanoutiskivanja (nanoimprint)**

## 3.2. Mikroelektromehanički sustavi - tehnologija izrade

MEMS tehnologija izrade (mikroelektromehanički sustavi) može se definirati kao izrada malih komponenata koje posjeduju funkcionalnosti mehaničkih i električnih struktura. Oni su oblikovani na temelju osnova poluvodičkih struktura proizvodnje, te su sastavljeni od elemenata čije su veličine reda nekoliko mikrometara. Površinski efekti poput elektrostatike dominiraju u odnosu na volumenske efekte kao što su inercija i masa, zbog velikog omjera površina-volumen. Najčešći način proizvodnje MEMS sustava je litografija, koja se može primjenjivati u različitim oblicima litografskih postupaka.

Primjeri MEMS sustava najzapaženiji su u robotici što se može i vidjeti na slici 5. Tako je razvijen robot koji ima promjer svega 1 [mm]. Na tijelu ima nožice koje prijanjaju na unutarnje stijenke arterija u ljudskom tijelu, te se kreće brzinom od 9 [mm/s]. Za kretanje nema ugrađene motore ili kontrole, već se koristi vanjski izvor magnetskog polja kojim se robot usmjerava po krvotoku. Samo magnetsko polje koje služi za pokretanje robota po

arterijama, uzrokuje vibriranje nožica robota koje pritom čiste i odčepljuju krvotok, ukoliko ima kakvih ugrušaka.



**Slika 5 Prikaz robota izrađenog MEMS tehnologijom**

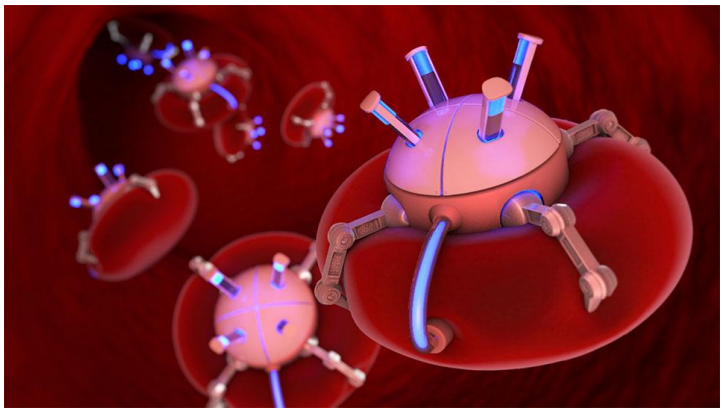
## 3.3. Nanoelektromehanički sustavi - tehnologija izrade

NEMS ili nanoelektromehanički sustavi su vrsta integriranih električnih i mehaničkih uređaja reda veličine nanometra. Takvi nanoelektromehanički sustavi predstavljaju nanosustave, nanomaterijale, nanouređaje i nanokomponente. To je tehnologija veoma malih uređaja koja se spaja na razini nano veličina. NEMS sustav smatra se napretkom baziranim na MEMS sustavu proizvodnje uređaja.

NEMS integrira nanoelektroniku s mehaničkim aktuatorima, pumpama i motorima, kao i fizičke, biološke i kemijske senzore. Ime je dobio zbog skale reda veličine nanometra, koja vodi do veoma male mase, velikih mehaničkih rezonantnih frekvencija, potencijalno velikog kvatno-mehaničkog efekta „zero-point motion“ i visoki omjer površine naspram volumenu za mehaničke senzore površine. Također se koristi za mjerače ubrzanja ili detektore kemijskih supstanci u zraku. Ključan čimbenik u NEMS tehnologiji jest mikroskop atomskih sila. Povećana osjetljivost postignuta NEMS tehnologijom vodi do manjih i više efektivnih

senzora za detekciju naprezanja, vibracija, sila na atomskoj razini i kemijskih signala. Za izradu NEMS tehnologije postoje dva komplementarna pristupa, „Top-down“ i „Bottom-up“ pristup.

Isto kao i kod MEMS sustava proizvodnje, NEMS sustavi primjenjuju se u robotici. Za razliku od MEMS robota, NEMS roboti mogu imati i vanjski i unutarnji pogon robota. Jedan od načina vanjskog upravljanja robotom je ultrazvučna metoda kojom se utvrdi trenutna pozicija robota, te ga se onda usmjerava na željeno odredište. Robot emitira ultrazvučne signale koji se detektiraju posebno dizajniranim ultrazvučnim sondama. Prikaz takve vrste nanorobota prikazan je na slici 6. Postoje još različite varijacije upravljanja robotom. Od toga da robot ispušta radioaktivnu boju u krvotok, te da ga se na taj način prati, pa do varijacije kada se na nanorobota stavlja kamera, te se odmah dobije vizualni presjek putanje robota.[11]



**Slika 6 Izgled nanorobota u krvotoku**

## 3.4. Površinska i unutrašnja mikrooblikovanja

Mikrooblikovanje je definirano kao proizvodnja mikrodijelova čije dvije najmanje dimenzije ne prelaze veličinu od 1 [mm]. Takvim način oblikovanja, naspram konvencionalnom oblikovanju, dobivaju se bolje karakteristike materijala i proizvodnih procesa na što utječu faktori veličine kristalnog zrna i hrapavost površine. Kod

mikrooblikovanja javlja se „size effect[3]“ jer primjenom oblikovanja deformiranjem, proces odlazi u područje malih mikrodimenzija, a mikrostruktura obrađivanog komada i topologija površine ostaju nepromijenjene. Bez obzira na navedeno, materijal obrađivanog komada ne može se smatrati kontinuumom obzirom da je pojedinačno kristalno zrno zauzelo velik postotak volumena. Tokom procesa, ponašanje obrađivanog materijala uvijek se ispituje za svaki proces zasebno, što nije slučaj kod konvencionalnih procesa oblikovanja. Kod MEMS tehnologije postoje dva načina mikrooblikovanja materijala. Mikrooblikovanje površine kojom se stvaraju pokretne mikrostrukture i mikrooblikovanje unutar podloge gdje se selektivno uklanja podloga.

### 3.4.1. Unutrašnja mikrooblikovanja podloge

Najstarija MEMS tehnologija oblikovanja jest mikrooblikovanje unutar podloge materijala što je čini najispitivanijom i najproučavanijom metodom oblikovanja. Ovom tehnikom se selektivno uklanja podloga obrađivanog materijala (silikon, staklo, metal, itd.), te se na taj način omogućuje stvaranje različitih mikroelektromehaničkih komponenata koje se mogu koristiti za proizvodnju raznih senzora i aktuatora. Dvije najvažnije mikroproizvodne metode koje se koriste kod mikrooblikovanja materijala unutar podloge su suho i mokro graviranje, te povezivanje podloga. Iako je najstarija metoda mikrooblikovanja materijala kod MEMS tehnologije i dalje je komercijalno najuspješnija tehnika za proizvodnju osjetila tlaka i inkjet glavi printera. Izvedbe materijala izrađenog u nanotehnologiji prikazan je na slici 7.

### 3.4.2. Površinska mikrooblikovanja podloge

Ovaj način mikrooblikovanja materijala isto tako spada u važne mikroproizvodne MEMS tehnike obrade materijala gdje se mogu stvarati gibljive mikrostrukture na vrhu silicijskih podloga. Prednosti površinskog mikrooblikovanja podloge su u tome što se mogu dobiti veoma male dimenzije obrađenih materijala koje je lako integrirati na mikročipove

[3] Size effect je efekt kod mikrooblikovanja kada su ograničenja proizvodnog procesa uvelike određena dimenzijama radnog komada na kojem se vrši postupak mikrooblikovanja

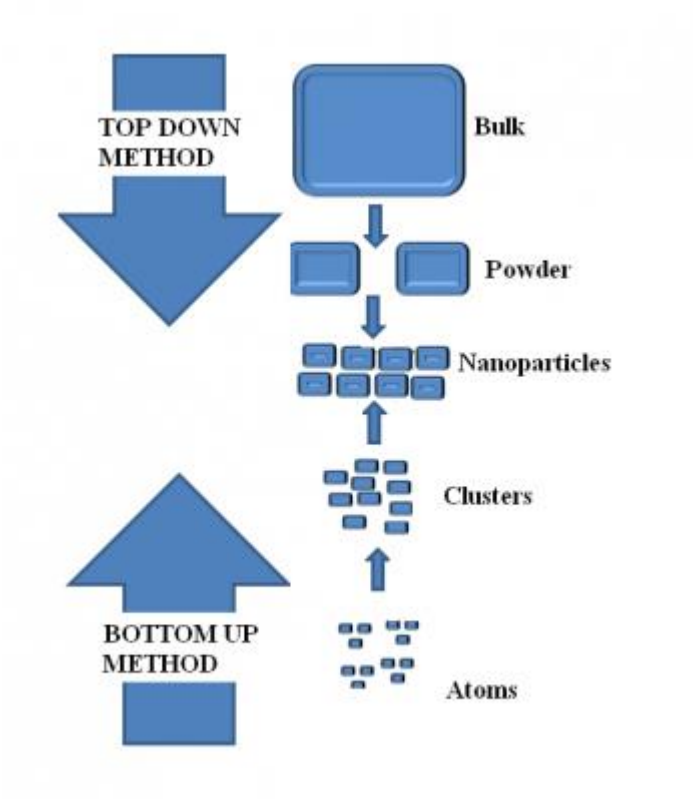
kako bi se povećala funkcionalnost samog proizvoda. No, manu proizvoda predstavlja činjenica da se može staviti ograničen broj slojeva na obrađivanu površinu, te se na taj način gubi mogućnost željenog povećanja površine dodatnim slojevima. Tehnika mikrooblikovanja vrši se na način da se nanosi tanki sloj strukturnih filmova na tzv. „žrtveni sloj“ ($SiO_2$) koji se naknadno ugravira, što dovodi do stvaranja gibljivih mikromehaničkih struktura.



**Slika 7 Primjer različitih metalnih mikrodijelova korištenih u industriji**

## 3.5. „Top-down“ metoda izrade nanoelektromehaničke tehnologije

Ovaj tip metode za izradu NEMS tehnologije koristi makromaterijale kako bi stvorio materijale nano veličine. Postoje različite tehnike za obradu materijala pomoću navedene metode, a najčešće su: litografija, nagrizanje materijala, mehaničko drobljenje i inženjering pomoću mikroskopa atomskih sila. Prednosti ovakve metode izrade tehnologije su što omogućuje masovnu proizvodnju nanomaterijala. No, mana ovakve metode je što kod obrade nastaju značajna kristalografska oštećenja i što je površina obradivog materijala nesavršena. Isto tako problem nastaje kada materijal smanjimo na red nano veličine. Tada svi alati koji se koriste za obradu postaju preveliki, te se više ne može njima manipulirati materijalom. Također se prilikom obrade unosi dodatni unutarnji stres na materijal koji se obrađuje.




**Slika 8 Top-down i Bottom-up metoda izrade**

## 3.6. „Bottom-up“ metoda izrade nanoelektromehaničke tehnologije

Ovakva metoda izrade NEMS tehnologije predstavlja način izrade koji iz mikrosvijeta stvara makrosvijet. Nanočestice se veoma male veličine, te se ne mogu obrađivati nikakvim mehaničkim alatima. Zbog toga se koristi ova metoda koja omogućuje spajanje manjih čestica nano veličine u gotov materijal koji može biti obradiv strojem. Ovakav pristup izrade materijala daje veću mogućnost stvaranja materijala s manje nepravilnosti i veće homogenosti kemijskih kompozicija. Prednost „Bottom-up“ metode izrade naspram „Top-down“ metodi je što ne unosi unutarnji stres u materijal. Primjer metode izrade prikazan je na slici 8. [16]

# 4. PRIMJENA NANOTEHNOLOGIJE

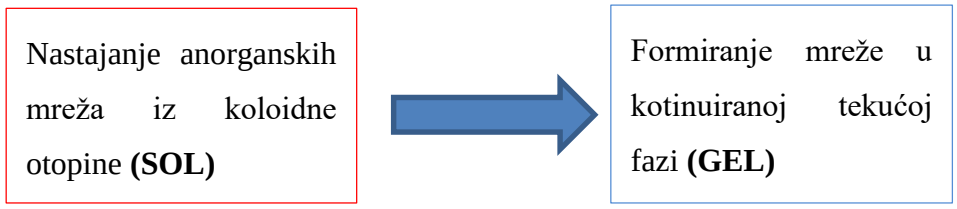
## 4.1. Tehnološki procesi izrade

Kod izrade nanotehnoloških materijala koristi se čitav slijed tehnoloških procesa i postupaka koji su posebno razvijeni za potrebe pojedine izvedbe nanostrukturiranih materijala. Čestice reda veličine nanometra imaju veoma veliku površinsku energiju, pa teže gomilanju i adsorpciji stranih čestica, odnosno na svoju graničnu površinu vežu molekule plina i otopljene tvari iz otopina. Takvi učinci javljaju se kod prahova i kod kompaktiranja nanostrukturnih materijala. Prahovi se mogu proizvesti iz 3 faze: čvrste, parne i tekuće faze. Upravo zbog toga javlja se potreba za veoma visokim kontrolnim postupcima. Mehaničkim legiranjem visokoenergetskim postupkom mljevenja čestica povećava se ekonomičnost izrade nanostrukturnih materijala. Problemi nastaju kod kompaktiranja praha u čvrste dijelove pa se često koriste postupci bez praha za proizvodnju nanomaterijala. Kod takve proizvodnje čestice se direktno talože sol-gel postupkom ili iz plinske faze. [20]

## 4.2. Sol-gel metoda

Sol-gel proces nastanka nanostrukturnih materijala omogućuje stvaranje organsko-anorganskih hibrida koji mogu biti u obliku: prahova, vlakana, membrana, slojeva, kompozitnih struktura i drugih oblika materijala. Postupak je otkriven krajem 19. stoljeća, no interes za njim se pojavio tek sedamdesetih godina prošlog stoljeća kada se počinju koristiti monolitni anorganski gelovi na niskim temperaturama i pretvoreni u staklo bez visokotemperaturnih postupaka taljenja. Ovim postupkom mogu se stvoriti homogeni anorganski metalni oksidi koji imaju zadovoljavajuća svojstva tvrdoće, optičke prozirnosti, kemijske i toplinske otpornosti, te željene poroznosti. Na slici 9 prikazana je mogućnost primjene SOL-GEL metode. [20]

# SOL – GEL




Koloidna otopina kojom se radi postupak geliranja sastoji se od veoma sitnih čestica, koje imaju promjer od 1 [nm] do 1 [μm], a jednoliko su suspendirane po koloidnoj suspenziji tekućine u krutini koju predstavlja gel. Za takav postupak najboljim prekursorima[4] pokazali su se metalni alkoksidi jer brzo reagiraju s vodom.

Takav postupak osigurava velik broj mogućnosti za industrijsku primjenu kao jedne od metoda za formiranje prevlaka na različitim materijalima podloga, a samim time ima velik broj prednosti.

Prednosti **SOL-GEL** metode:

- Visoka čistoća prekursora,
- Visoka homogenost prevlake,
- Dobivanje vrlo glatke prevlake,
- Mogućnost prevlačenja velikih površina,
- Visoka fleksibilnost i laka izvodljivost,
- Niska temperatura postupka,
- Ekonomičnost.

[4] Prekursor je polazni materijal za sintezu koloida, a sastoji se od metala okruženog različitim reaktivnim ligandima (atomi vezani na centralni atom)




**Slika 9 Mogućnosti primjene SOL-GEL metode [20]**

Iz slike 9, jasno se vidi da je sol-gel postupak primjenjiv u gotovo svim granama industrije kao i znanosti. Takav postupak ima veoma velik potencijal, ne samo u proizvodnji prevlaka kontrolirane poroznosti već i kod proizvodnje čestica kontrolirane veličine koje se kasnije mogu koristiti u postupku naštrcavanja plazmom ili HVOF postupkom[5]. [17]

[5] HVOF postupak (High Velocity Oxy Fuel) je postupak naštrcavanja koji koristi toplinsku energiju nastalu eksplozijom plinovite smjese

## 4.3. Nanostrukturirani materijali punog volumena

Dimenzije strukturnih faza i konstituenata ovakvih materijala reda su veličine molekula ili atoma, odnosno manji od 100 [nm]. Za razliku od konvencionalnih materijala koji imaju manji udio graničnih površina, nanostrukturirani materijali imaju veći postotak graničnih površina što dovodi do poboljšanja mehaničkih i funkcionalnih svojstava. Obzirom na navedeno, nanomaterijali se mogu gledati kao da se sastoje jednom polovicom od kristalne faze, a drugom polovicom do pjenaste faze koja se prostire po granici zrna, te se tu atomi mogu slobodno kretati. Na taj se način omogućava lakša razgradnja naprezanja uslijed vanjskog opterećenja, a samim time se i smanjuje širenje nastalih napuklina. Upravo ta činjenica je posebno važna u području primjene kod krhkih materijala kojima se povećava žilavost.

## 4.4. Žilaviji i tvrđi alatni materijali

Nanokristalni materijali koji su na osnovi kemijskih elemenata volframovih (W), tantalovih (Ta) i titanovih (Ti) karbida imaju znatno veću tvrdoću, otpornost na abrazijsko trošenje[6] i eroziju, što dovodi do činjenice da su trajniji od postojećih materijala. Navedene činjenice omogućavaju sniženje troškova obrade materijala i povećanje njihove produktivnosti.

Zbog smanjenja mikroelektroničkih elemenata za izvedbu su potrebna mikroglodala koja se izrađuju od navednih karbida (promjeri glodala su reda veličine 100 [μm] i manji).

## 4.5. Primjeri primjene nanostrukturiranih materijala

Nanostrukturirani materijali imaju veoma široku primjenu u svakoj grani industrije diljem svijeta. Tako, primjerice, u automobilskoj industriji koriste se konstrukcijske keramike

[6] Abrazijsko trošenje je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama

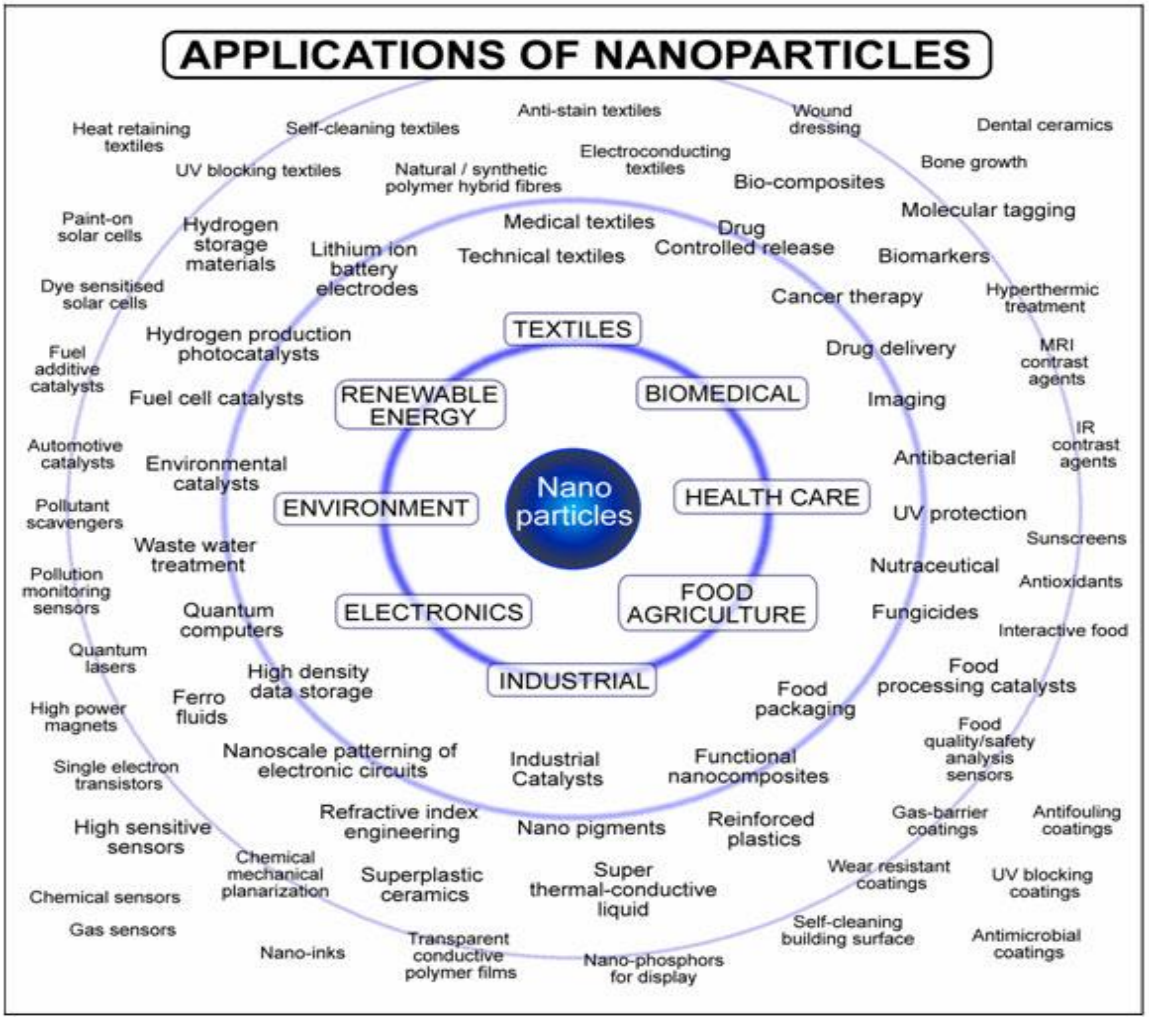
i keramički kompoziti, a za proizvodnju visokočvrstih opruga i kuglastih ležajeva koriste se nanokristalni SiC i $Si_3N_4$. Koriste se zbog svoje dobre oblikovljivosti i obradivosti, a uz to su sadržana ostala izvrsna svojstva keramike kao što su: visoka tvrdoća, visoka tlačna i savojna čvrstoća, veća otpornost na puzanje, viši modul elastičnosti, nižu toplinsku i električnu vodljivost, malu gustoću, kemijsku inertnost i dr. Zatim se još koriste za gume s nanopunilima (čestice $SiO_2$), reflektirajući nanoslojevi na krovu karoserije, keramičke prevlake na cilindrima motora, osjetljivi senzori od nanostrukturiranih materijala i ostale.

Poznato je da se povećanjem rezolucije dobiva kvalitetnija slika na zaslonu. Obzirom da se rezolucija zaslona sastoji od piksela ili fosforescenata, njihovim smanjenjem dobiva se kvalitetniji prikaz slike na zaslonu. Koristeći nanokristalne Zn-selenide, Zn-sulfide, Cd-sulfide i Pb-teluride, sol-gel postupkom može se smanjiti fosforescent i povećati rezolucija. To će dovesti do pojeftinjenja i razvoja televizora visoke rezolucije ekrana, kao i do pojeftinjenja prijenosnih računala.

Trajnost konvencionalnih i obnovljivih vrsta baterija je veoma mala, a ugrađuju se u sve vrste električnih uređaja – prijenosna računala, mobilne uređaje, igračke, satove, medicinsku opremu i dr. No, upotrijebe li se nanokristalni materijali koji su sintetizirani sol-gel procesom, mogu se izraditi ploče za baterije pjenaste strukture koje bi mogle spremiti puno veću količinu energije zahvaljujući svojstvima aerogela. Kao takve, imale bi veću specifičnu površinu, te bi ih trebalo rjeđe puniti.

Nanokristalni materijali imaju ekstremnu osjetljivost na promjenu uvjeta okoline. Zbog tog svojstva mogu se upotrebljavati za izradu visokoosjetljivih senzora. Senzori mjere parametre kao što su električni otpor, toplinska vodljivost, udaljenost, magnetska permeabilnost i dr., a čije vrijednosti veoma ovise o grubosti, odnosno veličini zrna od kojih je izrađeno osjetilo senzora. Što je manja specifična površina zrna materijala kod osjetilnih senzora, to je senzor osjetljiviji na promjene nastale u okolini. Nanostrukturirani materijali velikim dijelom primijenjivi su i u strojarstvu. Primjerice snažni magneti od nanokristalnih itrij-samarij-kobalta i drugih rijetkih metala koriste se za izradu alternatora za automobile, brodskih turbina i motora, mjernih uređaja za magnetsku rezonanciju, električnih generatora, podmornica, analitičke opreme i sličnih stvari zbog svojih specifičnih svojstava. Naime, kod magneta se privlačnost mjeri jakošću magneta, odnosno njegovom koercitivnošću i zasićenjem magnetiziranja, remanencijom. Što se više smanji zrno materijala od kojeg se izrađuje magnet to je njegova specifična površina manja, a privlačnost veća. Isto tako,

nanotehnologija se koristi u zrakoplovnoj industriji. Kod zrakoplova je nužno da im dijelovi budu čvrsti, žilavi, dugotrajni i otporni na umor, odnosno dinamička izdržljivost. Na temelju tih parametara osigurava se pouzdanost i sigurnost zrakoplovnog prometa. Da bi se postigli zahtjevani uvjeti, koristi se nanotehnologija slično kao i kod snažnih magneta. Zrna od kojih se sastoji materijal izrade pojedinih elemenata zrakoplova razbijaju se na sitnije čestice kako bi im se specifična površina smanjila i kako bi se dobila kompaktnija masa čija je izdržljivost veća 2 do 3 puta u odnosu na klasične materijale. Novonastali dijelovi nisu samo jači i čvršći, već i imaju veću toplinsku otpornost materijala. Obzirom na svoja fantastična svojstva, nanomaterijali imaju važnu primjenu i u svemirskom programu za izradu svemirskih letjelica koje su izvrgnute vrlo visokim temperaturama. Na slici 10 prikazana je zastupljenost nanotehnologije u raznim granama industrije.




**Slika 10 Prikaz zastupljenosti nanotehnologije u raznim granama industrije [23]**

## 4.6. Biomimetički materijali

Postoji interdisciplinarno područje koje spaja i objedinjuje znanja iz medicine, kemije, biologije i strojarstva kao dijela koji nudi konstrukcijska rješenja. To područje naziva se materijalna bionika. Zamisao biomimetičkih materijala jest korištenje prirodnih struktura i sustava kao uzorka za tehničko modeliranje sustava. U prirodi ima velik broj generiranih fizikalno/kemijskih efekata koji predstavljaju uzore tehničkim sustavima, a najpoznatiji primjer je bioluminiscencija[7] raznih životinja. Priroda je kroz milijune godina razvijala i stvarala savršene oblike alata za preživljavanje živih organizama koji predstavljaju veoma inteligentna i primjenjiva rješenja za opstanak pojedinih vrsta. Upravo tako mogu se gledati slonove kljove, ježeve bodlje, kornjačin oklop, paukova mreža i koža morskog psa. Sve navedeno su savršeno, evolucijski oblikovani alati za preživljavanje životinjskih vrsta koji imaju bezgrešnu nanostrukturiranu biološku strukturu. Gledajući tako savršeno razvijen sustav preživljavanja, čovjek se dosjetio da bi mogao oponašati takav prirodni sustav i strukturu živih organizama. Problem je što se u većini slučajeva ne može napraviti „direktan“ transfer tehnologije na određeni materijal ili strukturu svijeta tehnike, već se zbog toga koriste principi konstruiranja onoga što je priroda sama napravila. Stoga, to se radi pomoću slijedećih koraka:

- razumijevanje svojstava materijala i transportnih sustava bioloških stanica i tkiva,
- izrada biološkog sustava „u malom“ kako bi se mogli vršiti teorijski i eksperimentalni postupci iz kemije i fizike,
- stečeno znanje na sustavima „u malom“ upotrijebiti za razvoj novih vrsta materijala,
- primjena novorazvijenih materijala u medicini, farmakologiji i inženjerstvu.

[7] Bioluminiscencija je hladno svijetljenje u živih organizama koji procesom izmjene tvari proizvode energiju, što se gotovo potpuno pretvara u svjetlost, a samo se neznatan dio pretvara u toplinu

Navedenim metodama stvore se novi materijali koji imaju svojstva slična onima iz prirode, koja su stvorena kroz milijune godina iskustva i prepravaka. Tako su stvoreni materijali poput čička, koji je jedan od najzastupljeniji takvih novostvorenih materijala na bazi prirode. Čičak, odnosno samoljepljiva vrpca, ima mogućnost spajati dva različita komada odjeće i do nekoliko stotina put. To je omogućilo razvoj proizvodnje obuće i odjeće. To je jedan od najpoznatiji transfera prirodne tehnologije u umjetno stvorenu tehnologiju. Zatim primjer iz medicine gdje se proizvodi umjetna koža. Polyactive je sintetski elastomer, biorazgradivi proizvod, koji služi kao porozni nosač na kojem se stvaraju dermisi i epidermisi živih stanica. Na taj način se dobiva umjetno uzgojena koža koja se može koristiti prilikom transplatacije kože za prikrivanje raznih vanjskih oštećenja kao što su: čirevi, ožiljci, opekline i rane.

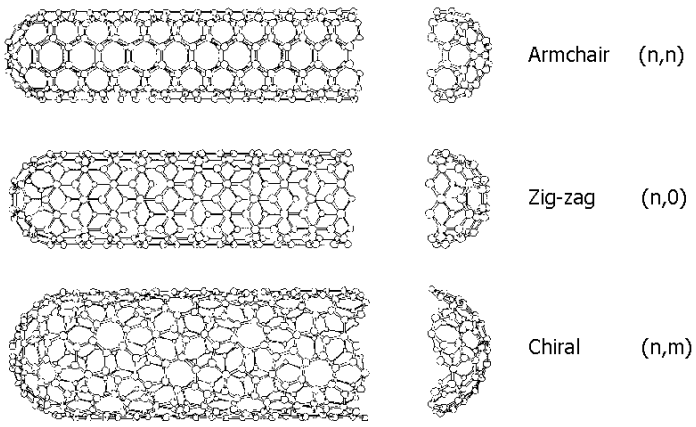
Biomimetička tehnologija se toliko komercijalizirala da se više ne koristi samo u zdravstvene svrhe, već i u sportskoj industriji. Napravljena su posebno dizajnirana plivačka odijela, kostimi, koji imaju sličnu teksturu površine kao i morski psi. Naime, struktura materijala tih kostima je takva da se na odijelu rade okomiti vršci od smole, suprotno usmjereni od smjera plivanja. Time se dobiva da je odijelo prilikom prolaska ruke u jednu stranu glatko, a u drugu stranu hrapavo. Na taj se način postiže efekt gdje okomiti vršci stvaraju vodene vrtloge, što dovodi do toga, da voda bolje prianja uz tijelo plivača zbog smanjenja debljine hidrodinamičnog graničnog sloja, te rezultira smanjenjem otpora vode. Takva se pojava naziva „riblet-efekt“ i čini plivače konkurentnijim i evolucijski naprednijim naspram onih koji ne posjeduju takva odijela.

# 5. UREĐAJI U SVOJSTVU NANOTEHNOLOGIJE

## 5.1. Ugljikove nanocijevi

Ugljikove nanocijevi jedan su od najzaslužnijih materijala za današnju popularnost nanotehnologije. Otkrio ih je japanski fizičar Sumio Ilijima 1991. godine. Izrađene su od atoma ugljika koji je raspoređen u šesterokutnu ravnu mrežu koja na svojim čvorovima ima atome, a savijena je u malenu cijev koja ima oblik šupljeg cilindra. Cilindri su obično zatvoreni polu-fulerenskim strukturama na krajevima cijevi. Cijevi mogu biti konstruirane na način da imaju jednu ili više stjenki, mogu biti poluvodiči ili vodiči, te mogu biti usukane ili ravne. Postoje tri tipa ugljikovih cijevi kako je i prikazano na slici 11:

- Armchair cijevi,
- Zig-zag cijevi,
- Spiralne (chiral) cijevi.




**Slika 11 Tipovi ugljikovih cijevi**

Ta tri tipa ugljikovih cijevi imaju različite simetrije. Ugljikove cijevi mogu biti dugačke do nekoliko stotina nanometara, a neki ih smatraju posebnim oblicima fulerena. Kada se proizvode makroskopske inačice materijala građenih od ugljikovih nanocijevi, one se slažu jedna do druge tako da tvore trokutastu rešetku, ili u snopove. Takav način slaganja naziva se jednostjene nanocijevi ili Single-Walled Carbon Nanotubes (SWNTs).

Postoji druga inačica slaganja ugljičnih nanocijevi. Radi se na način da se nanocijevi manjeg polumjera stavljaju u nanocijevi većeg polumjera i tako redom prema najvećim

oblicima nanocijevi. Takav način slaganja naziva se višestjene nanocijevi ili Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWNTs).[18]

Proizvodnja ugljikovih nanocijevi vrši se slijedećim postupcima:

- Postupak električnim lukom,
- Laserska ablacija[8],
- Kemijska depozicija iz parne faze.

## POSTUPAK PROIZVODNJE NANOCIJEVI ELEKTRIČNIM LUKOM

Znanstvenici NEC Fundamental Research Laboratory-a, Thomas Ebbesen i Pulickel Madhavapanicker Ajayan, 1992. godine prvi su objavili postupak dobivanja makroskopskih količina nanocijevi. Nanocijevi su nastale na način da su stvorili električni luk između grafitnih elektroda, te je ugljik ispario rekombinirajući se 30% u nanocijev. Postupak je proveden pod visokim temperaturama, a metalni katalizator[9] je omogućio da grafitna elektroda može proizvesti jednostjene nanocijevi s malim brojem strukturnih defekata ili čak bez njih. Nastale cijevi su različitih i malih dimenzija.

## POSTUPAK PROIZVODNJE NANOCIJEVI LASERSKOM ABLACIJOM

Na Rice sveučilištu u SAD-u, Richard Smalley i suradnici, snažnim impulsima lasera obasjali su grafitne štapove, te su uz odgovarajuće katalizatore usavršili proizvodnju velikih količina jednostijenih nanocijevi kojima se može kontrolirati promjer. Taj postupak iskorištava 70% ugljika iz grafitnih štapova, ali je i najskuplji obzirom da se za pokus moraju koristiti laseri koji su visokog cijenovnog ranga.

[8] Ablacija je uklanjanje materijala s površine nekog objekta

[9] Katalizator je spoj koji ubrzava odvijanje kemijske reakcije, ali u njima ne sudjeluje

## POSTUPAK PROIZVODNJE NANOCIJEVI KEMIJSKOM DEPOZICIJOM IZ PARNE FAZE

Na Shinshu sveučilištu u Japanu, znanstvenik Morinobu Endo, prvi je uspio proizvesti nanocijevi kemijskom depozicijom iz parne faze. Radi se na način da se u peći grije supstrat[10] dok se izvana dovodi plin koji sadrži ugljik. Dovodom plina u peć, on se raspada, a ugljik se rekombinira u nanocijevi na supstratu. Iskorištava se velik dio ugljika, od 20 do 100%, a djelomično se može i kontrolirati rast nanocijevi. Prednosti ovog postupka su jednostavnost i ekonomičnost, dobivaju se veće nanocijevi, ali su pretežno višestjene i s defektima. Čvrstoća je u prosjeku $\frac{1}{10}$ čvrstoće na istezanju dobivene postupkom u električnom luku. U tablici 1 prikazana su svojstva ugljikovih nanocijevi.

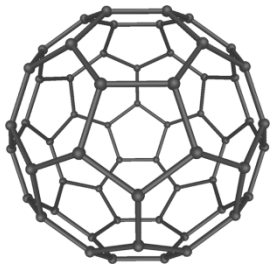
**Tablica 1 Svojstva ugljikovih nanocijevi**

| **Svojstva ugljikovih nanocijevi** | |
|---|---|
| **Promjer** | od **0,6** do **1,8** [nm] |
| **Duljina** | od **1** [μm] do **1** [mm] |
| **Gustoća** | od **1,33** do **1,40** g/cm$^3$ |
| **Čvrstoća na istezanje** | najmanje 10x veća od čvrstoće legiranog čelika |
| **Čvrstoća na pritisak** | dva reda veličine veća nego kod vlakana kevlara |
| **Tvrdoća** | oko **2000** [GPa], odnosno 2x više nego kod dijamanta |
| **Elastičnost** | mnogo veća od metala i ugljičnih vlakana |
| **Toplinska vodljivost** | >**6000** [W/mK] |
| **Temperaturna stabilnost** | u vakuumu do **2800**[°C], na zraku do **750**[°C] |
| **Električna vodljivost** | **1 000 000 000** [A/cm$^2$] |

[10] Supstrat je molekula koja ulazi u enzimsku kataliziranu kemijsku reakciju

## 5.2. Fulereni (Buckyball)

Znanstvenici Robert Curl, Harold Kroto i Richard Smalley, otkrili su fulerene 1985. godine. Fulereni su šuplje, kavezne, kuglaste molekule koje se ubrajaju u nanostrukture, a sastoje se od najmanje 60 atoma ugljika kako je prikazano na slici 12. Mogu se pronaći u obliku šuplje sfere, elipsoida ili cijevi. Loptasti fulereni nazivaju se „buckyballs“, dok se cilindrični nazivaju „buckytubes“. Otkriće fulerena značajno je povećalo broj poznatih ugljikovih alotropskih modifikacija, koji su do njegovog otkrića bili ograničeni na dijamant, grafit i amorfne ugljike (ugljen i čađ).[19]



**Slika 12 Fulleren C60 [19]**

## 5.3. Mikroelektromehanički uređaji

MEMS tehnologija izrade pruža veoma povoljna svojstva kod minijaturizacije elektromehaničkih uređaja i sustava koji nisu mogući za izraditi se u takvom mjerilu konvencionalnim pristupom obrade materijala. Takva tehnologija pruža stvaranje uređaja malih dimenzija s izvrsnim karakteristikama. Mali gubitak snage, mala masa, vrlo male dimenzije, veća preciznost i brzina, sve su to prednosti ovog načina obrade materijala naspram konvencionalnih obrada. Tako da, može se reći da mikroelektromehanički sustavi imaju veoma veliku i važnu ulogu u komunikacijskom prometu, potrošačkoj proizvodnji, automatizacijskim procesima, zdravstvu i ostalim djelatnostima koje se svakodnevno koriste. Obzirom na svoju važnu ulogu u proizvodnim sustavima, MEMS uređaji zauzimaju poziciju u proizvodnji komponenti koje su najkritičnije za obavljanje rada nekog sustava. To su raznorazna osjetila i elektronika. Primjer takvog tipa osjetila jest giroskop.

Giroskop je mjerni uređaj inercijskog osjetila koji mjeri kut rotacije. To je rotirajući disk koji je obješen, najčešće, u dva okvira koji se nalaze na kućištu giroskopa. Rotacija diska

proizvodi inerciju koja os rotacije diska, zbog nedostatka nekih vanjskih smetnji, zadržava u usmjerenom pravcu u prostoru. Osim mogućnosti rotacije, mjerni instrument ima još jedan stupanj slobode kretanja, te mu je na taj način osigurana velika preciznost i precesija[11]. Primjena ovakvog tipa mjernog instrumenta je svakidašnja i koristi se za veoma različite sustave. Tako na primjer, koristi se u vojne svrhe za dizajniranje projektilnih glava raketa. Na glavu rakete, prilikom leta, djeluje otpor zraka, te je projektil primoran vrtiti se oko svoje osi kako bi smanjio djelovanje utjecaja vanjskih sila na promjenu njegove putanje. Zatim se još koristi u zrakoplovnoj i brodograđevnoj industriji za proizvodnju girokompasa. Kompas mora uvijek biti u horizontalnoj osi sa Zemljom kako bi mogao točno prikazivati pravac sjever-jug. U novije vrijeme koristi se i u automobilskoj industriji , industriji proizvodnje mobilnih uređaja za stabilizaciju kamera i niz drugih grana industrije.

### 5.4. Nanoelektromehanički uređaji

NEMS uređaji još nisu doživjeli puni odjek u proizvodnoj industriji. Ideja njihove implemenatacije je spajanje raznih grana inženjerstva s bioznanostima, no takav način suradnje tih grana znanosti još nije u potpunosti izvediv. Ovakav tip tehnologije usko je vezan za tehnologiju mikroelektromehaničkih sustava koji će ju, nakon što zaživi „punim plućima“, zamijeniti i baciti u zaborav. Specifičnost NEMS tehnologije i uređaja je u tome što omogućava izradu elektromehaničkih dijelova/uređaja na submikrometarskoj veličini mjerila. Upravo to svojstvo uređaja omogućava njihovo korištenje u sustavima velikih preciznosti gdje je bitna veoma velika efikasnost, kao što su razna osjetila iz područja biologije, kemije i fizike. Trenutno najveći potencijal NEMS izvedbe uređaja vidi se u medicini. Predviđa se da bi se uvelike mogla smanjiti smrtnost i povećati vijek života prisustvom nanotehnologije u zdravstvu. Izrađuje se niz robota reda veličina nanometra koji imaju mogućnost ploviti ljudskim tijelom, te otklanjati uzročnike bolesti kao što su, primjerice, stanice tumora. Nanouređaji bi se ugradili u živi organizam i svakodnevno očitavali stanje ljudskog tijela, imunitet, zasićenost kisikom, udio vode u tijelu, udio vitamina, krvni tlak i dr.

Na temelju dobivenih izmjera, svakodnevno će se stvarati baza podataka kod liječnika, te će on u svakom trenutku vidjeti postoje li bilo kakve indikacije bolesti u tijelu pacijenta i na

[11] Precesija je pravilna promjena smjera osi rotirajućega tijela koja nastaje kada na tijelo djeluje vanjski moment sile

taj način preduhitriti samu bolest. Obzirom da je to još u inicijalnoj fazi primjene, cijena takvih uređaja i tehnologije je veoma visoka. No, u skorijoj budućnosti može se očekivati takav način simbioze u životu ljudi s mehanikom. Što se tiče ostalih grana industrije, NEMS tehnologija izvedbe uređaja isto tako pruža velike mogućnosti primjene i iskoristivosti. Primjerice, već se dosta radi na usavršavanju vojnog dijela industrije pokrivenog velom nanotehnologije. U tu domenu industrije spadaju elektrotehnika i strojarstvo. Tako se primjerice razvio materijal koji upija i do 99% svijetlosti što ima veoma važnu ulogu u ratovanju kod prikrivanja i maskiranja utvrđenih vojnih objekata, opreme i vojske. Razni nanosenzori koji su postavljeni na opremu vojnika omogućuju mu da u svakom trenutku prati svoje tjelesne zalihe energije, zalihe streljiva i vode koju nosi implementiranu u svoju opremu. Sama vojna odijela izrađena su od nanomaterijala koji omogućavaju veću pokretljivost na teško pristupačnim terenima, bolje odbijanje svijetlosti, jaču apsorpciju tjelesnih tekućina, veću otpornost na udarce i vanjsku ugrozu, te najvažniji segment, lakša su. Pancirke nove generacije imaju puno veću zaustavnu moć zrna protivničkih vatrenih oružja nego prijašnje inačice. To omogućava veći postotak preživjelih na terenu, a daju i veći osjećaj moći.

Bionički stršljen, jedno je od noviji „čuda“ tehnike proizvedenih u vojne svrhe prikazan je na slici 13. To je bespilotni uređaj veličine stršljena koji ima električni pogon. Služi za detektiranje protivničke žive sile i njihovi formacija u boju. Ima mogućnost detektiranja, fotografiranja, slanja podataka, a čak i neutraliziranja protivničke žive sile. Može se s potpunim pravom reći da je to smrtonosna naprava koja je sagrađena od nanometarskih elemenata, kako bi mogla prolaziti kroz uske gradske prolaze, a da ne ostane zapažena. Tvorac ovog nano projekta je izraelska vojna industrija i kao takva, uvela je svijet u potpuno novi futuristički oblik ratovanja.[15]



**Slika 13 Izgled bioničkog stršljena u izvedbi vojne nanotehnologije [15]**

# 6. DRUŠTVENO-ETIČKI UTJECAJ NANOTEHNOLOGIJE

Razvojem nanotehnologije došlo je do pitanja uzročno-posljedične veze napretka i rizika prilikom stvaranja novih vrsta tehnoloških procesa. Prilikom stvaranja mikroelektromehaničkih i nanoelektromehaničkih materijala i tehnologije, uvidjelo se kako će ti isti proizvodi iz korijena promijeniti način života svakog kućanstva, proizvodnje, znanosti i medicine. Upravo takva ovisnost o novoj vrsti tehnologije koja će pregaziti svaki dosadašnji oblik tehnološkog utjecaja na razvoj čovječanstva, zabrinjava pojedine skupine ljudi koje smatraju da takav oblik tehnologije ne donosi samo pozitivne rezultate za budućnost čovječanstva, već takav vid tehnologije treba uzimati s veoma velikom dozom opreza.

Nanotehnologija predstavlja minijaturizirani svijet koji nije vidljiv golim okom, a omogućuje pohranu nekoliko desetaka kilometara arhivske dokumentacijske građe na čip veličine zrna graška. Velika je to prednost kod izgradnje portabilnog sustava za svakog pojedinca na svijetu, koji može u svakom trenutku plaćati račune, komunicirati, naručivati namirnice, obavljati liječničke preglede, podizati lijekove i niz drugih stvari, prislanjajući samo čip na skener u nekom od centara predviđenih za transakciju podataka. Ideja je da se čip ugradi na bilo koji lakoprenosivi predmet koji je uvijek pri ruci, npr. prsten, te se na taj način omogući jednostavna i brža transakcija podataka. Za razliku od današnjeg vremena, u kojem svaki stanovnik Zemlje mora imati lisnicu sa svom pripadajućom dokumentacijom, novcima, raznim karticama i ostalim predmetima koji samo stvaraju nespretnost i nelagodu prilikom prenošenja u torbama i džepovima. Problem takvog vida tehnologije predstavlja razina sigurnosti čuvanja vlastitih podataka od kriminalnih organizacija koje bi se mogle okoristiti istima. Internet je najbolji primjer za podvući paralelu s nanotehnološkim dostignućima. Internet omogućava lak pristup informacijama iz gotovo svih domena svijeta, te na taj način omogućava napredak svih polja znanosti, no nažalost i kriminalnih ćelija koje iskorištavaju slabosti sigurnosnog sustava. Omogućen je brži prijenos i pristup podacima, što se gotovo podjednako koristi i u dobre i u loše svrhe.

Veliku opasnost predstavlja špijunaža korporacijskih podataka, krađa identiteta, krađa novca digitalnim putem što radikalno umanjuje vrijednost same svrhe postojanja interneta. Međutim, bez obzira na sve nedaće koje dolaze s internetom, bez njega se ne može. Internet se uvukao u sve pore poslovnog, znanstvenog i privatnog sektora ljudi. Postao je glavni alat za svjetsku ekonomiju, trgovinu, medicinu, školstvo čak i komunikaciju. Danas rijetko tko

nema profil na društvenim mrežama ili nekim drugim javnim servisima. Bez digitalne inačice vlastitog života, čovjek sve više pada na marginu društva i tone u crnilo zaborava. Nije problem što su ljudi međusobno povezani putem mreže, problem nastupa kad drugi ljudi mogu imati uvid i utjecaj na tuđi život. U današnje vrijeme veoma se lako prati djecu, bračne partnere, prijatelje i susjede putem GPS sustava na mobilnim uređajim. U svakom trenutku se zna gdje se tko od njih nalazi, što malo podsjeća na zatvorske GPS sustave koji se stavljaju zatvornicima oko nogu kako bi se mogli locirati u slučaju napuštanja sigurnosne zone. Internet omogućava čovjeku bolju vidljivost, pokretljivost, zabavu, edukaciju i poslovanje, ali ga ostavlja golog i ranjivog na kiši metaka kriminalnih ćelija koje vrebaju iza svakog ugla. Isto vrijedi i za nanotehnologiju. Pružena je velika količina dobrih i korisnih ideja koje se mogu implementirati u svakidašnji život, ali samo jedna loša i zlonamjerna stvar koja omogućava penetraciju u osobne podatke neke osobe ili tvrtke može pokopati tisuću dobronamjernih odrađenih zadaća. Upravo to je razlog velikoj dvojbi oko implementacije nanotehnologije u život ljudi, jer koliko god da nas tehnologija ojača, toliko nam može štete i učiniti.

No, ne treba sve gledati kroz digitalnu obradu podataka, može se uzeti i primjer iz medicine. Izradom nanorobota omogućeni su razni operativni zahvati koji smanjuju mogućnost pogreške i do nekoliko desetaka puta. Operacije su brže, sterilnije, preciznije i lakše za izvedbu. Samim time može se raditi na povećanju dugovječnosti života, te time napraviti revolucionarni korak u povijesti čovječanstva. Ali svaka oštrica ima dvije strane. Nanotehnologija se počela koristiti i u vojne svrhe za izradu veoma malih dronova koji mogu biti ubojiti na nekoliko desetaka, pa čak i stotina kilometara. Izmislit će se inačice koje će moći uništavati protivničku živu silu u njihovom vlastitom kampu. Nikome nije sumnjiv dron veličine muhe ili ose koja leti zrakom. Takve stvari predstavljaju opasnost po život bilo u ratnim ili mirnodopskim vremenima. Naizgled se prolongira život u sterilnim medicinskim uvjetima, dok se s druge strane svijeta vode nanoratovi u makrosvijetu. Tanka je granica za prelazak na lošu stranu prosudbe, a koja može biti pogubna po život čovječanstva.

Svjetski znanstveni i tehnički instituti trebaju istraživati potencijal nanomaterijala, ali svakako trebaju razmisliti u uvođenju pojedinih restrikcija kako se ne bi kroz nekoliko godina našli na klizavom terenu.

# 7. POSTAVKA ZADATKA

U ovome završnom radu opisani su nanomaterijali koji se primjenjuju u strojarstvu. Nakon teorijskog dijela završnog rada, prikazan je eksperimentalni dio rada u kojem se radi usporedba nanomaterijala s klasičnim materijalima za upotrebu u strojarstvu. Obzirom na nedostatak materijala potrebnog za ispitivanje, proveden je analitički pristup usporedbe provedenih ispitivanja kako bi se prikazala kvaliteta materijala izvedena u nanotehnološkom procesu izrade. Nakon usporedbe materijala slijedi analiza, te zaključak.

# 8. EKSPERIMENTALNI DIO

## 8.1. Eksperimentalni dio istraživanja

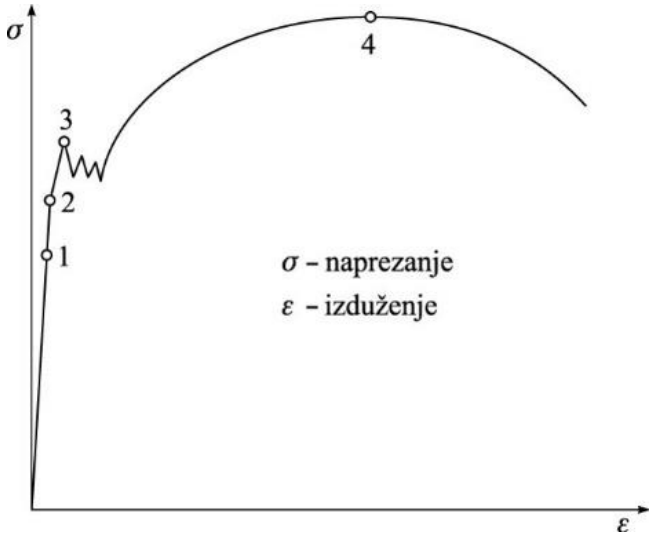
Eksperimentalni dio istraživanja prikazuje kakve se karakteristike nanomaterijala mogu dobiti različitim vrstama obrade materijala, kao i prednosti u odnosu na ostale vrste materijala koje se koriste u iste svrhe. Istraživanja su pokazala da nanomaterijali u usporedbi s drugim vrstama materijala imaju povoljnija i kvalitetnija svojstva za izradu i upotrebu istih. Mehanička, električna, magnetska i toplinska svojstva samo su neka od niza karakteristika u kojima nanotehnologija prednjači u odnosu na konkurentne materijale.

## 8.2. Mehanička svojstva

Obradom eksprimentalnog materijala, odgovarajućim tehnološkim postupcima, dobiva se željeno strukturno stanje materijala koje daje očekivana mehanička svojstva. Strukturno stanje materijala utječe na mehanička svojstva materijala. Ukoliko je poznata mikrostruktura materijala, moguće je unaprijed odrediti mehanička svojstva eksperimentalnog materijala koristeći određene parametre. Youngov modul elastičnosti je mjera krutosti materijala koja se određuje omjerom vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije, u linearnom ili elastičnom dijelu dijagrama naprezanja.

$$\mathrm{E} = \frac{\text{vlačno naprezanje}}{\text{produljenje}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{\mathrm{F}}{\mathrm{Ao}}}{\frac{\Delta \mathrm{L}}{\mathrm{Lo}}} = \frac{\mathrm{FLo}}{\mathrm{Ao}\Delta \mathrm{L}}$$

Krutost materijala predstavlja važno svojstvo materijala zbog određivanja sigurnosti i stabilnosti konstrukcija u strojarstvu. Što je razmak između kristalnih zrna materijala manji, odnosno gdje je veza između atoma jača, veći je Youngov modul elastičnosti. Za prikaz mehaničkih naprezanja materijala koristi se dijagram naprezanja prikazan na slici 14. Dijagram prikazuje međusobnu ovisnost vlačnog naprezanja i relativnog produljenja materijala, kako je navedeno u formuli Youngovog modula elastičnosti. Može se vidjeti kako se u materijalu koji je opterećen određenom silom *F*, stvaraju naprezanja $\sigma$ koja utječu na rastezanje materijala i promjenu njegove izvorne veličine.



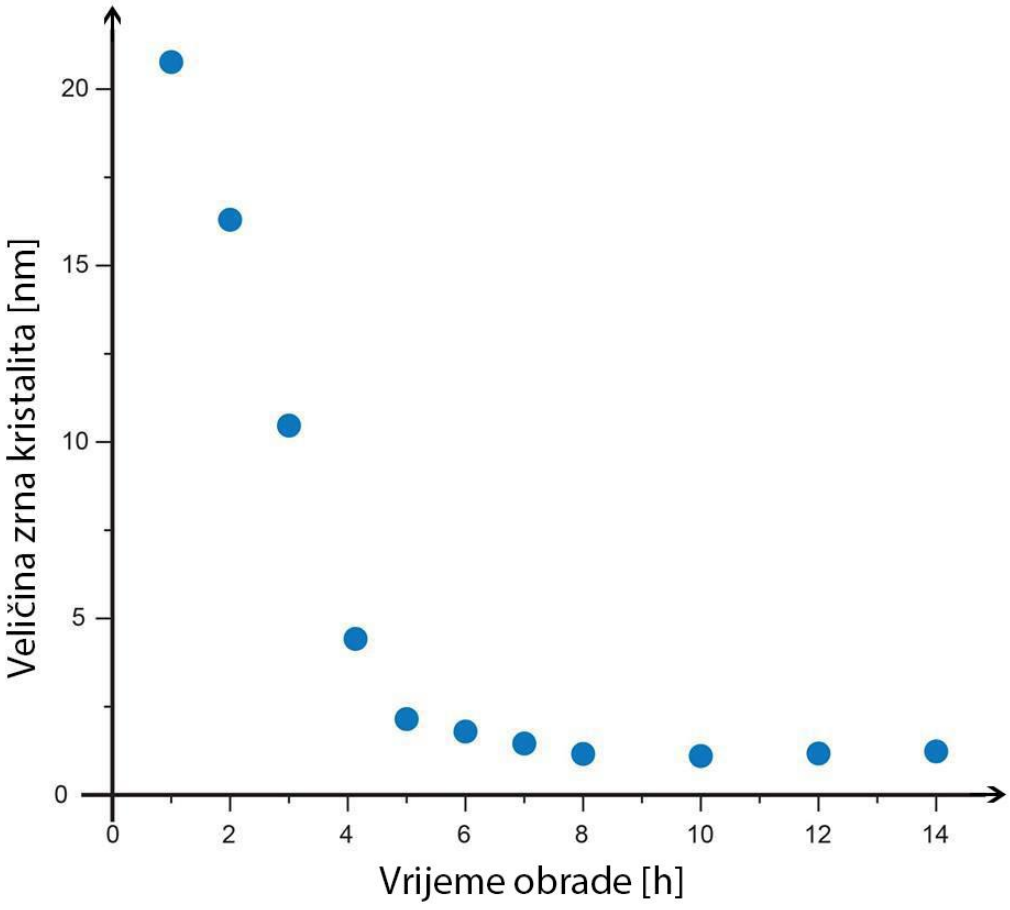

**Slika 14 Dijagram naprezanja [25]**

Na slici 14 prikazano je naprezanje po fazama. Točka 1 predstavlja granicu proporcionalnosti do koje se materijal rasteže razmjerno opterećenju kojim se djeluje na njega. To područje deformacija materijala predstavlja elastične promjene, kod kojih se materijal nakon prestanka djelovanja vanjske sile vraća u prvobitni položaj. Točka 2 predstavlja granicu elastičnosti materijala. Ukoliko sila opterećenja na materijal dovede do deformacije koja prelazi granicu elastičnosti, materijal se više ne može vratiti u prvobitno stanje. Zbog toga točka 2, granica elastičnosti, predstavlja najvažniju osobinu kod konstrukcije materijala, jer je to granica do koje se mogu opteretiti materijali, a da ne izgube svoja izvorna elastična svojstva. Točka 3 predstavlja granicu razvlačenja materijala. Nakon prelaska granice elastičnosti, produljenja materijala i dalje rastu, ali nisu proporcionalna s djelovanjem sile, te se javlja zona velikih i trajnih deformacija. Točka 4 predstavlja vlačnu čvrstoću materijala. Nakon razvlačenja materijala, dolazi se do točke na koju djeluje najveća sila *F*. U toj točci materijal još nije fizički slomljen, no naknadnim djelovanjem manje sile, dolazi do deformacija suženja materijala. Kontrakcijom materijala dolazi do smanjenja presjeka istog, te se dolazi u područje loma gdje se materijal razdvaja.

Poznato je da sitnozrnata struktura materijala rezultira većom gustoćom, te da daje bolja mehanička svojstva kao što su: čvrstoća, tvrdoća, duktilnost i sl. Takav pristup temelji se na postojanju granica kristalnog zrna, odnosno zaprekama gibanju dislokacija unutar materijala. Dislokacije ili razdvojbe, predstavljaju linijske poremećaje koji nastaju na granicama između skliznutih i neskliznutih dijelova kristalne rešetke. Kada dislokacije dođu do granice zrna,

gomilaju se, te im je potrebna dodatna energija kako bi savladale prepreku i nastavile gibanje. Na taj način dolazi do porasta granice razvlačenja. Da bi se spriječio efekt razvlačenja materijala, kristalno zrno eksperimentalnog materijala mora biti što sitnije, što rezultira većim brojem kristalnih zrna materijala i većim brojem duljina granica kristalnih zrna. Usitnjenjem kristalnog zrna na nanometarsku razinu, dobiva se na očvrsnuću materijala koje rezultira povećanjem duktilnosti materijala.[21][22]

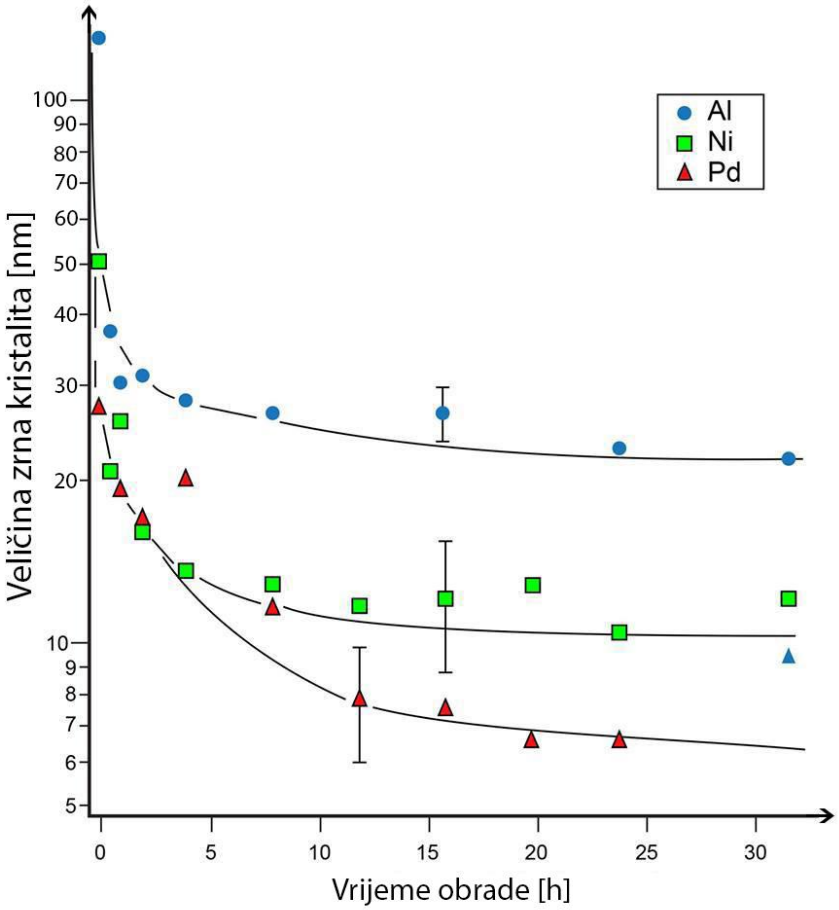
Prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava metodom legiranja/drobljenja na smjese elementarnih prahova Ni-Nb veličina kristalnog zrna smanjuje se na razinu veličine 2[nm], te se daljnjom obradom materijala drobljenjem ne može dobiti sitniji, odnosno finiji kristalit kako je prikazano na slici 15.




**Slika 15 Mljevenje elementarnih prahova smjese Ni-Nb**

U slučaju da se materijal počinje amorfizirati, linije difrakcije postaju preširoko udaljene za primjenu Debye-Scherrerove relacije. Debye-Scherrerova metoda (metoda praška) je metoda kod koje je uzorak polikristal čija je valna duljina „$\lambda$“ konstantna, te se mijenja kut zbog toga što u polikristalima postoji velik broj kristalita koji imaju različite orijentacije tako da se u svakom trenutku zadovoljava Braggova relacija.

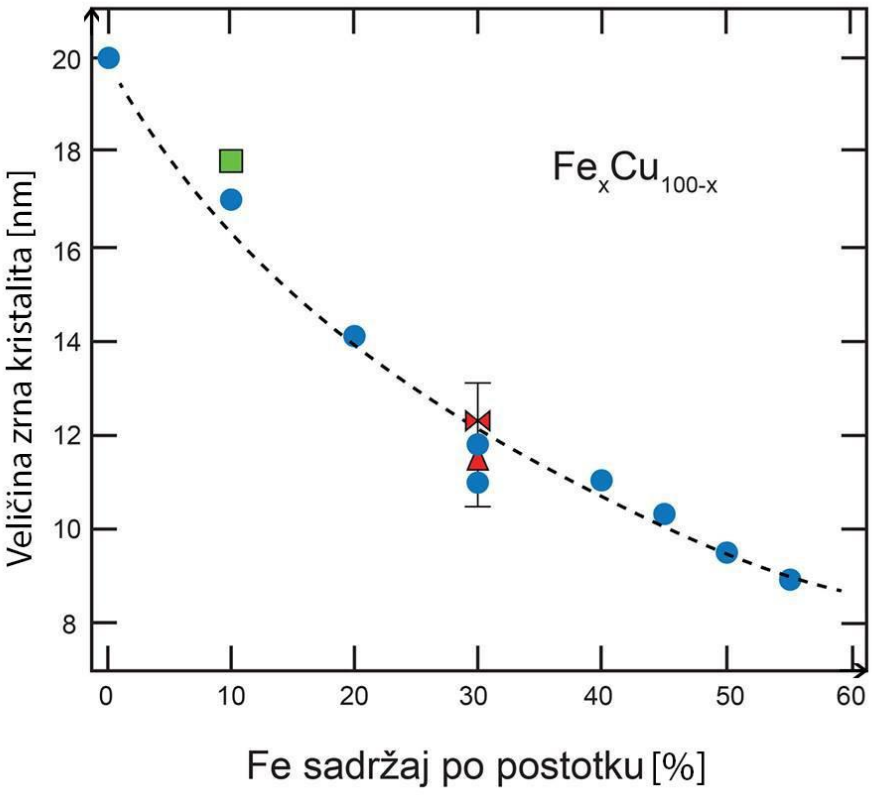
Braggova jednadžba $n\lambda=2d_{hkl}\sin\theta$, je jednadžba kojom se na jednostavan način mogu povezati razmak između susjednih ravnina skupina „$d_{hkl}$“ u kristalu materijala i difrakcijskog kuta. Dolazi se do zaključka da je konačna veličina zrna kristalita manja s porastom temperature taljenja materijala $T_m$ što se jasno može vidjeti iz slike 16.[13]




**Slika 16 Konačna veličina kristalita s temperaturama taljenja za različite elemente**

Isto tako vrijedi da je materijal tvrđi što mu je veličina kristalnog zrna manja. Opće je poznato da su metali s većom temperaturom taljenja tvrđi, a lakše se i lome. Stoga, usporedi li

se ista smjesa materijala, ali različite koncentracije, poveća li se udio Fe u smjesi Cu-Fe, primjećuje se smanjenje veličine kristalnog zrna s udjelom Fe kako je vidljivo na slici 17 . No, u skladu sa slikom 16, zaključuje se da se povećanjem udjela Fe u relaciji Cu-Fe smanjuje veličina zrna kristalita, te bakar postaje manje plastičan.[13]

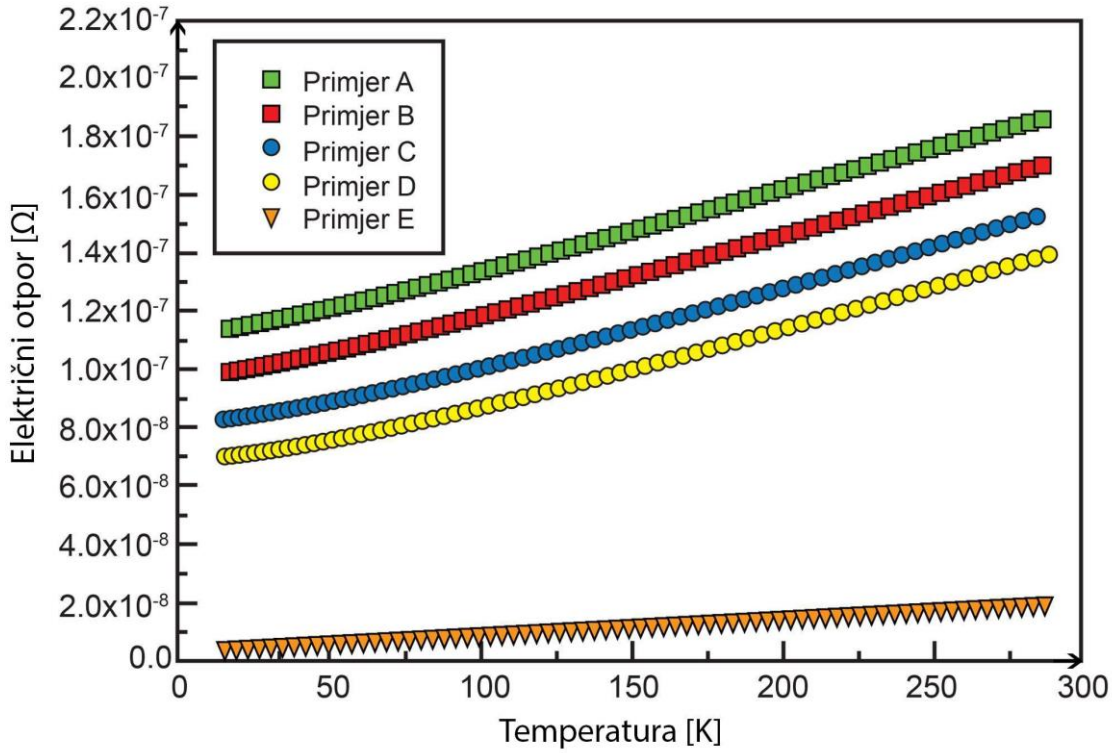



**Slika 17 Smanjenje veličine kristalita s udjelom Fe**

## 8.3. Električna svojstva

Kod električnih svojstava materijala proučava se kako djeluje veličina zrna kristalita na električnu otpornost materijala. Elektroni se raspršuju na defektima materijala uzorka (različiti udjel nečistoća, dezorijentacije kristala, broj dislokacija,...), te se povećava električna otpornost materijala. Mjereći otpornost materijala na električnu vodljivost kod nanotehnologijom obrađenog bakra, koja se dobila magnetskim raspršenjem, može se uočiti

velika ovisnost električne otpornosti o deformacijama materijala. Vidljivo je da se električna otpornost materijala smanjuje smanjenjem deformacija materijala na tablici 2 i slici 18.



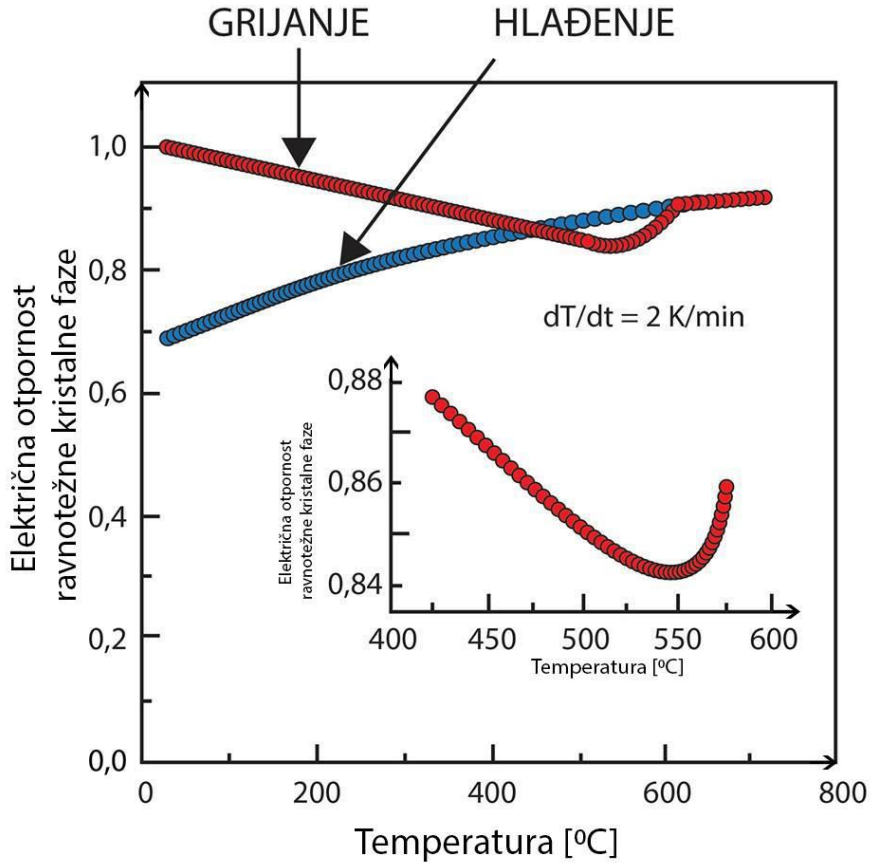

**Slika 18 Utjecaj mikrodeformacija na otpornost materijala**

**Tablica 2 Ovisnost temperature o mikrodeformacijama**

| Uzorak | $\frac{D\ [nm]}{XRD}$ | $\frac{D\ [nm]}{T\ [^0C]}$ | $(\varepsilon^2)^{\wedge 1/2}$ [%] | $\rho_0$ [Ωm] | k |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 10±5 | 19 | 0.242±0.006 | $1.15x10^{-7}$ | 2 |
| B | 10±4 | 21 | 0.206±0.007 | $9.79x10^{-8}$ | 1.99 |
| C | 10±3 | 22 | 0.163±0.005 | $8.41x10^{-8}$ | 1.99 |
| D | 12±4 | 22 | 0.141±0.006 | $7.18x10^{-8}$ | 1.99 |
| E | - | 350 | 0 | $2.49x10^{-9}$ | 3.78 |
| Ref. | - | 1000 | - | $2.9x10^{-9}$ | - |

Primjerice, kod prvih mjerenja metalnih stakala pokazalo se da imaju veću električnu otpornost od kristalnih materijala istog kemijskog sastava. Otpornost im je 100 do $300x10^{-8}$ [Ωm], odnosno 2 do 3 puta veća od materijala istog kemijskog sastava. Na slici 19 prikazan je primjer obavljenog mjerenja slitine $Pd_{80}Si_{20}$ iz 1967. godine. Kod kristalnih materijala vidi se da ravnotežna faza prikazuje kako otpornost linearno raste s temperaturom do tališta, a zatim dolazi do skokovite promjene otpornosti. No, kod amorfnih materijala otpornost sporo raste s povećanjem temperature, te se prilikom kristalizacije vraća na kristalno ponašanje.

Iz navedenog može se zaključiti kako je prilikom kristalizacije materijala otpornost svedena na minimalnu vrijednost, koja je ispod vrijednosti električne otpornosti ravnotežne kristalne faze. Isto tako, može se zaključiti kako su dijelovi krivulje koji se odnose na tekuće i amorfno stanje materijala, mogu zajedno spojiti glatkom krivuljom. To dovodi do spoznaje da su amorfne slitine povezane s tekućim stanjem. Obzirom da je to mjerenje provedeno 1967. godine, kasnija mjerenja su dokazala da otpornost staklastih legura pada s povećanjem temperature kako je prikazano na slici 19.[13]




**Slika 19 Ponašanje otpornosti materijala nakon grijanja i hlađenja kristalita**

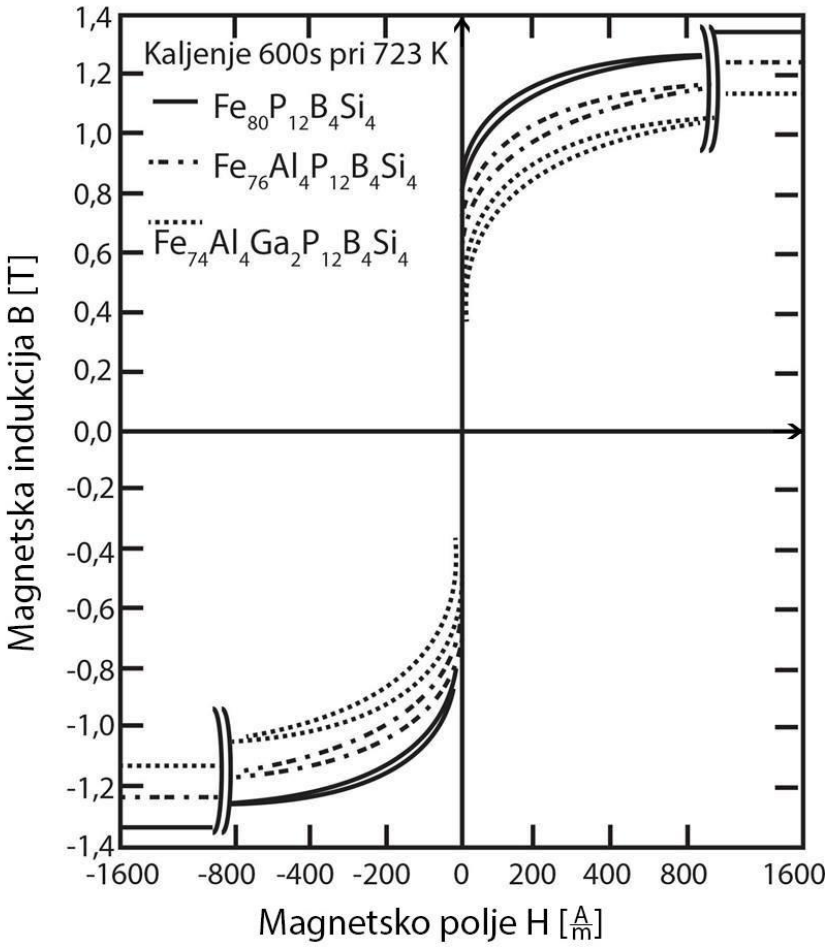
Prikaz razlike otpornosti amorfnih, polikristalnih i nanokristalnih materijala može se vidjeti u tablici 3.[13]

**Tablica 3 Razlika otpornosti polikristalnih, nanokristalnih i amorfnih materijala**

| Metal i slitina | Grubo zrnati uzorak [nm] | Veličina kristala [nm] | Otpornost [$10^{-8}$ Ωm] (slova označavanju uzorke na slici 18) | Srednja vrijednost mikrodeformacije $(\varepsilon^2)^{\wedge 1/2}$ [%] |
|---|---|---|---|---|
| FCC Cu | Prihvaćena vrijednost | | 0.167 | - |
| FCC Cu | 1000 | - | - | - |
| FCC Cu | 350 | - | - | - |
| FCC Cu | - | 12 | $7.2^{D}$ | 0.141 |
| FCC Cu | - | 10 | $8.4^{C}$ | 0.163 |
| FCC Cu | - | 10 | $9.8^{B}$ | 0.206 |
| FCC Cu | - | 10 | $11.5^{A}$ | 0.242 |
| FCC Cu | - | 20 | 18 | - |
| FCC Au | - | 10 | 16 | - |
| FCC Ni | - | 15 | 20 | - |
| BCC Ta (α-Ta) | - | 20 | 40 | - |
| B-Ta | - | 32 | 265 | - |
| Amorfni Ta | - | - | 275 | - |
| Amorfno $(N_{35}Zr_{75})_{88}W_{12}$ | - | - | 180 | - |
| Amorfno $Fe_{72}Y_6B_{22}$ | - | - | 235 | - |
| $Co_{63}Fe_9Zr_8B_{20}$ | - | - | 188 | - |
| $Co_{56}Fe_{16}Zr_8B_{20}$ | - | - | 170 | - |

## 8.4. Magnetska svojstva

Prilikom kristalizacije pojedinih feromagnetskih metalnih stakala, stvaraju se nanokristalne magnetske faze koje su ugrađene u samu osnovnu amorfnu matricu. Velika potencijalna primjena mekih magnetskih materijala rezultirana je zahvaljujući koegzistenciji magnetske i amorfne faze. Takvi fazno povezani materijali nazivaju se nanostrukturni amorfni materijali. Kod ispitivanja se ispituju različiti materijali čiji se uzorci pripremaju ultrabrzim kaljenjem iz taljevine, odnosno mehaničkim legiranjem elementarnih prahova kod nekih materijala. Za sam proces potrebno je ustanoviti uvjete kristalizacije kako bi se mogli dobiti nanokristali željene odgovarajuće veličine. Na slici 20 prikazana je krivulja histereze koja ima 3 vrste kombinacija amorfnih traka.[13]



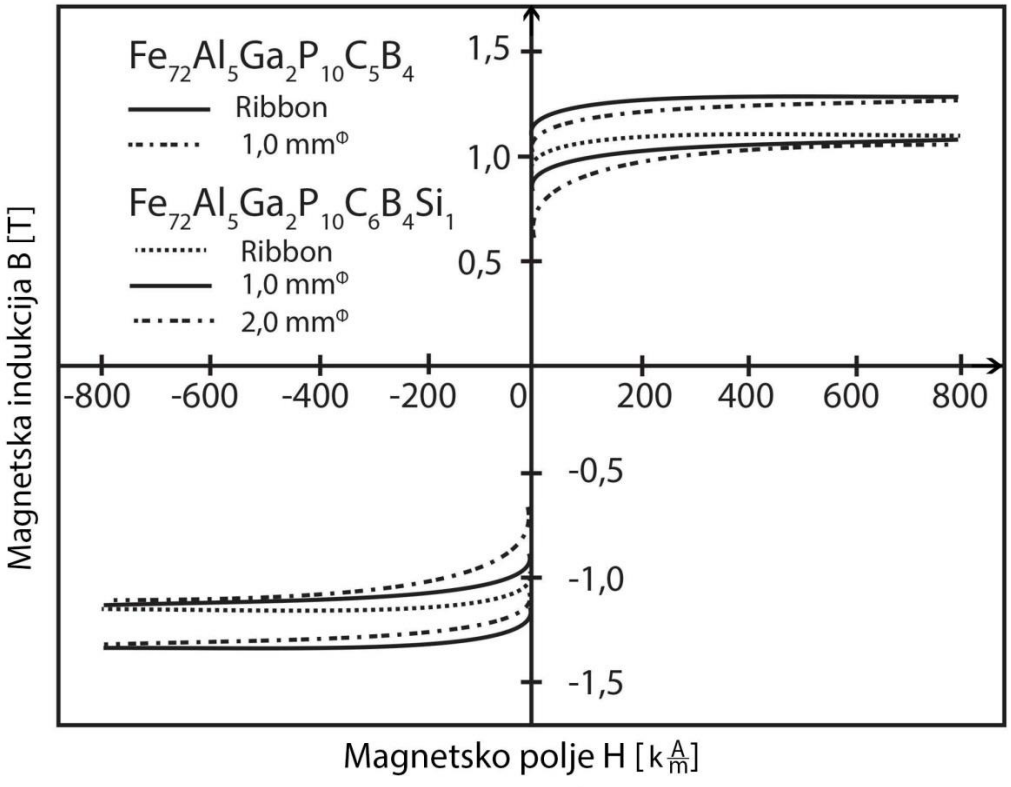

**Slika 20 Krivulja histereze s kombinacijama amorfnih traka**

Na tablici 4 prikazana su magnetska svojstva stakla koje je prikazano na slici 20.

**Tablica 4 Magnetska svojstva amorfnih traka sa slike 20**

| Legura | $\mu_e$ | $H_c$ [A/m] | $I_s$ [T] | $I_r$ [T] | $I_r/I_s$ | $\lambda_s$ | $T_g$ [K] | $T_x$ [K] | $\Delta T_x$ [K] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| a | 5800 | 1.3 | 1.10 | 0.32 | 0.29 | $31x10^{-6}$ | 753 | 789 | 36 |
| b | 2600 | 12.7 | 0.96 | 0.30 | 0.31 | $30x10^{-6}$ | 738 | 780 | 46 |
| c | 1900 | 19.1 | 0.91 | 0.27 | 0.30 | $21x10^{-6}$ | 737 | 786 | 49 |
| Kaljenje 600 [s] na 723 [K] | | | | | | | | | |
| a | 22 000 | 1.1 | 1.34 | 0.46 | 0.34 | - | - | - | - |
| b | 21 000 | 2.6 | 1.24 | 0.43 | 0.35 | - | - | - | - |
| c | 19 000 | 6.4 | 1.14 | 0.40 | 0.35 | - | - | - | - |

Usporede li se navedene vrijednosti iz tablice 4 s masivnim amorfnim magnetskim materijalima, dobiju se veoma slične vrijednosti kako je prikazano na slici 21.[13]

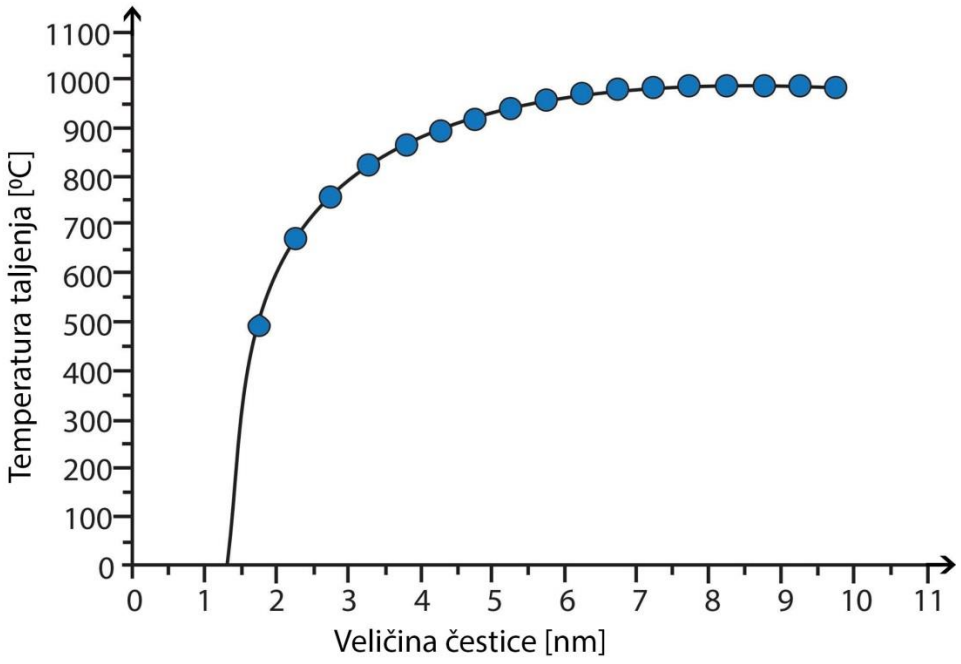



**Slika 21 Usporedba metalnih stakala s amorfnim magnetskim materijalima**

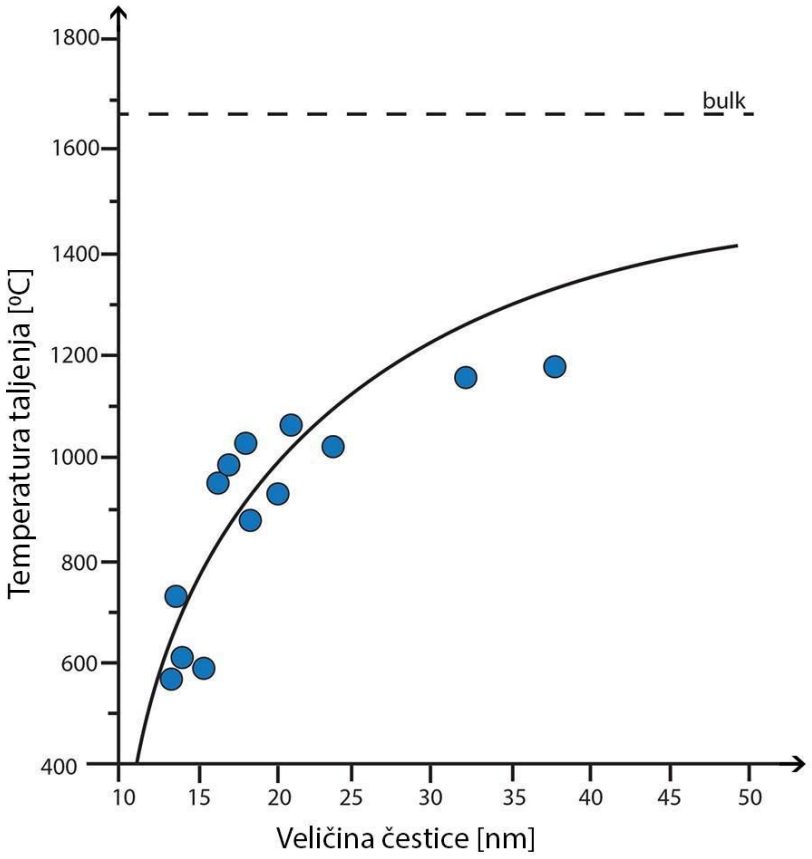
## 8.5. Toplinska svojstva

Na temelju toplinskih svojstava materijala veoma zorno može se prikazati razlika između masivnih materijala i nanomaterijala. Prilikom ispitivanja uočava se da temperatura taljenja nanokristalnih čestica ne ovisi o vrsti materijala, već o veličini njegovih čestica. Što je zrno materijala manje veličine, to je temperatura taljenja materijala nanokristalnih čestica manja.

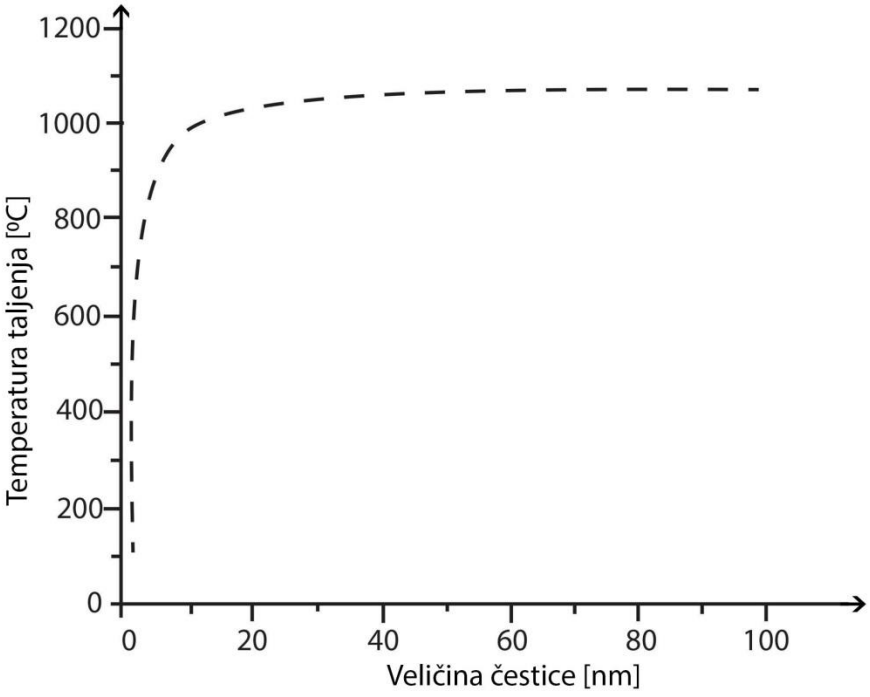
Navedno se može isčitati iz slijedeća tri primjera koja se nalaze na slikama 22, 23 i 24 gdje je prikazano kakve su granične vrijednosti temperature taljenja materijala na zlatu, kadmijevom sulfidu i bakru.[13]




**Slika 22 Temperatura taljenja zlata**




**Slika 23 Temperatura taljenja kadmijevog sulfida**




**Slika 24 Temperatura taljenja bakra**

## 8.6. Analiza eksperimentalnog dijela rada

Analizirajući dobivene rezultate iz mjerenja, može se zaključiti da nanomaterijali unaprjeđuju sva navedena svojstva materijala. Primjerice, želimo li čvrst materijal, dobrih mehaničkih svojstava, tada on mora zadovoljiti slijedeće uvjete:

- povećana čvrstoća odnosno žilavost,
- plastičnost/oblikovljivost,
- veća granica elastičnosti,
- deformabilnost.

No, sva navedena svojstva ne mogu biti realizirana u jednom materijalu, ali ideja je dobiti čim više pogodnih svojstava unutar jednog materijala. Iz pokusa mehaničkog drobljenja, vidljivo je da je obrnuto proporcionalan omjer čvrstoće materijala i veličine kristalnog zrna. Što znači da, što je manja veličina kristalnog zrna, to je veća čvrstoća materijala. Ovdje se odmah može povezati relacija ovisnosti veličine kristalnog zrna s otpornošću materijala na oštećenja. Materijali s manjim presjekom kristalnog zrna imaju bolja mehanička svojstva od onih s većim presjekom. To dovodi do zaključka da nanotehnologija, kao znanost koja omogućuje manipulaciju tvarima na nanometarskoj razini, ima osjetnu prednost pred ostalim vrstama pripreme materijala za proizvodnju i distribuciju na tržište. Isto tako, smanjenjem kristalnog zrna, primjećuje se da se smanjuje plastičnost materijala i povećava duktilnost.

Neka od električnih svojstava materijala su specifični električni otpor, specifična električna vodljivost i temperaturni koeficijent otpora. Prilikom ispitivanja materijala uočeno je da električni otpor materijala uvelike ovisi o mikrodeformacijama materijala na kojem se provodi ispitivanje. Može se zaključiti da sve nečistoće, dislokacije kristalita, kao i smjer orijentacije, utječu na svojstvo električnog otpora materijala. Svaka takva mikrodeformacija čini prekid i neujednačenost kod prijenosa energije sudarom elektrona, te samim time se povećava električna otpornost materijala. Kod amorfnih materijala prilikom kristalizacije, otpornost materijala ima minimalnu vrijednost koja je ispod vrijednosti otpornosti ravnotežne kristalne faze. Mjerenjima je dokazano da otpornost staklastih legura, iz eksperimentalnog dijela rada, opada s padom temperature, uz potvrđeni minimum koji ima vrijednost ispod vrijednosti otpornosti ravnotežne faze kristala. Prilikom ispitivanja materijala tantala, koji ima veoma dobra mehanička i toplinska svojstva, uočava se da β-Ta ima veću električnu otpornost

od α-Ta, koja je približna vrijednosti amorfnog kristala tantala. Obzirom da je uočeno kako mikrodeformacije utječu na povećanje električne otpornosti materijala, očekuje se kako će povećanje međugraničnog praznog prostora u nanokristalnim materijalima dovesti do povećanja električnog otpora materijala koji se obrađuje.

Prilikom ispitivanja magnetskih svojstava kod metalnog stakla, uočljivo je da magnetska svojstva jako ovise o veličini kristalnog zrna materijala. Ukoliko je kristalno zrno materijala manje, to su bolja magnetna svojstva materijala. Dobivaju se novi materijali koji imaju odlična feromagnetna svojstva s vrlo niskom koercitivnošću. Takvi materijali nalaze veliku primjenu u sustavima gdje se koriste vrlo osjetljivi senzori za ispitivanje okoline.

Zadnje svojstvo materijala koje se koristilo u ispitivanju je toplinsko svojstvo materijala. Tokom ispitivanja eksperimenta uočava se kako sa smanjenjem čestica nanokristala dolazi do smanjenja temperature taljenja materijala. Navedeno svojstvo je jako specifično jer se može zaključiti kako povećanje temperaturne otpornosti ne ovisi o vrsti materijala na kojem se radi pokus, već o samoj veličini kristalnog zrna.[13]

# 9. ZAKLJUČAK

Očigledno je da je nanotehnologija tek na početku svojeg razvoja, te da ima još puno mjesta za proširivanje svojeg kruga djelovanja i primjene. Uočljivo je da se nanotehnologija može implementirati u svaku granu inženjerske djelatnosti i medicine na način da učini veliki doprinos u svakom od tih polja u smislu razvoja i unaprjeđenja. Problem nanotehnologije je u tome što ulazi u koliziju s ostalim sferama znanosti zbog njihovog evolucijskog zaostatka za napretkom nanotehnologije. Naime, tehnologija implementacije nanouređaja ne može se koristiti u velikom obimu zbog nedostatka bioinženjerskih projektnih mogućnosti koje nisu u stanju biti na istoj evolucijskoj razini s nanotehnologijom. Tako da se može reći da je nanotehnologija još u eksperimentalnoj, laboratorijskoj fazi u kojoj se pronalazi njezina domena djelovanja i funkcionalnost za pojedine sustave u koje se misli implementirati. Bitan čimbenik u cijeloj priči oko nanotehnologije je taj da su ljudi shvatili važnost i mogućnosti ovakvog sustava proizvodnje uređaja i materijala. Na taj način otvorila su se vrata budućim idejama i rješenjima problema koji će nastupiti prilikom izgradnje novih sustava i tehnologije. Specifičnost ovakve tehnologije leži u tome što je veoma teška za realizaciju, a nalazi se svugdje oko nas u prirodi. Ljudi su zamijetili kako priroda konstruira savršene tehnološko-evolucijske sustave za opstanak biljnih i životinjskih vrsta kroz milijune godina. Ideja je napraviti „transfer tehnologije“ iz prirode u elektromehaničke sustave i na taj način implementirati svojstva koja su evolucijski ispitana i koja su ostala na životu do dana današnjeg.

Može se reći da smo na dobrom putu da iskoristimo znanje koje nam priroda pruža kako bismo svoju tehnologiju evoluirali na novu, bolju razinu. Sve grane znanosti i industrije bit će unaprjeđene novim i boljim svojstvima koje će pridonijeti većoj funkcionalnosti i boljem režimu rada i suživota ljudi i tehnologije. Medicina će krenuti u pravcu izlječenja svih vrsta bolesti i produženja životnog vijeka ljudi, a tako i životinjskih vrsta. Inženjerski pravac razvijat će sve složenije strukture koje će olakšati svakodnevni život i smanjiti emisije štetnih plinova i zračenja, što je u cilju očuvanja planeta Zemlje. Takav način evolucije tehnologije mogao bi biti veoma velik zaokret u svjetskoj ekonomiji, te bi mogao utjecati na smanjenje udjela bogatih naspram siromašnih ljudi na svijetu. Razvoj robotike omogućiti će smanjenje broja zaposlenih u industrijama, ali ne i smanjenje prihoda. Ljudi će imati više vremena posvetiti se učenju i razvoju samih sebe kao individualaca. Ostvariti će se svijest o ekološkim problemima, o problemima siromaštva i nejednake podjele svjetskih dobara. Moći će se upravljati svjetskom gladi i siromaštvom na način da će uskoro biti izgrađeni strojevi koji će

moći stvoriti hranu, piće, strojarske dijelove, knjige, lopte, elektrotehničke komponente, olovke i druge stvari, samo jednim pritiskom na gumb. Takva je vizija razvoja nanotehnologije. No, društvo mora biti svijesno da princip razvoja nanotehnologije može otići i u krivom smjeru, primjerice vojna tehnologija.

Nanotehnologiju treba objeručke prihvatiti kao najvrijedniji poklon čovječanstvu, ali s dozom opreza i sumnje, kako bi se spriječile brzoplete i loše odluke koje bi mogle izbaciti vlak razvoja s tračnica revolucionarnog uspjeha.

# LITERATURA


[1] W.Goddard, Handbook of Nanoscience,Engineering and Technology,2003

[2] Murphy, C.,Allen, D., "Nanotechnology and the Environment", University of Texas,2004.

[3] https://bs.wikipedia.org/wiki/Nanotehnologija

[4] https://en.wikipedia.org/wiki/K._Eric_Drexler

[5] http://fly.srk.fer.hr/~fenix/erg/pdf/nano.pdf

[6] http://nanotechnologija.weebly.com/povijest.html

[7] https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman

[8] https://www.foresight.org/UTF/download/unbound.pdf

[9] https://en.wikipedia.org/wiki/Grey_goo

[10]http://www.geek.hr/clanak/sto-je-to-nanotehnologija/#ixzz44NpoqaMD

[11]https://en.wikipedia.org/wiki/Nanoelectromechanical_systems

[12]https://en.wikipedia.org/wiki/Zero-point_energy

[13]http://www.phy.pmf.unizg.hr/~atonejc/9%20NNFizicka%20svojstva%20nanomaterijala.pdf

[14]http://nanotechweb.org/

[15]https://nikolaos1946.files.wordpress.com/2010/12/nano-vojna-tehnologija-sa-slikama2.pdf

[16]https://en.wikipedia.org/wiki/Top-down_and_bottom-up_design

[17]https://en.wikipedia.org/wiki/Sol-gel

[18]https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube

[19]https://hr.wikipedia.org/wiki/Fuleren

[20] http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/hazu_nano1.pdf

[21] https://hr.wikipedia.org/wiki/Youngov_modul_elasti%C4%8Dnosti

[22] https://hr.wikipedia.org/wiki/Dislokacija

[23] http://nanoparticle-blog.com/

[24] http://science.howstuffworks.com/gray-goo.htm

[25] http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=42938