

# Trendovi u razvoju kompozitnih materijala

---

Smolčić, Karla

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:580226>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Karla Smolčić**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Karla Smolčić

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Ireni Žmak na uloženom vremenu i trudu te pristupačnosti i podršci koju mi je pružila.

Posebno se zahvaljujem roditeljima bez kojih ne bih bila tu gdje jesam i sestri koja je uvijek bila uz mene.

Karla Smolčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispите  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispите studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karla Smolčić** JMBAG: **0035223386**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trendovi u razvoju kompozitnih materijala**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Trends in the development of composite materials**

Opis zadatka:

Zbog mogućnosti dobivanja materijala ciljanih svojstava, kompozitni materijali se danas široko koriste u raznim granama industrije, od putničkih i vojnih zrakoplova i letjelica, do lopatica vjetroturbina, vojnih i komercijalnih vozila, električnih vozila, u građevinarstvu, robotici, za sustave odvodnje i za mnoge druge tehničke primjene, a njihova se primjena izravno povezuje i s razvojem novih vrsta transportnih i dostavnih vozila budućnosti. Zbog svojih povoljnih svojstava i sve prihvatljivije cijene, zadnjih desetljeća su kompozitni materijali prisutni i u proizvodima za svakodnevnu upotrebu, kao što su razne sjedalice na javnim mjestima, sportska, planinarska i oprema za kampiranje, vaze za cvijeće, pa i kišobrani, dječji tobogani, pedaline itd. Navedeni primjeri odnose se „samo“ na vrlo široku primjenu polimernih kompozita, dok u brojnim drugim inženjerskim i medicinskim područjima se također značajno radi na razvoju metalnih kompozita za zamjenu legura, kao i na razvoju keramičkih kompozita, koji bi poboljšali svojstva postojeće tehničke keramike. Kao odgovor na potrebu za održivijim razvojem, manjem opterećenju okoliša i manjoj potrošnji sirovina, razvijaju se i sve više koriste biokompoziti. Biokompoziti su najčešće ojačani vlaknima prirodnog podrijetla, a razvijaju se i biopolimeri sve boljih tehnoloških i uporabnih svojstava za matricu kompozita. Nastojanja za održivijim razvojem usmjerena su i na potrebu recikliranja kompozitnih materijala, pogotovo onih koji u velikim količinama danas završavaju svoj životni vijek, kao i onih za čiju je primarnu proizvodnju potrebno uložiti mnogo energije. U okviru ovog završnog rada potrebno je proučiti i prikazati odabrane očekivane trendove razvoja na području kompozitnih materijala. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	II
POPIS OZNAKA .....	III
POPIS KRATICA .....	IV
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. POVIJEST KOMPOZITA.....	2
3. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	9
4. TRENDOVI U RAZVOJU KOMPOZITNIH MATERIJALA.....	11
4.1. Ultralagani kompoziti.....	12
4.1.1. Iznimno lagane skije demonstriraju potencijal kompozita ojačanih grafenom.....	12
4.2. EKOLOŠKI PRIHVATLJIVI MATERIJALI .....	17
4.2.1. <i>Trendovi u postupcima recikliranja i ponovne uporabe kompozitnih materijala ..</i>	18
4.3. Naprednije projektiranje i razvoj komponenti .....	20
4.4. Digitalna proizvodnja kompozita .....	21
4.4.1. <i>Tradicionalna proizvodnja kompozita .....</i>	22
4.4.2. <i>Trenutačno stanje trodimenzionalno ispisanih kompozita.....</i>	23
4.4.3. <i>Usmjeravanje vlakana unutar trodimenzionalno ispisanih alata za injekcijsko prešanje polimernih materijala.....</i>	25
4.5. Nove primjene .....	29
4.5.1. <i>Trodimenzijski ispisan zgrade.....</i>	29
4.5.2. <i>Napredak u razvoju trodimenzionalno ispisanih zgrada .....</i>	30
4.6. Odlazak u atomski svijet .....	31
4.6.1. <i>Kako novi materijali mijenjaju industriju .....</i>	33
4.6.2. <i>Nanomaterijali .....</i>	34
4.6.3. <i>Proizvodnja nanomaterijala.....</i>	35
4.6.4. <i>Korištenjem metamaterijala do nevidljivih tenkova i prikrivenih podmornica .....</i>	36
5. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Kompozitni materijal [2].....	1
Slika 2. Opeke od slame i blata [3] .....	2
Slika 3. Staroegipatska mumija: postupak „cartonnage“ [4].....	3
Slika 4. Zrakoplov Spruce Goose [7] .....	5
Slika 5. Dizajn legendarnog modela Corvette iz 1953. godine [8] .....	6
Slika 6. Aramidna vlakna (kevlar) [9].....	7
Slika 7. Ugljična, aramdina i staklena vlakna [11] .....	9
Slika 8. Orijehtacija vlakna u kompozitu [12] .....	9
Slika 9. Kompozitne skije s grafenom [14].....	13
Slika 10. Dodavanje grafena pri izradi kompozita [14] .....	14
Slika 11. Grafenov oksid [15] .....	15
Slika 12. Polimer poliedarski oligomerni silseskvioksan (POSS) [16].....	15
Slika 13. Usporedba mase konstrukcije starih skija za planinsko skijanje s novom UltraLITE konstrukcijom [14] .....	16
Slika 14. Reciklati drva [17] .....	18
Slika 15. Tradicionalna proizvodnja kompozita [19].....	22
Slika 16. Staklena vlakna [20].....	23
Slika 17. Ugljična vlakna [21].....	24
Slika 18. Kontrola vlakana tijekom izrade dijelova [19] .....	25
Slika 19. Ovisnost vlačne čvrstoće i orijentacije vlakna u kompozitu [22] .....	26
Slika 20. Fortify FLUX 3D - Industrijski 3D pisac za smole [23].....	27
Slika 21. Testni kalup B strana [22] .....	28
Slika 22. Testni kalup A strana [22].....	28
Slika 23. Trodimenzionalno ispisana zgrada [25] .....	30
Slika 24. Boeing 787-10 Dreamliner [28] .....	34
Slika 26. Snellov zakon [33] .....	37

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
$n_1$	-	Indeks loma optičkog sredstva iz kojega zrake dolaze
$n_2$	-	Indeks loma optičkog sredstva u kojega zrake ulaze
$\alpha$	°	Kut upadne svjetlosne zrake
$\beta$	°	Kut loma



## POPIS KRATICA

Kratika	Opis
FRP	<i>Fiberglass-Reinforced Polymer</i> – polimer ojačan staklenim vlaknima
E – GO	Epoksirani grafenov oksid
POSS	Poliedarski oligomerni silseskvioksan
EOL	<i>End of Life</i> – kraj životnog ciklusa
DCM	<i>Digital Composite Manufacturing</i> – digitalna proizvodnja kompozita
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i> FDM (drugi naziv: <i>Fused Deposition Modelling</i> , FDM) – taložno očvršćivanje
CKM	<i>Continuous Kinetic Mixing</i> – kontinuirano kinetičko miješanje

## SAŽETAK

Razvoj kompozitnih materijala je kontinuiran i dinamičan proces koji se proteže od drevnih vremena do današnjih dana. Ključni trendovi u ovom području odražavaju potrebe moderne industrije, tehnološke napretke i društvene prioritete. Trendovi u razvoju kompozitnih materijala dijele se u šest skupina: ultralagani kompoziti, ekološki prihvatljivi materijali, naprednije projektiranje i razvoj komponenti, digitalna proizvodnja kompozita, nove primjene te odlazak u atomski svijet. Razvoj ultralaganih kompozitnih materijala ostvaruje se korištenjem naprednih vlakana koja su izuzetno lagana i čvrsta. Ovo područje istraživanja usredotočuje se na smanjenje mase komponenti, što je ključno za različite industrije, poput automobilske, zrakoplovne i svemirske. S obzirom na rastuću svijest o očuvanju okoliša, razvoj ekološki prihvatljivih kompozitnih materijala postaje imperativ. Ovaj trend uključuje upotrebu recikliranih materijala, smanjenje emisija CO<sub>2</sub> tijekom proizvodnje te razvoj biorazgradivih kompozita. Napredak u računalnom modeliranju i analizi omogućuje preciznije projektiranje kompozitnih komponenti, optimizirajući njihovu čvrstoću i učinkovitost. Ovaj trend doprinosi poboljšanoj izdržljivosti u radnim uvjetima i trajnosti kompozita. Digitalizacija proizvodnje kompozita omogućuje bržu i precizniju izradu komponenata. Trodimenzionalno ispisivanje kompozita, automatizirani procesi i upotreba umjetne inteligencije ubrzavaju proizvodnju i smanjuju otpad. Kompoziti se široko primjenjuju u raznim industrijama, uključujući automobilsku, zrakoplovnu, građevinsku i sportsku industriju. Novi trendovi u razvoju kompozita uključuju njihovu primjenu u medicini, energiji i elektronici. Napredak u nanotehnologiji otvara vrata razvoju nanokompozita, koji imaju jedinstvena svojstva i mogućnosti. Ovi materijali mogu se koristiti za izradu ultralaganih i izdržljivih komponenata, kao i za razne medicinske i elektroničke primjene te u vojnoj industriji.

Ključne riječi: kompoziti, matrica, ojačalo, grafen, recikliranje, trodimenzionalno ispisivanje, nanokompoziti, metamaterijali

## SUMMARY

The development of composite materials is a continuous and dynamic process that stretches from ancient times to the present day. Key trends in this field reflect the needs of modern industry, technological advances, and societal priorities. Trends in the development of composite materials can be divided into six categories: ultra-lightweight composites, environmentally friendly materials, advanced design and component development, digital composite manufacturing, new applications, and delving into the atomic world. The development of ultra-lightweight composite materials is achieved by using advanced fibers that are extremely lightweight and strong. This area of research focuses on reducing the weight of components, which is crucial for various industries, such as automotive, aerospace, and space. Given the growing awareness of environmental preservation, the development of environmentally friendly composite materials has become an imperative. This trend includes the use of recycled materials, reducing CO<sub>2</sub> emissions during production, and the development of biodegradable composites. Advancements in computer modeling and analysis enable more precise design of composite components, optimizing their strength and efficiency. This trend contributes to improved durability in operational conditions and the overall longevity of composites. Digitalization of composite manufacturing allows for faster and more precise component production. 3D printing of composites, automated processes, and the use of artificial intelligence accelerate production and reduce waste. Composites are widely applied in various industries, including automotive, aerospace, construction, and sports. New trends in composite development include their application in medicine, energy, and electronics. Advances in nanotechnology open doors to the development of nanocomposites, which possess unique properties and capabilities. These materials can be used to create ultra-lightweight and durable components, as well as for various medical and electronic applications and in the military industry.

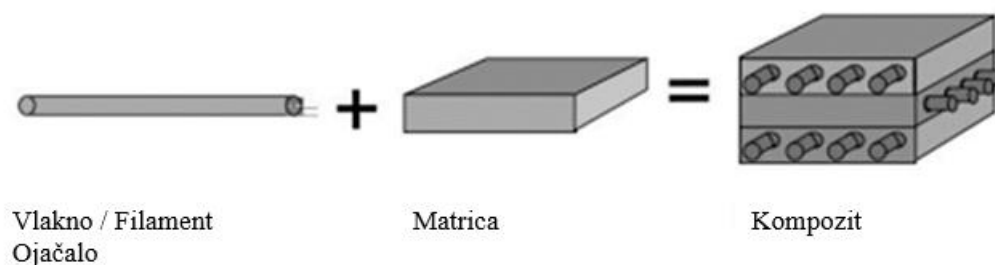
Key words: composite, matrix, reinforcement, graphene, recycling, 3D printing, nanocomposites, metamaterials

## 1. UVOD

Kompozitni materijali postali su ključni element modernog inženjerstva i tehnologije zbog svoje sposobnosti pružanja jedinstvene kombinacije svojstava koja nadmašuju granice klasičnih materijala. Kombinacijom matrice i ojačala (Slika 1.) omogućava se stvaranje materijala s poboljšanim mehaničkim, toplinskim, kemijskim i električnim svojstvima.

Suvremeni zahtjevi u inženjerstvu i industriji postavljaju visoke standarde za materijale koji se koriste u proizvodnji različitih proizvoda, od zrakoplovnih komponenti i automobilskih dijelova do sportske opreme i medicinskih implantata. Kompozitni materijali nameću se kao idealno rješenje, jer objedinjuju prednosti različitih komponenti te stvaraju materijale koji posjeduju superiorna mehanička svojstva poput niske gustoće, izvanredne čvrstoće i korozijske otpornosti, dok drugi pružaju visoku krutost, otpornost na udarce i povišenu temperaturu te kemijsku postojanost.

Izgled proizvoda predstavlja značajan faktor, budući da se kompoziti proizvode od nekoliko različitih materijala lako se osigurava potreban dizajn te se mogu koristiti za estetske svrhe poput zidnih obloga i pločica imitirajući drvo, beton ili metale. [1]



Slika 1. Kompozitni materijal [2]

## 2. POVIJEST KOMPOZITA

### 2.1. Od drevnih vremena do 20. stoljeća

Umjetni kompozitni materijali imaju korijene u drevnim vremenima, kada su ljudi počeli kombinirati različite materijale kako bi stvorili funkcionalne materijale za različite potrebe. Primjeri ovih ranih kompozitnih materijala sežu unatrag u povijest te su često bili inspirirani praktičnim potrebama građevinske industrije i umjetnosti.

Jedan od ranih primjera kompozitnih materijala datira iz vremena kada su slama i blato kombinirani kako bi se stvorile opeke za građevinarstvo (Slika 2.). Ovi rani pokušaji stvaranja kompozitnih materijala dokumentirani su čak i u egipatskim slikama na grobnicama, što ukazuje na njihovu važnost i široku primjenu.



Slika 2. Opeke od slame i blata [3]

U drevnoj Mezopotamiji, oko 3400. pr. Kr., počeli su primjenjivati tehniku lijepljenja drvenih traka pod različitim kutovima kako bi stvorili furnir. Ova inovacija predstavlja jedan od prvih primjera laminiranja materijala kako bi se postigla bolja mehanička svojstva.

Kasnije, u razdoblju od oko 2182. do 2055. pr. Kr., Egipćani su razvili postupak zvan „cartonnage“, koji uključuje slojeve lana i papirusa natopljenih u žbuku (Slika 3.). Ovaj postupak korišten je za izradu masaka za smrt, što pokazuje da su kompozitni materijali imali i ritualne i praktične svrhe u drevnom društvu.



Slika 3. Staroegipatska mumija: postupak „cartonnage“ [4]

Beton je još jedan primjer rane upotrebe kompozitnih materijala. Iako se opisuje u Vitruvijevom djelu „Deset knjiga o arhitekturi“ datiranom 25. pr. Kr., beton je bio široko korišten u drevnim vremenima za izgradnju trajnih i čvrstih građevinskih struktura. Istraživanja su čak pokazala da je beton koji su koristili Rimljani, sastavljen od različitih agregata i veziva, imao iznimna mehanička svojstva i trajnost koja se u nekim aspektima može usporediti s današnjim portland cementom. [5]

U 12. stoljeću mongolski ratnici koristili su kompozitne materijale za izradu lukova koji su bili brži i jači od lukova njihovih suparnika. Ti drevni lukovi i danas su pokazali impresivnu snagu i preciznost, što ih čini iznimno učinkovitim čak i u usporedbi s modernim lukovima. [6]

Ovi rani primjeri prikazuju kako su ljudi već tisućama godina upoznati s prednostima kombiniranja različitih materijala kako bi postigli poboljšane performanse i funkcionalnost

dijelova, čime su postavili temelje za razvoj suvremenih kompozitnih materijala koji se danas koriste u raznim industrijama i primjenama. [5]

Krajem 19. stoljeća, svijet znanosti i tehnologije doživio je pravu revoluciju zahvaljujući postupku polimerizacije. Ovaj inovativni postupak omogućio je stvaranje potpuno novih materijala i otvorio vrata za razvoj kompozitnih materijala kakve danas poznajemo. Nove sintetičke smole, uključujući celulozid, melamin i bakelit, mogle su se pretvoriti iz tekućeg u čvrsti oblik, stvarajući složenu prostornu mrežu makromolekula. Ova svojstva omogućila su stvaranje materijala s potpuno novim karakteristikama i svojstvima, što je predstavljalo pravu revoluciju u industriji materijala. [5]

Približno u isto vrijeme, graditelji kanua počeli su isprobavati različite materijale za izradu laminata od papira. Pokušali su lijepiti slojeve kraft papira sa šelakom, ali taj eksperiment nije uspio zbog loše kvalitete dostupnih materijala. Međutim, u 1930-ima su razvijene nove sintetičke smole koje su se mogle pretvoriti iz tekućeg u čvrsto stanje. Poliesterske smole postale su popularni i prvi izbor za izradu kompozitnih materijala. Tijekom tog vremena su se također počele koristiti i druge visokoučinkovite smole, kao što su epoksidne smole. [6]

## **2.2. Početak moderne ere kompozita**

U prvim desetljećima 20. stoljeća, razvoj polimernih materijala nevjerojatno se ubrzao. Iako su ovi prvi polimerni materijali bili inovativni, nisu bili ni blizu sposobnosti modernih polimernih materijala koje danas poznajemo. Njihova čvrstoća i krutost bili su niski, što ih je činilo neprikladnima za mnoge zahtjevne primjene u različitim industrijama. [5]

Leo Hendrik Baekeland, belgijski kemičar koji je živio u SAD-u, stvorio je bakelit 1907. godine, što je označilo i početak moderne ere kompozita. Bakelit je bio prva sintetička smola, ali bio je krhak. Baekeland je otkrio da ga može ojačati kombiniranjem s celulozom. Prva komercijalna primjena bakelita bila je izrada ručica za mijenjanje brzina u automobilima Rolls Royce 1917. godine. [6]

Tijekom 1920-ih i 1930-ih godina razvijene su nove i bolje smole, uključujući poliestersku smolu. Uspjeh razvoja kompozitnih materijala značajno je ubrzala dekada 1930-ih godina. Owens Corning je igrao ključnu ulogu u stvaranju industrije polimera ojačanih vlaknima (FRP) razvojem prvih staklenih vlakana 1935. godine. Ove inovativne strukture omogućile su stvaranje materijala s izvanrednom čvrstoćom i malom masom, otvarajući vrata širokom spektru primjena. Ubrzo su se razvile poliesterske smole koje su postale dominantni izbor za izradu kompozitnih materijala, a početkom 1938. godine postale su dostupne i druge visokoučinkovite smole poput epoksidne smole. Kasnih 1930-ih godina, tvrtka Owens-Illinois Glass Company razvila je proces tkanja staklenih vlakana u tekstil. Ta nova staklena vlakna, zajedno s poliesterskim smolama, stvorila su čvrste i lagane kompozite. Godine 1942., inženjer Ray Greene iz Ohia izradio je brodicu od poliesterskog kompozita ojačanog staklenim vlaknima, što je donijelo revoluciju u svijetu brodogradnje. [5] [6]

Howard Hughes koristio je kompozitna krila, složena od tankih drvenih slojeva i polimernog materijala, na zrakoplovu Spruce Goose (Slika 4.).



Slika 4. Zrakoplov Spruce Goose [7]



Razvoj kompozitne industrije nastavio se tijekom Drugog svjetskog rata kako bi se pronašli materijali koji će smanjiti masu zrakoplova i plovila, ali istovremeno povećati njihovu čvrstoću, trajnost i otpornost na vremenske uvjete i koroziju. Za vrijeme Drugog svjetskog rata, industrija polimernih kompozita doživjela je značajan uspjeh. Staklena vlakna pokazala su se iznimno korisnima zbog svoje visoke čvrstoće u odnosu na masu i transparentnosti za radiofrekvencije. Primijenjena su u radarima i drugim elektroničkim uređajima. Već 1947. godine izgrađen je i testiran automobil s potpuno kompozitnom konstrukcijom, a taj uspjeh je utjecao na dizajn legendarnog modela Corvette iz 1953. godine (Slika 5.), koja je gotovo u potpunosti bila izrađena od staklenih vlakana koristeći nove i efikasnije postupke oblikovanja.



Slika 5. Dizajn legendarnog modela Corvette iz 1953. godine [8]

Nakon rata, kompoziti su brzo postali popularni u raznim tehničkim primjenama, kao što su brodogradnja, proizvodnja kamiona, sportskih automobila, spremnika i raznih cijevi. Razvijene su nove metode proizvodnje, uključujući pultruziju, vakuumsko oblikovanje i proizvodnju filamenata, što je omogućilo stvaranje velikih kompozitnih dijelova i korištenje kompozita u raketnim motorima za istraživanje svemira.[5] [6]

### 2.3. Razvoj različitih industrija kompozitnih materijala

Prve komercijalne primjene kompozitnih materijala kroz povijest su dovele do razvoja različitih industrija. U 1960-ima su patentirana prva ugljična vlakna, ali njihova komercijalna dostupnost došla je kasnije. Korištenje ovih materijala unaprijedilo je mnoge sektore kao što su zrakoplovstvo, automobilska industrija, brodogradnja i roba široke potrošnje. Godine 1961. patentirana su prva ugljična vlakna. Iako je trebalo nekoliko godina da se kompozitni materijali s ugljičnim vlaknima komercijalno razviju, ova inovacija je otvorila još više mogućnosti za primjenu kompozitnih materijala zahvaljujući poboljšanim karakteristikama čvrstoće i gustoće. Samo pet godina kasnije, 1966. godine, kemičar iz tvrtke DuPont je izumio aramidna vlakna poznata kao kevlar (Slika 6.), koja su danas ključni sastojak naprednih kompozitnih materijala i balističke zaštite. U 1970-ima, automobilska industrija je postala glavno tržište za kompozite, nadmašivši primjenu u brodogradnji. [5][6]



Slika 6. Aramidna vlakna (kevlar) [9]

Kasnih 1970-ih i početkom 1980-ih, kompoziti su prvi put primijenjeni u infrastrukturnim projektima u Europi i Aziji, uključujući izgradnju prvog autocestovnog mosta i prvog mosta s potpuno kompozitnom pločom. U 1990-ima, postavljeni su prvi mostovi s potpuno kompozitnim konstrukcijama za pješake i vozila na različitim lokacijama u Sjedinjenim Američkim Državama. [6]

Kompoziti su sve više omiljeni u industrijskom dizajnu i inženjerstvu, primjenjuju se u proizvodnji, građevinarstvu te transportu. Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima se široko koriste za ojačanje betona i zidova, od zgrada do mostova. U 21. stoljeću, nanotehnologija je unaprijedila kompozite, posebno upotrebnom ugljičnih nanocjevčica, čime se dodatno poboljšavaju svojstva kompozita. Uz to, trodimenzionalni ispis je omogućio brzu i učinkovitu proizvodnju ojačanih kompozitnih tvorevina u raznim sektorima, kao što su automobilizam i zrakoplovstvo. [6]

### 3. KOMPOZITNI MATERIJALI

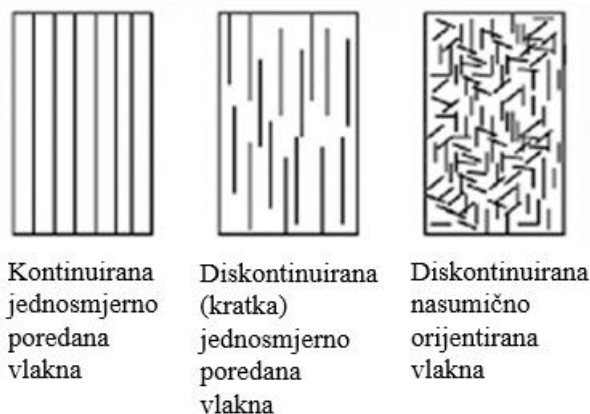
Kompozitni materijali predstavljaju strukture sastavljene od barem dvaju različitih materijala koji su povezani kako bi zajedno djelovali kao jedinstveni entitet. Ovi materijali posjeduju inovativna svojstva koja se značajno razlikuju od tradicionalnih monolitnih materijala te imaju značajan i transformirajući utjecaj na sve šire područje primjena. [10]

Kompozitni materijali sastoje se od matrice i ojačala, odnosno punila. Razlika između punila i ojačala nalazi se prije svega u njihovom obliku. Kod punila su sve tri dimenzije podjednake, dok su ojačala više izduženog oblika, najčešće u obliku vlakana. Najčešće korištena su staklena i ugljična te aramidna vlakna (Slika 7.).



Slika 7. Ugljična, aramidna i staklena vlakna [11]

Osim o vrsti materijala, svojstva materijala znatno ovise i o usmjerenosti, volumnom udjelu te orijentaciji samih vlakana, stoga ona mogu biti kontinuirana i jednosmjerno poredana vlakna, diskontinuirana i jednosmjerno poredana vlakna te diskontinuirana i nasumično poredana vlakna (Slika 8.).



Slika 8. Orijehtacija vlakna u kompozitu [12]

Kod proizvodnje kompozita ojačanih vlaknima potrebno je tijekom postupka izrade točno orijentirati vlakna kako bi se dobila željena svojstva, stoga su takvi postupci složeni i skupi. Zbog toga vlakna za ojačanje kompozita često dolaze u obliku preprega, što znači da su prethodno vlakna ili tkanine impregnirani kako bi se olakšala i ubrzala proizvodnja. [12]

Matrica kompozitnog materijala je kontinuirani materijal koji okružuje ojačala i drži ih zajedno. Vrsta matrice koja se koristi u kompozitnom materijalu može znatno utjecati na svojstva i primjene tog materijala. Razlikujemo polimerne, metalne i keramičke matrice. Polimeri, kao što su epoksidne smole, poliesterske smole, vinilesteri i poliuretani, često se koriste kao matrice u kompozitnim materijalima. Polimerne matrice su popularne jer su lagane, fleksibilne, otporne na koroziju u raznim medijima i relativno jeftine te se koriste u različitim primjenama za mnoge proizvode. Metalne matrice, poput aluminija ili magnezija, mogu se koristiti u kompozitnim materijalima gdje je potrebna visoka čvrstoća i krutost te postojanost na višim temperaturama u odnosu na polimerne matrice. Metalne matrice često se koriste u proizvodnji kompozitnih materijala za zrakoplove i svemirske letjelice. Keramika, kao što su silicijev karbid ili aluminijev oksid, koristi se kao matrica u kompozitnim materijalima koji zahtijevaju izuzetnu otpornost na visoke temperature i abraziju. Primjerice, keramičke matrice često se koriste u proizvodnji kompozitnih materijala za kočnice ili ojačane keramičke materijale (tzv. *cermet*) za posebne primjene. Ovi kompoziti kombiniraju metalnu matricu s drugim materijalima, poput keramike ili stakla, kako bi se postigla posebna kombinacija svojstava. Metalni kompoziti koriste se u različitim primjenama, uključujući automobilske dijelove i alate. Ovi kompoziti koriste matricu i ojačala od ugljičnih vlakana. Ugljik-ugljik kompoziti su izuzetno čvrsti i lagani, te se često koriste u zrakoplovstvu i svemirskoj tehnici. [12]

Izbor matrice ovisi o specifičnim zahtjevima primjene i željenim svojstvima materijala. Kombinacija matrice i ojačala određuje konačna svojstva kompozitnog materijala, kao što su čvrstoća, gustoća, toplinska i električna provodljivost te otpornost na agresivne medije i abraziju.

#### 4. TRENDVI U RAZVOJU KOMPOZITNIH MATERIJALA

Kompozitni materijali sve se više koriste u različitim industrijama, jer naspram tradicionalnih materijala poput čelika, drva ili betona nude svojstva kakva nema nijedan tradicionalni materijal zasebno. Korištenjem dva ili više različitih materijala nastaje novi materijal, kompozitni materijal, koji posjeduje kombinaciju svojstava svih prisutnih materijala te se na taj način mogu kreirati točno određena željena svojstva.

Napretkom znanosti i tehnologije povećava se potražnja za kompozitnim materijalima iz godine u godinu te se očekuje njihovo konstantno usavršavanje i unapređivanje svojstava poput smanjenja gustoće i povećanja učinkovitosti u automobilskoj industriji, što potiče potražnju za ugljičnim kompozitima koji se koriste kod šasija, poklopaca motora, krovnih panela, izolacijskih panela, oplata, blatobrana, ispušnih lonaca te spojlera.

U industriji kompozita nekoliko je neispunjenih potreba u različitim segmentima. Proizvođači materijala i dijelova moraju zajednički raditi kako bi potaknuli inovacije u ovoj industriji i zadovoljili potrebe tržišta. Ključna područja inovacija obuhvaćaju održivost, smanjenje mase, sniženje cijena i ubrzanje proizvodnih procesa. Održivost je važan fokus u raznim područjima industrije kompozita. Proizvođači automobila su uložili mnogo truda i novca u istraživanje i razvoj hibridnih i električnih vozila koja smanjuju emisiju zagađivača u okoliš.

Nadalje raste i interes za uporabu biosmola i prirodnih vlakana u automobilskoj industriji kako bi se riješili problemi održivosti. [13]

Zbog sve većih zahtjeva tržišta razvijaju se novi trendovi u razvoju kompozitnih materijala koji se prema literaturi [1] dijele na:

- ultralagane kompozite
- ekološki prihvatljive materijale
- naprednije projektiranje i razvoj komponenti
- digitalnu proizvodnju kompozita
- nove primjene
- odlazak u atomski svijet.

## 4.1. Ultralagani kompoziti

Ultralagani kompoziti postali su popularni u raznim industrijama kao što su zrakoplovstvo, automobilska industrija i obnovljivi izvori energije donoseći značajne prednosti, jer su ekonomični te smanjuju ukupne troškove izrade komponenata i izgradnje projekata. Stoga imaju prednost u korištenju pred tradicionalnim materijalima.

Primjena ultralaganih kompozita u vjetroelektranama može biti korisna jer pomaže smanjiti troškove. Na primjer, uz korištenje prilagodljivijih kompozitnih materijala, može se postići veća trajnost, otpornost na vremenske uvjete i okoliš, te poboljšati kvaliteta vjetroturbina i komponenti.

Također, zrakoplovna industrija koristi lagane kompozite, poput ugljičnih nanoojačanih polimera. Takvi materijali imaju prednost jer su izuzetno čvrsti i otporni na ekstremne uvjete, a istovremeno su znatno lakši od tradicionalnih materijala, oko 30 %. To dovodi do smanjenja potrošnje goriva i otpora u zrakoplovima. Ovi kompoziti mogu se primijeniti i u drugim industrijama, kao što su istraživanje svemira ili automobilska industrija, pogotovo kada se koriste u električnim i vozilima bez goriva. [1]

### 4.1.1. Iznimno lagane skije demonstriraju potencijal kompozita ojačanih grafenom

U domeni materijala, proteklih je nekoliko godina značajna pozornost usmjerena prema grafenu. Grafen je sloj ugljika debljine samo jednog atoma, koji se danas komercijalno nudi u različitim oblicima te se može integrirati u kompozitne materijale i druge strukture. Grafen je pokazao izuzetne sposobnosti poboljšanja mehaničkih svojstava komponenata, uključujući toplinsku i električnu provodljivost, čvrstoću, otpornost na lom te sposobnost prigušivanja vibracija, čak i pri minimalnim udjelima.

Interes za primjenom dodatka grafena u različitim kompozitnim primjenama i tržištima konstantno raste. Međutim, postoji niz prepreka koje ograničavaju široku primjenu ovog materijala. To uključuje pitanja standardizacije i kontrole kvalitete dostupnih materijala, kao i izazove u projektiranju i proizvodnji koji se javljaju prilikom inkorporacije novih dodataka u postojeće proizvode i procese.

Korištenjem grafena kao dodatka, tvrtka Folsom Custom Skis unaprijedila je sastav svojih ugljičnim vlaknima ojačanih kompozitnih skija za planinsko skijanje kako bi postigla bolje performanse uz smanjenje mase. Grafen je pridonio većoj čvrstoći i poboljšanju performansi skija.

Folsom Custom Skis specijaliziran je za izradu prilagođenih i ručno izrađenih skija. Nakon pažljivog testiranja i prototipiranja, surađivali su s dobavljačem hibridnih materijala, Mito Material Solutions, kako bi poboljšali svoje ugljičnim vlaknima ojačane skije za planinsko skijanje dodavanjem grafena. Cilj je bio stvoriti lakše skije s boljim performansama za skijanje izvan uređenih staza (Slika 9.).



Slika 9. Kompozitne skije s grafenom [14]

Svaki par skija izrađen je od jedne od tri kombinacija kompozitnih materijala kako bi se zadovoljila određena težinska ograničenja. To uključuje kombinacije polimernih kompozita ojačanih staklenim vlaknima i ugljičnim vlaknima u različitim omjerima ili skije potpuno izrađene od ugljičnih vlakana za najmanju težinu. Moguće kombinacije su: 90/10 polimernog kompozita ojačanog staklenim vlaknima / ugljičnih vlakana, kombinacija 70/30 polimernog kompozita ojačanog staklenim vlaknima / ugljičnih vlakana (nešto manja masa) i 100 %



laminata od ugljičnih vlakana što daje najmanju masu. Kompozit u obliku laminata obuhvaća strukturnu jezgru izrađenu od kombinacije drva osmišljene za postizanje željene čvrstoće, prigušenja vibracija i ukupnih performansi skija. Ti kompozitni materijali obavijaju strukturnu jezgru od drva, a uz to se koriste i drugi materijali poput gume, čelika i poliestera za dodatne karakteristike skija. Polimer ojačan staklenim vlaknima ili ugljičnim vlaknima djeluju kao „mehanizam potpore“ koji obuhvaća drvenu jezgru.

U proizvodnom postupku, skije se slože u kalupu s raznim slojevima kompozita i drugih materijala, te se sve to podvrgne stiskanju i zagrijavanju kako bi se skija oblikovala. Rad s ovako različitim materijalima koji reagiraju različito na uvjete povišene temperature i vlažnosti predstavlja izazov, jer je preciznost izrade ključna za uspješnu izradu skija.

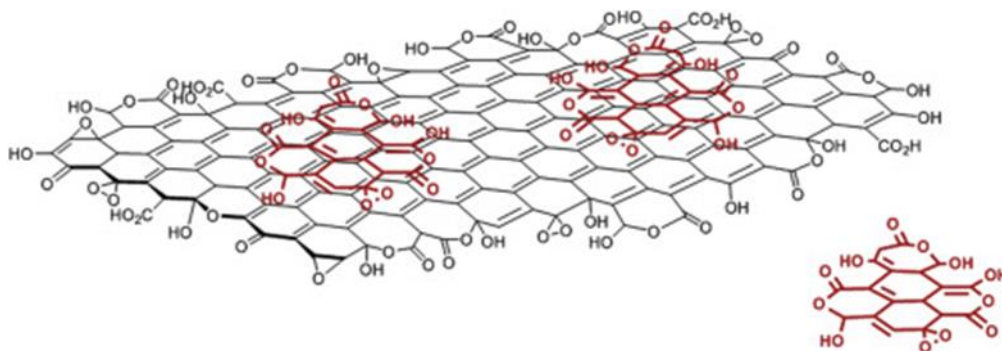
Skije tvrtke Folsom ojačane 100 % ugljičnim vlaknima lagane su i visokih performansi, no uporabom grafena poboljšavaju se mehanička svojstva skija uz manju uporabu materijala, što rezultira lakšim skijama koje još uvijek zadovoljavaju visoke Folsomove standarde (Slika 10.).



Slika 10. Dodavanje grafena pri izradi kompozita [14]

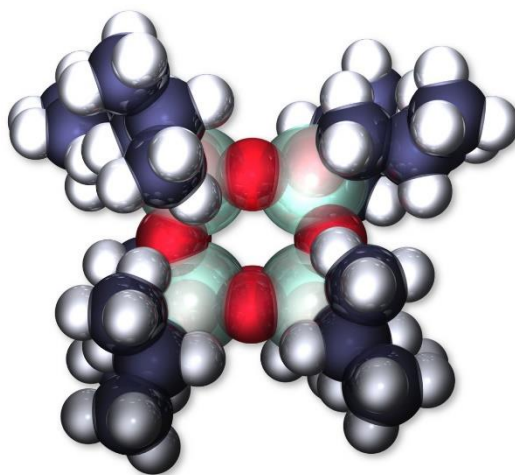
2020. godine počinju upotrebljavati E-GO, hibridni produkt grafenovog oksida (Slika 11.) i epoksidnog polimera poliedarskog oligomernog silseskvioksana (POSS) (Slika 12.). Linija proizvoda E-GO razvijena je posebno za poboljšanje žilavosti i smanjenje opasnosti od delaminacije u kompozitnim proizvodima na bazi epoksida. Dizajniran je kao hibridni materijal

kako bi bio kemijski kompatibilan s epoksidnim sustavom smole, a dostupan je u praškastom obliku koji se dodaje tekućim smolama ili kao sprej za prepreg.



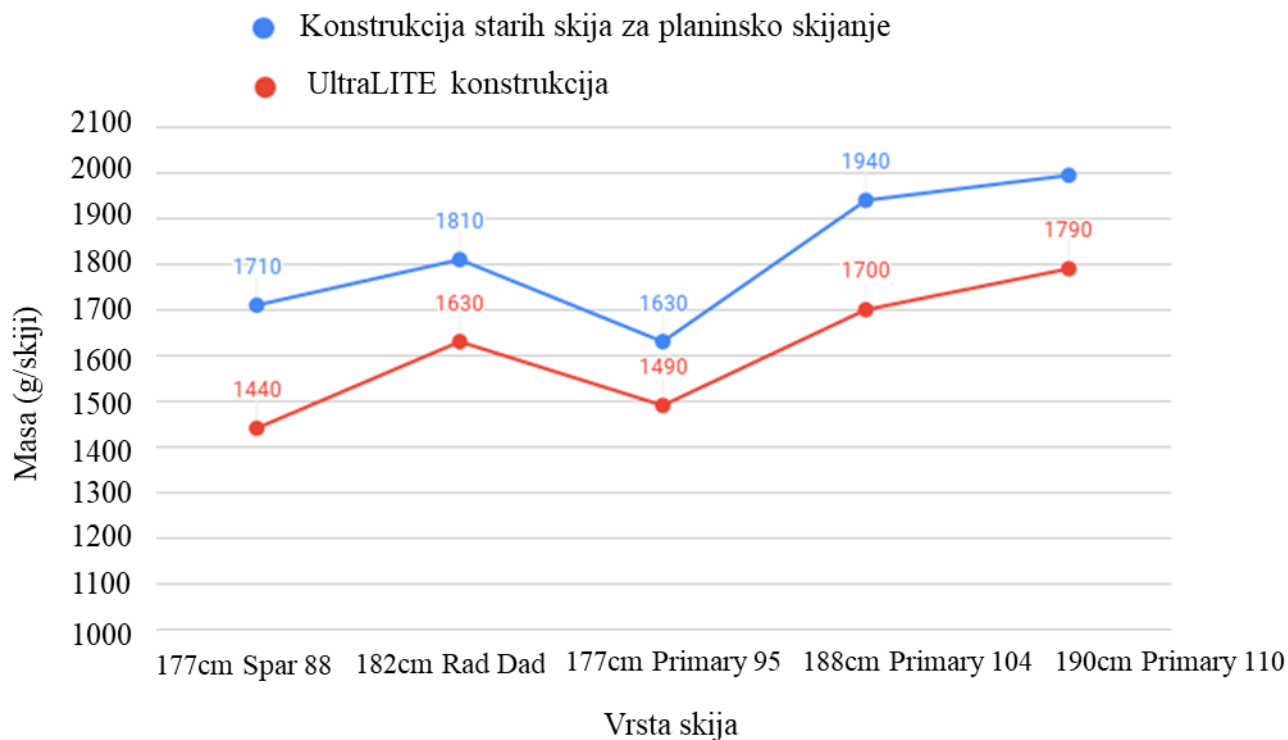
Slika 11. Grafenov oksid [15]

Glavna uloga spoja grafenova oksida i POSS-a je bilo bolje raspršavanje i integracija grafena u polimernu matricu, no uza to su uslijedila i brojna povoljna svojstva poput poboljšanja kemijskih veza, povećanja žilavosti te smanjenje rizika od delaminacije, što je glavna zadaća E-GO-a.



Slika 12. Polimer poliedarski oligomerni silseskvioksan (POSS) [16]

Inkorporacija grafena rezultirala je povećanom čvrstoćom i sposobnostima ublažavanja vibracija, što je omogućilo tvrtki Folsom da izvrši racionalizaciju materijala na skijama, postižući smanjenje mase i time povećavajući konkurentne karakteristike u usporedbi s drugim iznimno laganim planinarskim skijama (Slika 13.).



Slika 13. Usporedba mase konstrukcije starih skija za planinsko skijanje s novom UltraLITE konstrukcijom [14]

Nakon detaljnog protokola mehaničkih i terenskih ispitivanja, skije obogaćene grafenom predstavljene su 2022. godine pod načinom izrade nazvanim UltraLite, pružajući opciju za različite oblike skija unutar Folsomove linije proizvoda.

Osim značajnih ušteda na masi, UltraLite skije pružaju niz prednosti u odnosu na prethodne opcije za planinarske skije tvrtke Folsom, uključujući povećanu čvrstoću, bolje prigušenje vibracija te smanjen rizik od delaminacije, budući da prisutnost E-GO aditiva potiče bolje prijanjanje između različitih slojeva ojačala i unaprijeđene epoksidne matrice.

Dodatak E-GO aditiva potpomaže produbljeno prodiranje epoksidne smole u strukturu drveta u svim relevantnim dijelovima skije, čime se ostvaruje značajan napredak u ojačanju veze i integriteta konstrukcije. Jedan od uobičajenih problema kod skija jest delaminacija, posebno u slučaju planinarskih modela koji su podložni ekstremnim okolišnim uvjetima i varijacijama temperatura. Primjetno je da skije ojačane s E-GO aditivom iskazuju znatno povećanu koheziju materijala i značajno smanjen broj slučajeva delaminacije, čime se znatno unapređuje trajnost i performanse ovih skija u realnim uvjetima eksploatacije. [14]

## 4.2. EKOLOŠKI PRIHVATLJIVI MATERIJALI

Izuzetno bitne inicijative usmjerene na ekološku osviještenost i održivost imaju ključnu ulogu u suvremenom društvu, budući da se sve više prepoznaje potreba za smanjenjem negativnih utjecaja na okoliš, poboljšanjem percepcije potrošača te postavljanjem primjera za širu zajednicu. Ova paradigma potiče dublje istraživanje i primjenu zelenih tehnologija i rješenja, pri čemu se kompozitni materijali ističu kao relevantni akteri ovog trenda.

Kao ključni element u razvoju ekološki prihvatljivijih opcija, razvoj nano ili biosmola predstavlja ključni aspekt. Kroz iskorištavanje recikliranih komponenti i precizno prilagođavanje svojstava, postiže se dublja integracija ekoloških vrijednosti. To se manifestira kroz niže emisije ugljikovog dioksida te ublažavanje kontaminacije tla, čime se dodatno promiče zelena agenda.

Važno je naglasiti da su mogućnosti proizvodnje kompozitnih materijala značajno proširene. Inovativni pristupi, poput onih koji uključuju upotrebu industrijskih trodimenzionalnih pisaa ili proizvodnju na licu mjesta, donose niz prednosti. Eliminacija potrebe za transportom materijala, kao i smanjenje potreba za radnom snagom i resursima, ističu se kao ključne prednosti ovog pristupa.

Primjena kompozitnih materijala u obliku drvo – polimernih kompozita pruža znatan napredak u odnosu na tradicionalne opcije. Njihova otpornost na vremenske uvjete i okoliš, niska potreba za održavanjem te jednostavnost uporabe i instalacije doprinose stvaranju održivih i ekološki odgovornih rješenja za građevinske projekte.

Uz to, koncept recikliranih materijala se širi i na razvoj, dizajn i korištenje kompozitnih materijala. Implementacija recikliranih komponenata omogućuje kreativno oblikovanje potpuno novih rješenja. Uspješno usmjereni napori mogu rezultirati potpuno novim materijalima, poput proizvoda od recikliranog drva (Slika 14.) ili betona, koji imaju smanjeni utjecaj na okoliš. Ovo se postiže kroz ponovnu uporabu i prilagodbu materijala, uz istodobno osiguravanje kvalitetnije i trajnije konstrukcije putem ojačanja i kompozitnih konstrukcija.

Sveukupno gledajući, upotreba kompozitnih materijala u sklopu zelenih inicijativa predstavlja ključni korak prema održivijoj budućnosti. Kroz integraciju naprednih materijala, tehnologija i

održivih praksi, moguće je ostvariti visokokvalitetna rješenja koja ne samo da smanjuju negativne ekološke utjecaje, već i podižu svijest o važnosti očuvanja okoliša i odgovornog upravljanja resursima. [1]



Slika 14. Reciklati drva [17]

#### **4.2.1. Trendovi u postupcima recikliranja i ponovne uporabe kompozitnih materijala**

Suočeni s rastućim ekološkim zabrinutostima zbog prekomjerne uporabe umjetnih materijala, globalni interes sve više se usmjerava prema razvoju održivih materijala te primjeni kružnog ekonomskog modela putem recikliranja. U današnje vrijeme, kompozitni materijali postaju izrazito zastupljeni u različitim industrijskim sektorima, što istovremeno uzrokuje znatnu akumulaciju polimernog otpada u okolišu, zbog čega implementacija postupaka za zbrinjavanje na kraju životnog ciklusa (EOL) postaje imperativna.

Postupci recikliranja koji su usvojeni za polimerne kompozite ostvaruju dvostruku korist. Prvo, takvi postupci recikliranja smanjuju potrošnju novih ojačala u kompozitima. Drugo, energetska zahtjevi za ponovnu upotrebu obnovljenih kompozitnih materijala značajno su niži u usporedbi s klasičnim tehnologijama proizvodnje. Razvijaju se novi postupcima recikliranja i ponovne uporabe koji su primjenjivi na polimernim materijalima i kompozitima. Među raznolikim postupcima recikliranja za polimerne kompozite, energetska oporaba („toplinsko recikliranje“) posebno se ističe kao optimalan pristup za regeneraciju ugljičnih vlakana i staklenih vlakana. Energetskom oporabom postižu se svojstva recikliranih materijala ojačala koja su velikim dijelom usklađena s prvobitnim svojstvima i uz znatno nižu potrošnju energije. Međutim, mehaničko recikliranje zahtijeva iznimno nisku energetska potrošnju u procesu recikliranja kompozita, što ga čini povoljnim izborom u usporedbi s drugim postupcima.

Glavne komponente koje se koriste u kompozitnim materijalima obuhvaćaju polimere, metale i keramiku. Međutim, neizbježno je da završetak životnog ciklusa ovih komponenata rezultira povećanom akumulacijom polimernog otpada, što potiče istraživače da posvete veći trud razvoju inovativnih strategija upravljanja otpadom, s ciljem ublažavanja ekološkog utjecaja i očuvanja resursa.

Prema izvještaju iz 2015. godine o otpadu kompozitnih materijala u lancu opskrbe u Velikoj Britaniji, gotovo 98 % takvog otpada završava na odlagalištima ili se spaljuje. Odlaganje i spaljivanje su često korištene strategije upravljanja otpadom od kompozitnih materijala u različitim zemljama, iako te prakse nisu sasvim ekološki prihvatljive. Spaljivanje, primjerice, generira energiju, no uzrokuje visoke emisije ugljikovog dioksida, CO<sub>2</sub>, dok odlaganje može izazvati probleme s podzemnim vodama.

Recikliranje se općenito definira kao proces obnove i ponovne uporabe otpadnih materijala, pri čemu se ponekad zahtijevaju različiti tehnološki postupci kako bi se otpad pretvorio u nove proizvode, materijale ili sastojke. Kružna ekonomija poznata je kao koncept proizvodnje bez otpada, predstavlja industrijski sustav koji podupire cikličku preradu, ponovnu uporabu i recikliranje proizvoda kada dođu do kraja njihovog životnog vijeka. U današnjem modernom društvu, primarna strategija industrija usmjerena je na razvoj kružne ekonomije putem implementacije recikliranja unutar zatvorene petlje. Koncept kružne ekonomije ne samo da doprinosi eliminaciji toksičnih materijala i otpada, već istodobno potiče razvoj proizvoda s odgovarajućim mehaničkim svojstvima.

Godišnja globalna proizvodnja ugljičnim vlaknima ojačanih polimernih kompozita doseže oko 350 000 tona. Predviđa se da će do 2050. godine količina generiranog polimernog otpada iznositi gotovo 25 milijardi tona. Korištenje prirodnih resursa kao što su prirodna vlakna, polisaharidi (škrob, gluten i celuloza) i drugi prirodno dostupni biopolimeri u kompozitnim materijalima predstavlja alternativu za suočavanje s problemom otpada od polimernih kompozita. Biokompoziti se lako razgrađuju bez negativnog utjecaja na okoliš. Važno je napomenuti da se ti kompoziti često ne mogu koristiti na vanjskim dijelovima konstrukcija zbog svoje sposobnosti apsorpcije vlage.

Kako bi se razvilo sveobuhvatno znanje o postupcima recikliranja polimernih kompozitnih materijala, trenutnim primjenama i budućim izazovima, važno je odrediti potrošnju energije u

svakom postupku recikliranja. Kod mehaničkog recikliranja potrošnja energije uglavnom se određuje korištenjem industrijskog granulatora, npr. Wittmann MAS1, za recikliranje. Za vrijeme energetske uporabe mjeri se količina potrebne topline u peći. Potrošnja energije procjenjuje se na temelju potrošnje skupih kemikalija, zajedno s visokim razinama vještina, potrebnih za kemijsku uporabu polimernih kompozita. Ovi koraci doprinose stvaranju sveobuhvatnog modela recikliranja polimernih kompozita, pružajući precizne smjernice i usporedne informacije o postupcima recikliranja. [18]

### **4.3. Naprednije projektiranje i razvoj komponenti**

Kompozitni materijali predstavljaju revolucionaran pristup u inženjerstvu i dizajnu, omogućujući inteligentno oblikovanje unutarnjih komponenata te mnogo više od toga. Oni donose promjene koje sežu daleko izvan tradicionalnog okvira, omogućujući kreiranje komponenti koje su inteligentno prilagođene specifičnim zahtjevima i namjeni.

Jedan od ključnih aspekata kompozitnih materijala je sposobnost zamjene gotovo cijele skupine dijelova jednim dijelom izrađenim od kompozita. Ovo otvara vrata značajnim pojednostavljenjima u dizajnu i proizvodnji. Umjesto složenih sklopova različitih dijelova, sada je moguće imati jedan kompozitni dio koji obavlja istu funkciju. To ne samo da smanjuje broj komponenata koje treba uskladiti, već i pojednostavljuje montažu i smanjuje potrebu za održavanjem. Ovakav pristup također povećava pouzdanost, smanjujući rizik od kvarova i na taj način korištenje kompozitnih materijala može pridonijeti smanjenju troškova.

Također je važno istaknuti fleksibilnost u oblikovanju i teksturiranju površina kompozitnih materijala. Moguće je postići različite teksture i završne obrade na površinama kompozitnih dijelova, prilagođavajući ih specifičnoj namjeni ili estetskim zahtjevima. Ovo otvara nove mogućnosti u dizajnu, omogućujući kreativnost i personalizaciju. Površine kompozitnih dijelova mogu biti dizajnirane s obzirom na specifične zahtjeve trenja, trošenja ili otpornosti na koroziju, dodatno poboljšavajući performanse i trajnost.

Važno je naglasiti da kompozitni materijali nisu bitni samo u segmentu troškova i pojednostavljenja proizvodnje. Oni otvaraju put k bržem i preciznijem razvoju novih komponenata. Ova fleksibilnost omogućuje inženjerima da brže odgovore na promjenjive

zahtjeve tržišta i tehnologije. Prilagodljivost dizajna i sposobnost brze optimizacije omogućuju testiranje i implementaciju novih rješenja uz manje rizike i troškove.

U konačnici, kompozitni materijali predstavljaju korak naprijed u inženjerstvu i dizajnu, omogućujući kompleksne, visokoučinkovite komponente koje su prilagođene specifičnim potrebama. Njihova primjena ne samo da mijenja način na koji razmišljamo o dizajnu i proizvodnji, već i otvara nove mogućnosti za inovacije u raznim industrijama. [1]

#### **4.4. Digitalna proizvodnja kompozita**

U proteklom desetljeću, kompozitni materijali doživjeli su značajan napredak u proizvodnji, s posebnim naglaskom na razvoj naprednih tehnologija kao što je digitalna proizvodnja kompozita (engl. *Digital Composite Manufacturing*, DCM). Nekadašnji postupci izrade kompozita zahtijevali su dugo vrijeme te veliki udio ručnog rada, dok su nove tehnologije omogućile znatno učinkovitiju i bržu proizvodnju.

Jedna od ključnih prednosti digitalne proizvodnje kompozita (DCM) je sposobnost da izrade dijelova i komponenti od kompozitnih materijala bez potrebe za ručnim radom. Moguće je izraditi digitalni dizajn željenog dijela koristeći sofisticirane softverske alate i simulacije kako bi optimizirali geometriju i karakteristike materijala. Nakon što je dizajn finaliziran, proizvodni postupak se automatski pokreće, omogućujući strojevima da precizno izrađuju kompozitne dijelove s visokom preciznošću i ponovljivosću.

Ovaj napredni pristup proizvodnji kompozita donosi brojne prednosti. Značajno smanjuje vrijeme potrebno za proizvodnju kompozitnih dijelova, čime se ubrzava razvojni ciklus proizvoda te eliminira potrebu za ručnim radom, što smanjuje moguće ljudske pogreške i povećava ukupnu kvalitetu proizvoda. Omogućuje i optimizaciju dizajna i materijala za bolje performanse i ekonomičniju proizvodnju.

Ova tehnologija se široko primjenjuje u različitim industrijama, uključujući aeronautiku, automobilsku industriju, energetiku, medicinu te mnoge druge. Primjena DCM-a u proizvodnji kompozitnih dijelova za vjetroagregate, letjelice i medicinske uređaje samo su neki od primjera gdje su prednosti ovog pristupa posebno istaknute.

U budućnosti se očekuje daljnji razvoj digitalne proizvodnje kompozita, što će rezultirati još bržim, preciznijim i ekonomičnijim postupcima izrade kompozitnih materijala. Ova tehnologija

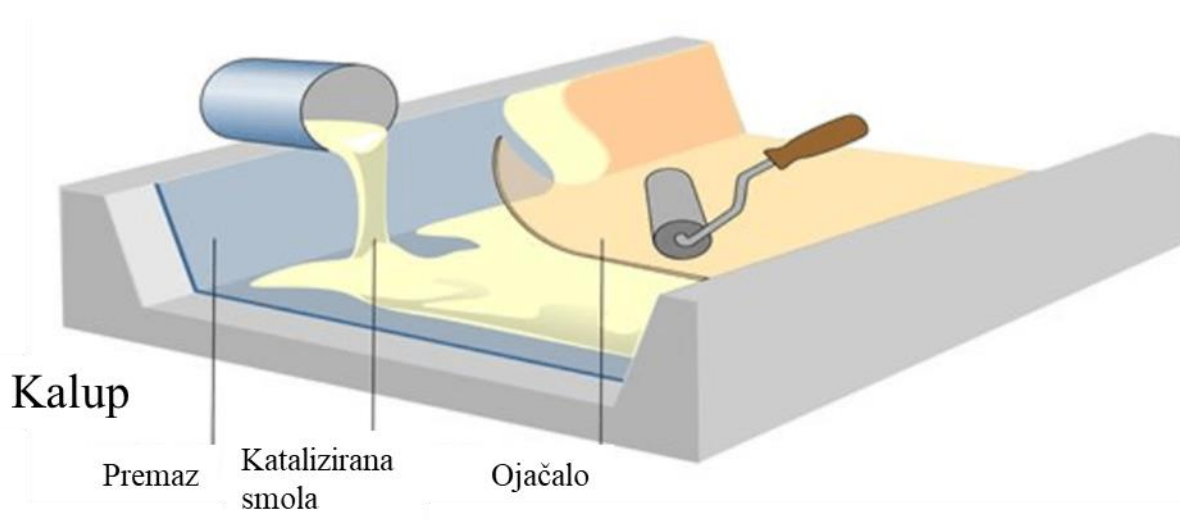


će vjerojatno značno promijeniti način na koji se kompoziti proizvode i koriste u širokom rasponu industrija, pridonoseći inovacijama, održivosti i napretku. [1]

#### 4.4.1. Tradicionalna proizvodnja kompozita

Koncept kompozitnih materijala, koji uključuje kombinaciju dva ili više različitih materijala kako bi se stvorio materijal s različitim kemijskim i fizikalnim svojstvima od pojedinačnih komponenata, postao je ključan u razvoju materijala poboljšanih svojstava. Ovi materijali postali su nositelji napretka u inženjerstvu materijala.

Jedan od značajnih izazova u tradicionalnoj proizvodnji kompozita (Slika 15.) leži u postupcima koji zahtijevaju znatna vremenska i financijska ulaganja. Ovaj pristup ograničava učinkovitost proizvodnje, oblikovanje dijelova i općenito otežava ostvarivanje punog potencijala kompozitnih materijala.



Slika 15. Tradicionalna proizvodnja kompozita [19]

U tom kontekstu, razvoj Fortifyove platforme za digitalnu proizvodnju kompozita (DCM) predstavlja značajan korak naprijed. Napredni pristup kombinira prednosti aditivne proizvodnje (trodimenzionalnog ispisivanja) s naprednim mogućnostima kontrole orijentacije i rasporeda vlakana. Ova inovacija omogućuje precizno oblikovanje kompozitnih dijelova uz visoku čvrstoću i trajnost u radnim uvjetima, uz istovremeno smanjenje potrebnog vremena i resursa za proizvodnju.

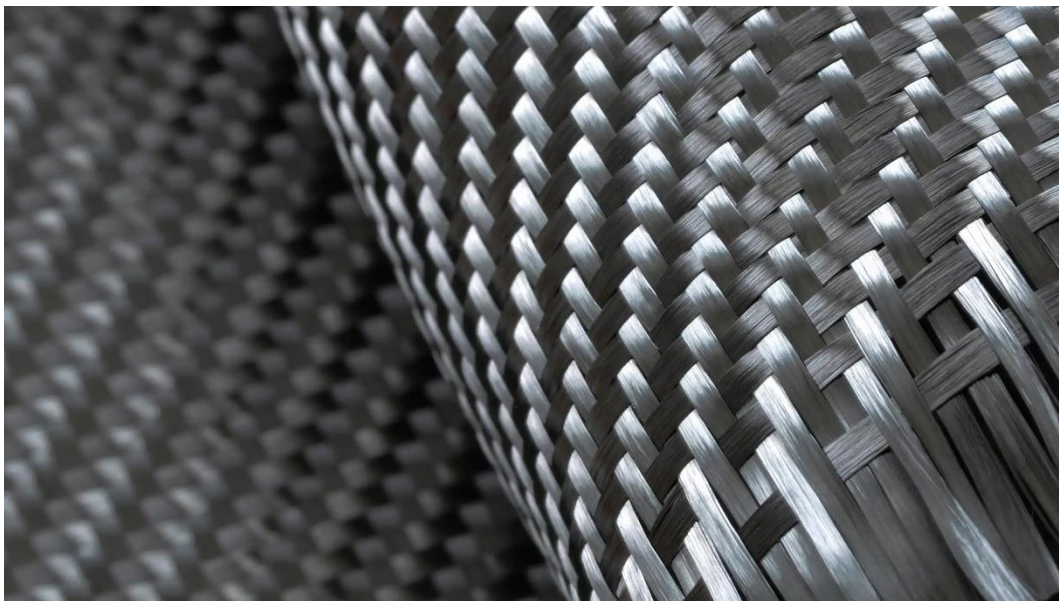
U svjetlu ovih razvoja, tradicionalna proizvodnja kompozita doživljava transformaciju prema učinkovitijim i naprednim postupcima, otvarajući vrata novim mogućnostima u raznim industrijama. Ova promjena omogućuje kompozitnim materijalima da budu ključni materijali u razvoju inovativnih rješenja visoke performanse, uključujući sektor obnovljivih izvora energije, gdje su lagani i čvrsti kompozitni dijelovi od velikog značaja za napredak tehnologije i održivosti. [19]

#### **4.4.2. Trenutačno stanje trodimenzionalno ispisanih kompozita**

Trodimenzionalno ispisivanje kompozitnih materijala predstavlja inovativan pristup proizvodnji koji je doživio značajan napredak posljednjih godina. Ova tehnologija omogućuje stvaranje trodimenzionalnih objekata sloj po sloj uz upotrebu kompozitnih materijala, što otvara vrata širokom rasponu primjena u različitim industrijama. Jedan od ključnih izazova u razvoju trodimenzionalno ispisanih kompozita bio je integracija staklenih (Slika 16.) i ugljičnih vlakana (Slika 17.) kako bi se poboljšala čvrstoća i otpornost materijala na neki od čimbenika koji loše utječu na materijal ovisno o radnim uvjetima. [19]



Slika 16. Staklena vlakna [20]

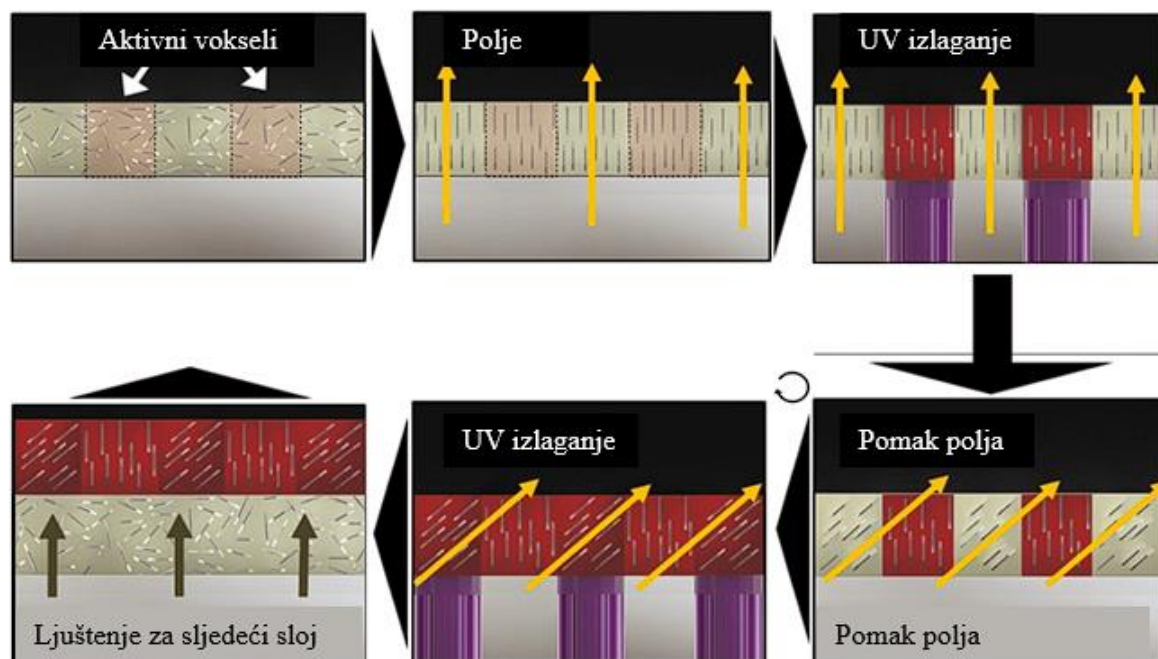


Slika 17. Ugljična vlakna [21]

Rani radovi na integraciji vlakana u trodimenzionalno ispisane materijale pokazali su obećavajuće rezultate, ali su se suočavali s izazovom kako kontrolirati orijentaciju vlakana kako bi se postigao maksimalan utjecaj na svojstva materijala. To je posebno važno jer su svojstva kompozita izravno povezana s rasporedom i orijentacijom vlakana unutar materijala. Dosadašnji pristupi nisu uvijek uspijevali postići potrebnu preciznost i kontrolu nad rasporedom vlakana tijekom trodimenzionalnog ispisivanja.

Međutim, Fortifyova platforma Digital Composite Manufacturing (DCM) predstavlja značajan napredak u razvoju trodimenzionalno ispisanih kompozita. DCM pristup kombinira prednosti aditivne proizvodnje (trodimenzionalnog ispisivanja) s naprednom kontrolom orijentacije i rasporeda vlakana. Ovaj inovativni pristup omogućuje lokaliziranu kontrolu vlakana tijekom izrade dijelova, što rezultira materijalima s poboljšanim svojstvima čvrstoće i otpornosti na neki od neželjenih utjecaja ovisno o primjeni.

Uz DCM tehnologiju, moguće je ispisivati dijelove s precizno kontroliranom strukturom vlakana, omogućujući postizanje optimalnih svojstava materijala za specifične primjene, što dovodi do novih mogućnosti u industriji, uključujući razvoj laganih, čvrstih i izdržljivih kompozitnih dijelova za različite sektore kao što su zrakoplovstvo, automobilska industrija, energetika i mnogi drugi (Slika 18.). [19]



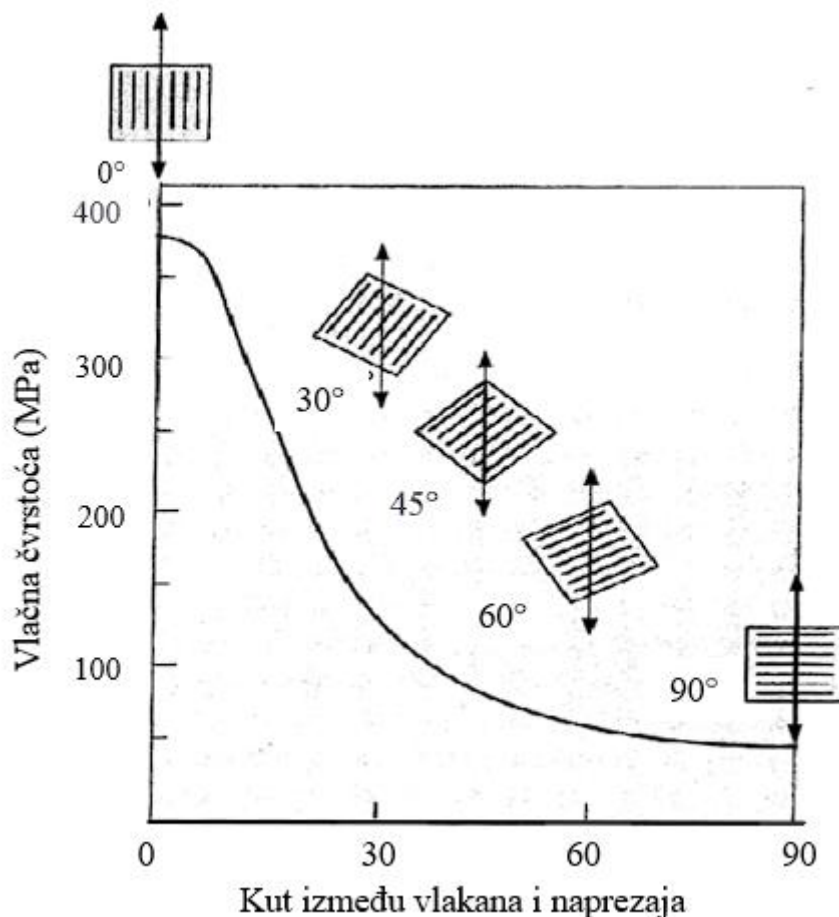
Slika 18. Kontrola vlakana tijekom izrade dijelova [19]

Priroda već tisućljećima postavlja vlakna na elegantne, organske načine kako bi stvorila „supermaterijale“ koje karakterizira čvrsta i lagana struktura poput bambusa i školjki. U današnje vrijeme DCM koristi softver i magnete kako bi se imitirale takve prirodne strukture i u umjetno dobivenim materijalima. Vlakna se pažljivo poravnavaju na mikroskopskoj razini kako bi se optimizirala svojstva materijala za novu generaciju umjetno stvorenih supermaterijala. Oni se mogu prilagoditi individualnim primjenama i proizvesti, po potrebi, bilo gdje u svijetu bez visokih troškova ili specijalizirane radne snage. Ova uzbudljiva inovacija gurat će kompozite i aditivnu proizvodnju prema novim granicama. [19]

#### **4.4.3. Usmjeravanje vlakana unutar trodimenzionalno ispisanih alata za injekcijsko prešanje polimernih materijala**

Orijentacija vlakana ima ključnu ulogu u određivanju mehaničkih svojstava kompozitnih materijala korištenih za trodimenzionalno ispisivanje alata za injekcijsko prešanje polimernih materijala. Prema literaturi [22] orijentacija vlakana često je posljedica djelovanja smičnih sila i protoka smole tijekom postupka izrade. Proizvođači su obvezni koristiti složene postupke oblikovanja kako bi povoljno utjecali na orijentaciju vlakana. No, ovaj složeni proces nosi sa sobom brojne kompromise i izazove. Mehanička svojstva dijela najviša su uzduž osi vlakana i

niža su kako se orijentacija opterećenja pomiče s te osi (Slika 19.). Stoga je usmjeravanje vlakana ključno za postizanje optimalnih svojstava materijala.



Slika 19. Ovisnost vlačne čvrstoće i orijentacije vlakna u kompozitu [22]

Najčešća metoda je kombinacija duromera s kratkim vlaknima i iskorištavanje smičnih sila pri ekstruziji za orijentaciju vlakana, ali ta metoda ima mnogo ograničenja zbog složenih orijentacija vlakana i tipičnih ograničenja metode taloženja (engl. *Fused Filament Fabrication*, FFF) poput anizotropije. Fortify se izazovu suprotstavlja stvaranjem aditivnih proizvodnih rješenja, za inženjerska svojstva materijala uz kontrolu usmjeravanja vlakana, kao što su:

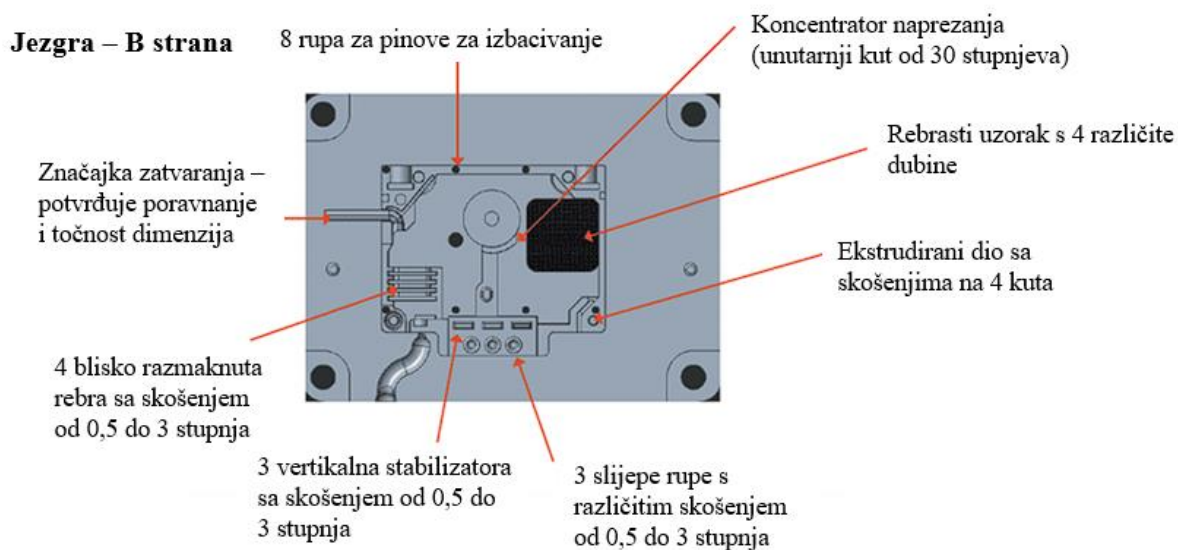
1. Tvrtka Fortify omogućuje dodavanje aditiva, kao što su vlakna u fotopolimer. Ovaj sustav omogućuje FLUX 3D pisačima obradu i ispis vrlo viskoznih, punjenih materijala (Slika 20.).



Slika 20. Fortify FLUX 3D - Industrijski 3D pisač za smole [23]

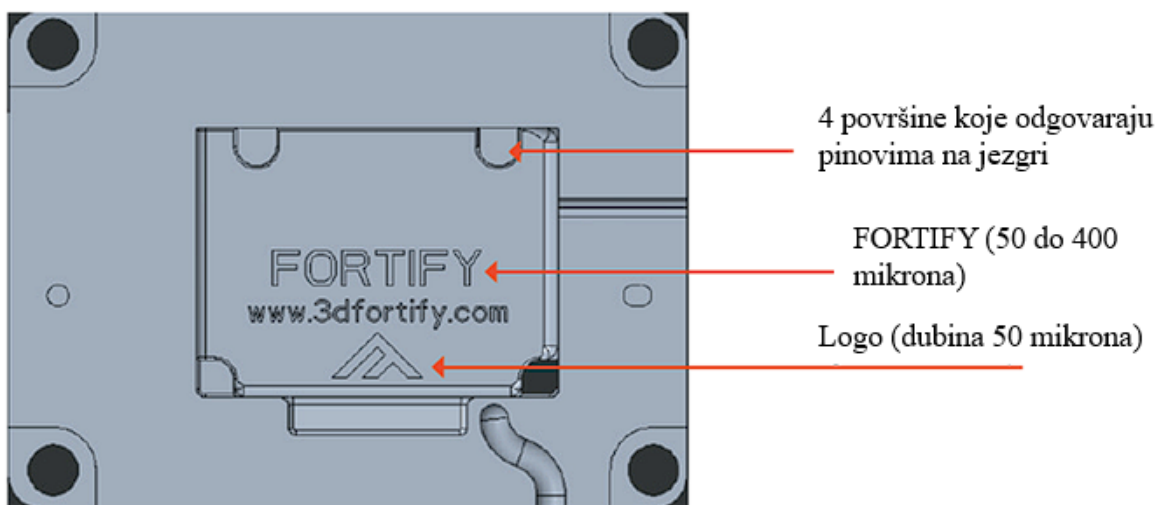
2. Modul Fluxprint za DLP trodimenzionalni ispis omogućuje usmjeravanje vlakana tijekom ispisa korištenjem prilagođenih elektromagneta za stvaranje magnetskog polja. To povećava mehanička svojstva trodimenzionalno ispisanih dijelova, posebno za primjene izložene visokim naprezanjima, kao što su alati za injekcijsko prešanje polimernih materijala.

Kada je riječ o primjeni kalupa za oblikovanje, stručnjaci iz tvrtke Fortify su zaključili da je unaprijed definirana orijentacija vlakana kroz cjelokupni dio optimalni pristup. Ovakav pristup pruža prednosti usmjeravanja orijentacije vlakana bez potrebe za dodatnim programiranjem. Tvrtka Fortify je razvila precizno programiranu metodu usmjeravanja vlakana za kalupe koji se koriste u postupku injekcijskog prešanja polimernog materijala. Ova metoda postiže uravnoteženost između postizanja najboljih materijalnih svojstava i potrebnog vremena izrade. Kako bi potvrdili i unaprijedili ovaj pristup, inženjeri su osmislili razvojni kalup koji služi kao „test opterećenja“. Ovaj test ima za cilj kvantitativno procijeniti male razlike u performansama kalupa, uzimajući u obzir različite materijale, metode usmjeravanja i uvjete obrade (Slika 21., Slika 22.). [22]



Slika 21. Testni kalup B strana [22]

### Šupljina – A strana



Slika 22. Testni kalup A strana [22]

Testna geometrija sadržava više od 30 značajki koje simuliraju različite oblike injekcijskog prešanja polimernog materijala. Fortify je razvio shemu usmjeravanja orijentacije i distribucije vlakana za kalupe koji se koriste u injekcijskom prešanju polimernog materijala, što je rezultiralo značajnim poboljšanjem performansi. Korištenjem magnetskog usmjeravanja vlakana (Fluxprint), u proizvodnom postupku nedostaci kalupa su se smanjili za 80% u usporedbi s onima bez Fluxprinta. Ovo je važno za trodimenzionalno ispisane kalupe koji

moraju izdržati u uvjetima naprezanja prilikom oblikovanja. Kombinacija CKM-a i Fluxprinta omogućava Fortifyu stvaranje alata za male serije koji mogu prešati i tvrde polimerne materijale. [22]

#### 4.5. Nove primjene

Tijekom stoljeća, proces izgradnje i razvoja novih proizvoda temeljio se na tradicionalnom postupku koji je uključivao ručni rad, korištenje fizičkih resursa i materijala te značajna ulaganja u obliku novca i vremena. Međutim, sve se to sada mijenja zahvaljujući inovativnom spoju digitalnih tehnologija i kompozitnih materijala. U toj transformaciji ističe se jedan startup nazvan Mighty Buildings koji se oslanja na jedinstveni duromerni kompozit poznat kao „*light stone material*“. Ova tvrtka koristi kompozitne materijale u kombinaciji s trodimenzionalnim ispisom, predgotovljenim dijelovima i robotskom tehnologijom kako bi automatizirala velike građevinske projekte, uključujući stambene objekte.

Ono što čini ovu inovaciju zapanjujućom jest sposobnost Mighty Buildingsa da trodimenzionalno ispisuje kuće i zgrade. Ovaj pristup označava prekretnicu u načinu na koji se gradnja i razvoj odvijaju u budućnosti. Kompozitni materijali igraju ključnu ulogu u ostvarivanju ovog napretka, omogućavajući potpuno nove i revolucionarne primjene. Istodobno, ti novi pristupi donose mnoge prednosti, uključujući smanjenje troškova i ubrzanje izgradnje.

Osim što omogućuje bržu i učinkovitiju proizvodnju, ova tehnologija također otvara vrata potpuno novim mogućnostima. Možemo zamisliti potpuno automatizirane procese, gdje roboti izvode ključne korake u izgradnji novih domova, kompleksa ili struktura. Ovo predstavlja revolucionaran iskorak prema digitalno vođenim razvojnim rješenjima. [1]

##### 4.5.1. Trodimenzionalno ispisane zgrade

Napredak u aditivnoj proizvodnji donio je napredak u trodimenzionalno ispisanim zgradama (Slika 23.) što značajno smanjuje vrijeme potrebno za tradicionalni pristup gradnji te se ono mjeri u danima, a ne mjesecima što značajno utječe na troškove gradnje. [24]





Slika 23. Trodimenzionalno ispisana zgrada [25]

Trodimenzionalno ispisane zgrade otvaraju nove prilike. Napredak u trodimenzionalnom ispisivanju omogućava bržu i jeftiniju izgradnju zgrada. Ovi primjeri potiču razmišljanje o budućim mogućnostima, kao što su ispisane garaže, nadstrešnice, terase ili brze izgradnje manjih domova. Očekuje se šira raznolikost i veći broj takvih zgrada dok se eksperimentira s potencijalom trodimenzionalnog ispisivanja. Ekološki prihvatljivi materijali podržavaju održivost. [24]

#### **4.5.2. Napredak u razvoju trodimenzionalno ispisanih zgrada**

Interdisciplinarni projekt koji povezuje znanstvenike sa Sveučilišta Auburn (Alabama, SAD) i Sveučilišta u Idahu (Moskva) ima za zadatak ostvariti napredak u budućem naprednom proizvodnom sektoru poput trodimenzionalno ispisanih zgrada.

Dio projekta za koji su zaduženi znanstvenici sa Sveučilišta Auburn obuhvaća razvoj biosmola kao sirovine za trodimenzionalno ispisivanje zgrada, dok će se sami postupak ispisa odvijati u Idahu. Postupak razvoja biosmola uključuje pretvaranje biomase u kemijske spojeve i nanomaterijale kako bi se poboljšala održivost smola. Osim razvoja bio smola znanstvenici

istražuju razliku između ekološkog utjecaja betona i čelika koji se koriste u izgradnji tradicionalnih zgrada te drvenih zgrada koje emitiraju između trećine i polovine stakleničkih plinova koje emitiraju tradicionalni materijali.

U SAD-u teže izgradnji visokih drvenih zgrada kako bi smanjili mjeru ukupne emisije stakleničkih plinova, posebno ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) kroz određeno vremensko razdoblje te na taj način utjecali na smanjenje globalnih klimatskih promjena. U trodimenzionalnom ispisivanju zgrada koriste više otpadnih biomaterijala iz šumskih resursa, a to im omogućuje napredna proizvodnja.

Ovaj pristup može značajno doprinjeti smanjenju utjecaja građevinske industrije na okoliš. Upotreba drva kao građevinskog materijala ima prednosti, jer drvo može služiti kao skladište ugljika tijekom životnog vijeka trajanja zgrade, što dalje doprinosi smanjenju ukupnog ugljičnog otiska građevinskih projekata, stoga je projekt usmjeren prema industriji buduće napredne proizvodnje.

Predviđa se proizvodnja trodimenzionalno ispisanih zidnih panela koji se mogu koristiti prilikom gradnje zgrada. Komponente koje su trodimenzionalno ispisane, a sastavljene su od biomaterijala, moguće je reciklirati na kraju njihovog životnog vijeka.

Važan cilj ovog projekta je što manje ovisiti o naftnim resursima i što više koristiti prirodne izvore ili otpadne proizvode. Ključno je pronaći načine kako koristiti šumske biomase i druge poljoprivredne ostatke kako bi se proizvele zgrade s niskim ugljičnim otiskom, stoga se razvijaju smole i aditivi iz otpadnih materijala. [26]

#### **4.6. Odlazak u atomski svijet**

"Odlazak u atomski svijet materijala" odnosi se na istraživanje materijala na razini pojedinačnih atoma ili molekula. Ovo je vrlo napredno područje znanosti o materijalima koje omogućava preciznu kontrolu i prilagodbu svojstava materijala na najmanjoj mogućoj skali. Atomski svijet materijala uključuje izradu nanostrukture i nanomaterijala s posebnim svojstvima (materijali koji imaju svojstva koja su jedinstvena na nano razini, poput ugljikovih nanocjevčica ili

grafena) te prilagodbu površina materijala na nanorazini kako bi se postigla određena povoljna svojstva poput korozijske otpornosti.

U proizvodnji, istraživanju i razvoju kompozitni materijali na atomskoj razini mogu značajno unaprijediti proces stvaranja proizvoda. Mogli bismo svjedočiti bržem i efikasnijem oblikovanju i proizvodnji komponenata, što bi rezultiralo smanjenjem vremena i resursa potrebnih za proizvodnju. Nadalje mogla bi se postići veća preciznost i dosljednost u proizvodnji, čime bi se smanjila potreba za održavanjem i popravcima. U području istraživanja i razvoja, nanomaterijali pružaju značajne mogućnosti za eksperimentiranje i stvaranje inovacija. Znanstvenici i inženjeri mogli bi istraživati nove načine primjene ovih materijala, stvarajući temelj za buduće tehnološke napretke. Primjena ovih kompozitnih komponenata u istraživanju svemira mogla bi omogućiti stvaranje čvršćih i pouzdanijih materijala za svemirske letjelice, otvarajući vrata za napredne misije istraživanja dubokog svemira.

U sferi potrošačke elektronike, poput pametnih telefona, ovi materijali bi mogli transformirati način na koji doživljavamo i koristimo uređaje. Telefoni izrađeni od ovih materijala bili bi otporni na udarce i padove te bi zadržali svoj izgled bez ogrebotina ili oštećenja, čime bi se povećala njihova trajnost.

U automobilskoj industriji, novi kompozitni materijali omogućili bi dizajniranje vozila s iznimno čvrstom nosivom konstrukcijom, istovremeno smanjujući masu vozila što bi smanjilo potrošnju goriva. To bi također moglo povećati sigurnost putnika i smanjiti potrebu za čestim popravcima nakon nesreća. [1] [27]

Kada je riječ o građevinskoj industriji, primjena ovih materijala mogla bi dovesti do stvaranja zgrada i infrastrukture koja je otporna na ekstremne vremenske uvjete, potrese i druge nepredviđene događaje. To bi rezultiralo dugotrajnijim i sigurnijim konstrukcijama koje bi mogle izdržati test vremena.

U konačnici, ova nova generacija kompozitnih komponenata ima potencijal da transformira način na koji razmišljamo o materijalima i njihovoj primjeni. Njihova izvanredna čvrstoća i izdržljivost otvaraju vrata prema napretku u raznim industrijama, donoseći sa sobom mogućnost za stvaranje inovacija koje bi mogle oblikovati našu budućnost. [1]

#### **4.6.1. Kako novi materijali mijenjaju industriju**

Postavljeni zahtjevi unutar industrija kao što su zrakoplovstvo i automobilska industrija potiču daljnje istraživanje i razvoj materijala prema vrlo zahtjevnim standardima. Prilikom objave popisa preferiranih materijala za buduća vozila, Ford je istaknuo potencijalno revolucionarne materijale koji imaju sposobnost ne samo da poboljšaju performanse vozila, već i da pruže dodatnu razinu sigurnosti koja može doslovno spasiti živote. Profesor Pim van der Jagt, tehnološki voditelj u odjelu za istraživanje i napredno inženjerstvo u Fordu, istaknuo je nekoliko ključnih elemenata na tom popisu. Jedna od ključnih točaka je razvoj novog tipa čelika koji ima čak trostruku čvrstoću u usporedbi s trenutačno upotrebljavanom vrstom čelika. Ova značajna poboljšanja čvrstoće imaju potencijal da pruže vozilima veći otpor prema deformacijama i potencijalnim sudarima, povećavajući time razinu sigurnosti za putnike.

Izuzetno inovativan pristup uključuje i upotrebu polimerne pjene koja se aktivira tijekom nesreće kako bi stabilizirala strukturu vozila. Ova tehnologija može pomoći u apsorpciji i raspodjeli energije generirane sudarom, čime bi se smanjile ozljede putnika i oštećenje vozila. Nadalje, spomenuti su i kompoziti s nanopunilima, kojima bi se mogla postići značajna poboljšanja relativne čvrstoće materijala, tj. omjera čvrstoće i gustoće. Ovi materijali, kojima je cilj značajno smanjiti gustoću uz istovremeno povećavanje čvrstoće, mogli bi rezultirati vozilima koja su lakša, ekonomičnija u potrošnji goriva i otpornija na deformacije u slučaju sudara. [27]

Izuzetno tehnološko napredovanje u području kompozitnih materijala omogućava zrakoplovnim inženjerima da istraže nove granice u razvoju materijala. Kompoziti su se izdvojili kao ključni materijal u zrakoplovstvu zbog svoje sposobnosti da istovremeno kombiniraju visoku čvrstoću s niskom gustoćom. Ovi materijali često se sastoje od vlakana (poput ugljičnih vlakana) i matrice, stvarajući tako iznimno čvrstu i laganu strukturu.

Svjedočimo transformaciji zrakoplovne industrije u kojoj su kompoziti postali nezaobilazni. Dr. Eleanor Merson, stručnjakinja za istraživanje kompozita, ističe dramatičnu evoluciju u upotrebi ovih materijala. Prije samo trideset godina, kompoziti su činili manji udio u strukturi zrakoplova, dok danas, primjerice kod komercijalnog zrakoplova poput Dreamlinera (Slika 24.), kompoziti čine gotovo polovicu ukupne konstrukcije. Ovo značajno povećanje udjela kompozita učinilo je zrakoplove lakšima, izdržljivijima i ekonomičnijima u potrošnji goriva.

Dodatno, napredak u kompozitnim materijalima omogućava inženjerima da oblikuju strukture koje su otpornije na ekstremne uvjete, vibracije i naprezanja uzrokovana letom. Ovo nije samo

tehnički izazov, već i ključan korak prema postizanju ciljeva održivog razvoja u zrakoplovstvu, kao što su smanjenje emisija štetnih plinova i optimizacija potrošnje goriva. [27]

Zrakoplovna industrija suočava se s izazovom prilagodbe materijala budućim zahtjevima u smislu čvrstoće, gustoće i ekološke održivosti. Primjena kompozitnih materijala, kao glavnog igrača u tom procesu, omogućuje daljnji razvoj i inovacije, otvarajući put prema učinkovitijem i naprednijem zrakoplovstvu.



Slika 24. Boeing 787-10 Dreamliner [28]

Kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima su čvršći te teže samo petinu mase čelika. Dreamliner se sastoji od kompozita sačinjenih od ugljičnih vlakana koji se nalaze u krilima, repu, vratima, trupu i unutrašnjosti, što ga čini lakšim avionom. Prema literaturi [27] stručnjaci procjenjuju da smanjenje mase komercijalnog aviona za jedan kilogram može smanjiti troškove njegovog rada za oko 2200 do 3300 dolara godišnje.

#### **4.6.2. Nanomaterijali**

Prema literaturi [29] nanomaterijali su kemijske tvari i materijali sastavljeni od vrlo malih pojedinačnih jedinica, koji zbog svoje male veličine, često posjeduju jedinstvena svojstva koja

ih čine vrijednima u proizvodnji. Nanomaterijali se smatraju svi materijali sastavljeni od pojedinačnih jedinica duljine između 1 i 100 nanometara.

Nanomaterijale je nemoguće vidjeti golim okom stoga se za njihovo dizajniranje i karakterizaciju koriste mikroskopi, za što se često koriste nestandardni laboratorijski mikroskopi.

Nanomaterijali se dizajniraju s točno određenim svojstvima stoga oni mogu biti izolirajući ili provodljivi, sintetički, poput ugljičnih nanocjevčica i pjenušavih aerogela, i prirodno nastali, poput vulkanskog pepela.

Prema literaturi [29] nanomaterijale dijelimo na četiri tipa:

- nanomaterijali na osnovi anorganskih tvari, uključujući metale i metalne okside
- nanomaterijali na osnovi ugljika, uključujući grafen, fullerene i ugljikove nanocjevčice
- nanomaterijali na osnovi organskih tvari uključuju organske materijale koji isključuju one na bazi ugljika
- kompozitni nanomaterijali uključuju bilo koju kombinaciju tri navedena tipa.

#### **4.6.3. Proizvodnja nanomaterijala**

Za izradu nanomaterijala zahtijevaju se specijalizirani postupci proizvodnje, a dvije glavne metode, prema literaturi [29], su odozgo prema dolje te odozdo prema gore.

Metodu odozgo prema dolje karakteriziraju kemijski i fizikalni procesi koji razbijaju velike komade materijala sve do željene veličine, odnosno dok se ne postigne veličina nanomaterijala, a složenost postupka ovisi o vrsti materijala koji se proizvodi.

Za razliku od prethodno spomenute metode, metoda odozdo prema gore složeniji je proces koji započinje pojedinačnim atomima ili molekulama, koji se kemijskim i fizikalnim procesima spajaju u željene nanostrukture.

#### 4.6.4. Korištenjem metamaterijala do nevidljivih tenkova i prikrivenih podmornica

Prema literaturi [30] metamaterijali su složeni materijali dizajnirani za manipulaciju svjetlosnim, radarskim i sonarnim valovima, stoga bi mogli postati nevidljivi za većinu vrsta senzora, uključujući ljudsko oko.

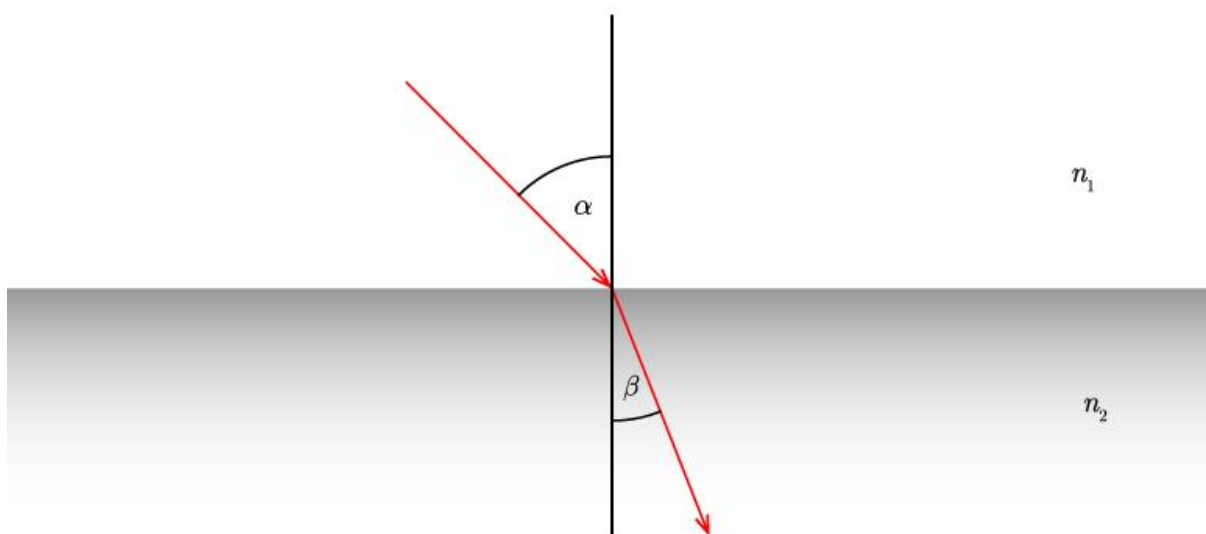
Metamaterijali zahtijevaju dizajniranje čestica koje su manje od valne duljine svjetlosti i kontroliranje polarizacije te spinova svjetla. [31]

S obzirom na to da su metamaterijali inženjerski kompoziti dizajnirani za manipulaciju elektromagnetskog spektra, pretpostavlja se da bi njihova primjena u vojnoj industriji mogla dovesti do velikih napredaka u vojnoj tehnologiji poput nevidljivih oklopnih vozila, podmornica koje se ne mogu otkriti sonarom te oružja s poboljšanim tražilicama i sustavima za navođenje. [30]

Princip rada metamaterijala poznat je kao Snellov zakon. [30] Prema literaturi Snellov zakon definiran je formulom [32]:

$$\sin \alpha / \sin \beta = n_2 / n_1 \quad (1)$$

U formuli (1)  $\alpha$  je kut upadne zrake svjetlosti (kut između upadne zrake i okomice na granicu između optičkih sredstava),  $\beta$  je kut loma (kut između lomljene zrake i okomice na granicu između optičkih sredstava), a  $n_1$  i  $n_2$  su indeksi loma optičkog sredstva iz kojega zrake dolaze i optičkoga sredstva u koje ulaze (Slika 25.).



Slika 25. Snellov zakon [33]

Pri putovanju energetskog vala kroz sredstvo kao što su prostor, zrak, voda ili staklo te prelasku granice i interakciji s drugim sredstvom, val se lomi. Većina senzora mjeri refleksiju ili apsorpciju energije koja se reflektira. Na primjer, ljudsko oko mjeri refleksiju svjetlosti s objekata, dok radar opaža refleksiju valova s površine objekata. No, upotrebom metamaterijala postiže se gotovo potpuno izostavljanje refleksije i apsorpcije valova. Ova karakteristika ima značajne implikacije: vozila kao što su tenkovi, zrakoplovi, podmornice ili čak vojničke odore izrađene od metamaterijala mogli bi postati gotovo nevidljivi radarskim valovima, sonarnim valovima te čak svjetlu. [30]

U vojnom kontekstu, upotreba metamaterijala za stvaranje površina koje istodobno djeluju kao komunikacijske antene predstavlja iznimno inovativan koncept. Ova tehnologija omogućuje transformaciju standardnih struktura, poput krila borbenih aviona ili jarbola ratnih brodova, u napredne komunikacijske uređaje. Primjerice, krilo borbenog aviona, koje obično služi samo kao aerodinamična komponenta, postaje aktivna antena koja omogućuje širokopojasnu komunikaciju ili praćenje signala.

Na morskom bojištu, ideja zamjene velikih i uočljivih antena na ratnim brodovima jednim neprimjetnim jarbolom izrađenim od metamaterijala ima značajne taktičke prednosti. Tradicionalne antene često su vidljive mete koje se mogu detektirati, dok metamaterijali omogućuju izradu jarbola koji su manje primjetni i manje osjetljivi na otkrivanje, čime se povećava tajnost operacija na moru.



Sposobnost metamaterijala da poboljšaju senzore na raketama može značajno povećati njihovu učinkovitost na bojištu. Ova tehnologija može omogućiti sensorima da detektiraju ciljeve na znatno većim udaljenostima nego što je to trenutno moguće. To bi značilo da rakete mogu identificirati i pratiti potencijalne prijetnje s veće udaljenosti, čime se povećava vremenski okvir za reakciju i povećava šansa za uspješno neutraliziranje neprijateljskih ciljeva.

Sve te inovativne primjene metamaterijala u vojnom sektoru ukazuju na potencijal za značajne promjene u vojnim taktikama, sposobnostima i operativnim strategijama. Iako su metamaterijali trenutno izazovni za proizvodnju i primjenu, kontinuirani napredak u njihovom razvoju i implementaciji može značiti revoluciju u modernom ratovanju. [30]

## 5. ZAKLJUČAK

Kompozitni materijali predstavljaju ključne materijale koji imaju široku primjenu u modernom svijetu. Važni elementi u razvoju kompozitnih materijala uključuju napredna vlakna i matrice, ekološku održivost, napredno projektiranje i digitalnu proizvodnju, nove primjene i ulazak u nanosvijet, biokompozite i metamaterijale, pružajući prednosti poput visoke čvrstoće, niske gustoće, otpornosti na koroziju i sposobnosti prilagodbe specifičnim potrebama u industriji.

Trendovi u razvoju kompozitnih materijala idu prema stvaranju materijala koji su lagani, ekološki prihvatljivi, bolje projektirani, brže proizvedeni, primjenjivi u novim područjima i temeljeni na napretku u nanotehnologiji. Ovi trendovi oblikuju budućnost kompozitnih materijala i donose inovacije koje će imati širok utjecaj na različite industrije. Kontinuirano istraživanje i razvoj u ovim područjima omogućit će razvoj inovativnih i učinkovitih materijala koji će odgovoriti na izazove 21. stoljeća. Od završetka željeznog doba oko 550. pr. Kr., nijedan određeni materijal nije definirao razdoblje u ljudskoj povijesti. Mnogi znanstvenici tvrde da živimo u polimernom dobu, ali u budućnosti bi naše razdoblje također moglo biti nazvano dobom novih materijala, a njegovi učinci na ljudski razvoj mogli bi biti puno veći nego što trenutno možemo zamisliti.

## LITERATURA

- [1] Newton E., 6 of the Most Exciting Trends In Composite Materials Today. Revolutionized 2021 Oct. Dostupno na: <https://revolutionized.com/composite-materials>, (pristupljeno: 2023-08-02)
- [2] Martina Parać, Termoizolacijski kompozitni materijali na bazi otpadne biomase, (pristupljeno: 2023-08-02)
- [3] Karakteristika, proizvodnja i opseg: <https://hr-n.decorexpro.com/kirpich/saman/>, (pristupljeno: 2023-08-02)
- [4] Staroegipatska mumija - „cartonnage“: <https://www.bbc.co.uk/ahistoryoftheworld/objects/G1vdS2ImSE2cpQaXZa1K6w> , (pristupljeno: 2023-08-02)
- [5] History of Composite Materials: <https://www.appmfg.com/blog/history-of-composite-materials>, (pristupljeno: 2023-08-02)
- [6] History of Composites: <https://compositeslab.com/composites-101/history-of-composites/index.html>, (pristupljeno: 2023-08-02)
- [7] Meeks G. Innovations In Wood-The Story of the Spruce Goose. Nature's Packaging 2022. Dostupno na: <https://naturespackaging.org/innovations-in-wood-the-story-of-the-spruce-goose/> , (pristupljeno: 2023-08-02)
- [8] 953 Corvette: <https://hr.eferrit.com/1953-corvette-prva-corvetta-producirana/>, (pristupljeno: 2023-08-02)
- [9] Kevlar: <https://www.carbontouch.eu/en-gb/kevlar.html>, (pristupljeno: 2023-08-05)
- [10] Zweben C. Materials: Composites. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering 2023: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90800-9.00055-X> (pristupljeno: 2023-08-05)
- [11] Asmatulu E, Alamir M. A., Alonayni A., Safety concerns in composite manufacturing and machining. ResearchGate 2018. Dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/323952200\\_Safety\\_concerns\\_in\\_composite\\_manufacturing\\_and\\_machining](https://www.researchgate.net/publication/323952200_Safety_concerns_in_composite_manufacturing_and_machining), (pristupljeno: 2023-08-05)
- [12] Macan J. Kompozitni materijali. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije; 2020. Dostupno na: [https://www.fkit.unizg.hr/\\_download/repository/Kompozitni-skripta\\_V02.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/Kompozitni-skripta_V02.pdf) , 2020-02 (pristupljeno: 2023-08-05)

- [13] Growth opportunities: Materials innovation will drive composites usage to new heights. CompositesWorld 2012. Dostupno na:  
<https://www.compositesworld.com/columns/growth-opportunities-materials-innovation-will-drive-composites-usage-to-new-heights>, (pristupljeno: 2023-08-05)
- [14] Mason H. Ultra-lightweight skis demonstrate potential of graphene-reinforced composites. CompositesWorld 2023. Dostupno na:  
<https://www.compositesworld.com/articles/ultra-lightweight-skis-demonstrate-potential-of-graphene-reinforced-composites>, (pristupljeno: 2023-08-10)
- [15] Gullon I. M., Pérez J. M., Domene D., Salgado-Casanova A. J. A., Radović Lj. R. New insights into oxygen surface coverage and the resulting two-component structure of graphene oxide. Carbon 2020; 158:406-417
- [16] Polyhedral Oligomeric Silsesquioxanes: <https://phantomplastics.com/functional-fillers/polyhedral-oligomeric-silsesquioxanes/>, (pristupljeno: 2023-08-10)
- [17] Reciklirati Drva: <https://hr.bohanwpc.com/composite-decking/composite-hollow-decking/2016-recyclable-wood-plastic-composite-board-for-o.html> , (pristupljeno: 2023-08-12)
- [18] Khalid M. Y. , Arif Z. U., Ahmed W., Arshad H. Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials. Sustainable Materials and Technologies 2022; 31: e00382. Dostupno na:  
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00382>, (pristupljeno: 2023-08-12)
- [19] An Introduction to Digital Composite Manufacturing: <https://3dfortify.com/an-introduction-to-digital-composite-manufacturing/>, (pristupljeno: 2023-08-15)
- [20] Staklena vlakna: <https://www.bitpromet.hr/staklena-vlakna-za-glazuru-sjeckana-12-mm/prid/735>, (pristupljeno: 2023-08-15)
- [21] Ugljična vlakna: <https://geek.hr/znanost/clanak/znanstvenici-proizvode-ugljicna-vlakna-iz-biljaka-umjesto-iz-nafte/> , (pristupljeno: 2023-08-15)
- [22] Can Fiber Orientation Be Automated?: <https://3dfortify.com/fiber-alignment-mold-tooling/> , (pristupljeno: 2023-08-15)
- [23] Flux 3D: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/fortify-flux-3d/> , (pristupljeno: 2023-08-15)

- [24] Newton E. 3D-Printed Buildings Are Changing Our World. Revolutionised 2021. Dostupno na: <https://revolutionized.com/3d-printed-buildings/>, (pristupljeno: 2023-08-25)
- [25] 3D-Printed Building: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-7461315/3D-printed-Swiss-home-constructed-machines-new-way-seeing-architecture-creators-say.html>, (pristupljeno: 2023-08-25)
- [26] Nehls G. Auburn University make strides in advancing bio-based polymers and fibers for 3D-printed home construction. CompositesWorld 2022. Dostupno na: <https://www.compositesworld.com/news/auburn-university-make-strides-in-advancing-bio-based-polymers-and-fibers-for-3d-printed-home-construction>, (pristupljeno 2023-09-17)
- [27] A Material Revolution: How New Materials Are Changing the Manufacturing Industry: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/a-material-revolution>, (pristupljeno: 2023-08-25)
- [28] Boeing 787-10: <https://www.airline-suppliers.com/air-new-zealand-selects-boeing-787-10-dreamliner-for-future-growth/>, (pristupljeno: 2023-08-25)
- [29] Newton E. What are Nanomaterials and How are They Made? Revolutionized 2023. Dostupno na: <https://revolutionized.com/nanomaterials/>, (pristupljeno: 2023-08-25)
- [30] Mizokami K. How Metamaterials Could Lead to Invisible Tanks and Super-Stealthy Submarines. Popular Mechanics 2019. Dostupno na: <https://www.popularmechanics.com/military/research/a29355374/metamaterials-stealth/>, (pristupljeno: 2023-08-30)
- [31] Grossman D. We're One Step Closer to Invisibility Cloaks Being Real. Popular Mechanics 2019. Dostupno na: <https://www.popularmechanics.com/technology/a28414437/artificial-intelligence-invisibility-cloak/>, (pristupljeno: 2023-08-30)
- [32] Snellov zakon: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=56872> , (pristupljeno: 2023-08-30)
- [33] Zakoni geometrijske optike: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/1d895338-6c52-4d7e-a2f2-5df65634fbaf/zakoni-geometrijske-optike.html> , (pristupljeno: 2023-08-30)