

# Aluminijski kompozitni materijali u suvremenoj automobilskoj industriji

---

**Bukovac, Luka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:318329>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-29**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Luka Bukovac**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Irena Žmak, dipl. ing.

Student:

Luka Bukovac

Zagreb, 2018.

# IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad uradio samostalno sa znanjem stečenim tijekom obrazovanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje te uz nadzor mentorice dr.sc. Irene Žmak, dipl.ing. Zahvaljujem svima koji su mi omogućili proučavanje ovog znanstvenog područja i na pruženim savjetima.

Luka Bukovac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite 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:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Bukovac**

Mat. br.: 0035198653

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Aluminijski kompozitni materijali u suvremenoj automobilskej industriji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Aluminium Matrix Composites in Modern Automotive Industry**

Opis zadatka:

Aluminijske legure posjeduju niz povoljnih mehaničkih i fizikalnih svojstava zbog kojih se one sve više koriste u suvremenoj automobilskej industriji, no njihova slaba otpornost na adhezijsko trošenje jedan je od vrlo važnih nedostataka za njihovu primjenu u izradi dijelova motora.

Ojačanjem aluminijskih legura pomoću odabranih tvrdih čestica dodanih u ciljanoj količini dobivamo aluminijski kompozit mehaničkih, fizikalnih i triboloških svojstava oblikovanih po mjeri radnih uvjeta. Pritom se primjenjuju napredni postupci dobivanja takvih materijala.

U okviru završnog rada potrebno je:

1. istražiti trendove razvoja u automobilskej industriji i područja razvoja materijala sa značajnijim napretkom
2. prikazati područje primjene aluminijskih kompozita u automobilskej industriji
3. opisati vrste ojačala koje se uspješno primjenjuju
4. dati pregled poboljšanja mehaničkih i triboloških svojstava aluminijskog kompozita u odnosu na aluminijske legure
5. opisati suvremene tehnologije izrade aluminijskih kompozita.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:  
1. rok: 23. veljače 2018.  
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.  
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.  
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.  
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

# SADRŽAJ

IZJAVA.....	3
POPIS SLIKA .....	6
POPIS TABLICA.....	7
POPIS OZNAKA .....	8
SAŽETAK.....	9
SUMMARY .....	1
1. UVOD .....	1
1.1. Općenito o kompozitima .....	1
1.2. Podjela kompozita.....	2
2. ALUMINIJSKI KOMPOZITNI MATERIJALI .....	8
2.1 Razvoj i povijesna perspektiva.....	8
2.2. Zašto baš aluminij i kako nastaje?.....	13
2.3. Aluminijske legure .....	19
2.4. Vrste aluminijskih legura .....	20
2.5. Serije legura aluminija .....	24
2.6. Trendovi i industrijska uporaba aluminijskih kompozita.....	26
2.7. Aluminijski kompoziti ojačani silicijevim karbidom.....	32
2.8. Aluminijski kompoziti ojačani titanijevim karbidom .....	40
3.ZAKLJUČAK .....	43
LITERATURA.....	44

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz matrice i ojačala u kompozitima [2] .....	2
Slika 2. Viskeri od aluminijske oksida [1] .....	4
Slika 3. Oblici vlaknastih ojačala [3] .....	4
Slika 4. Prikaz ugljičnih vlakana [4] .....	5
Slika 5. Šperploča - primjer strukturnog kompozita [5].....	6
Slika 6. Sendvič konstrukcija sa saćastom jezgrom [6] .....	7
Slika 7. Prikaz motora braće Wright iz 1903. godine [7].....	9
Slika 8. Prikaz Vega motora u Chevroletu 153 [8] .....	9
Slika 9. Prikaz novijih GM V8 motora [9].....	10
Slika 10. Satelit Sputnik 1 [10] .....	11
Slika 11. Kronološka primjena materijala u izradi civilnih zrakoplova [11].....	12
Slika 12. Proizvodnja aluminijske kroz godine [12].....	14
Slika 13. Ukupna svjetska proizvodnja aluminijske 2013. godine u milijunima tona [12].....	15
Slika 14. a) Nakupine čestica Al na kuglicu tijekom testa "kuglica po disku" .....	18
Slika 15. Aluminijski odljev koji se koristi kod prtljage Airbusa [15] .....	21
Slika 16. Utjecaj legiranih elemenata u čistom aluminiju na granicu razvlačenja [17].....	22
Slika 17. Utjecaj hladne deformacije na čvrstoću čistog aluminijske [17].....	23
Slika 18. Utjecaj starenja na vlačnu čvrstoću [18].....	24
Slika 19. Klip od aluminijske matrice ojačane s $Al_2O_3$ [23].....	29
Slika 20. Disk kočnica ojačana česticama $Al_2O_3$ [23] .....	29
Slika 21. Promjena aluminijske u automobilske industrijama kroz godine [24].....	31
Slika 22. Elektrootporna peć za taljenje metala [27] .....	33
Slika 23. Ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom [29] .....	34
Slika 24. Al matrica s 5% vol. SiC-a [31].....	36
Slika 25. Al matrica s 10 % vol. SiC-a [31].....	37
Slika 26. Al matrica s 20 % vol. SiC-a [31].....	37
Slika 27. Ovisnost vlačne čvrstoće o vol. udjelu SiC-a [31].....	38
Slika 28. Utjecaj vol. udjela SiC-a na gubitak mase kompozita tijekom vremena [31].....	39
Slika 29. Kristalna struktura titanijske (Ti) [32].....	40
Slika 30. Mikrostrukturno stanje Al-TiC kompozita [33].....	42

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Promjena cijena aluminija od početka proizvodnje pa sve do danas [12] .....	14
Tablica 2. Serije legura aluminija s pripadajućim legirnim elementima [14] .....	20
Tablica 3. Legure aluminija serije 7000 [17] .....	25
Tablica 4. Mehanička i fizikalna svojstva keramika [20] .....	27
Tablica 5. Prikaz aluminijskih kompozita u suvremenoj automobilskoj industriji [22] .....	30
Tablica 6. Udio komponenata u Al matrici [25] .....	32
Tablica 7. Utjecaj udjela silicijevog karbida na tvrdoću aluminijskih kompozita [31] .....	35



## POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
$d$	mm	srednja vrijednost dijagonale
$E$	MPa	modul elastičnosti
$F$	N	sila
$G$	MPa	modul smičnosti
$R_d$	MPa	dinamička izdržljivost
$R_e$	MPa	granica razvlačenja
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
$t$	s	vrijeme
$\alpha$	$10^{-6}/K$	koeficijent toplinskog istezanja
$\vartheta$	°C	temperatura
$\lambda$	W/mK	toplinska vodljivost
$\rho$	$kg/m^3$	gustoća
$\sigma$	MPa	naprezanje
$\sigma_T$	MPa	tlačna čvrstoća
$\sigma_V$	MPa	vlačna čvrstoća

## SAŽETAK

Rad prikazuje svojstva, sastav i vrste aluminijskih kompozitnih materijala koji se koriste u suvremenoj automobilskoj industriji te njihove suvremene postupke dobivanja. Aluminijski kompozitni materijali imaju široku primjenu u suvremenim automobilskim industrijama. Njihove karakteristike su temeljene na upotrebi ojačala kako bi se poboljšala učinkovitost i svojstva matrice. Ojačala se najčešće pojavljuju u tri oblika - viskeri, vlakna i žice. Mehanička, fizikalna i tribološka svojstva ovih kompozita su naprednija nego kod uobičajenih materijala, a posebice se izdvaja mehanička čvrstoća, krutost, težina, otpornost na trošenje i koroziju. Zbog niske gustoće i malih masa pogodni su za izradu blokova motora, klipova, klipnjača i disk kočnica, a uvelike smanjuju i potrošnju goriva. Proizvode se postupkom lijevanja i miješanja, gdje se tekućem aluminiju dodaju čestice silicijeva (SiC) ili titanijeva (TiC) karbida u obliku vlakana. Relativno su skupi jer se najčešće kombiniraju sa silicijevim i titanijevim karbidima, koji im značajno povisuju tvrdoću, vlačnu čvrstoću i otpornost na trošenje i time produljuju vijek trajanja konstrukcijskih dijelova.

*Ključne riječi: metalni kompoziti, aluminijski kompozitni materijali, automobilska industrija,*

## SUMMARY

The thesis presents the properties, composition and types of aluminium matrix composites used in modern automotive industry, and the respective advanced production technologies. Aluminium composite materials have a high application in modern automotive industry. Their characteristics are based on reinforcements which improves the matrix performances. Reinforcements can be shaped into three forms - whiskers, fibres and strings. Mechanical, physical and tribological properties of composites which include mechanical strength, stiffness, weight, corrosion and wear resistance are greatly improved when compared to standard materials. They are suitable for designing engine blocks, pistons, piston rods and disc brakes because of their low density and low mass, and they greatly reduce fuel consumption. They are produced with stir casting, where melted aluminium is being reinforced with silicon (SiC) and titanium (TiC) carbides. They are relatively expensive because of their combination with silicon and titanium carbides, which significantly increase hardness, tensile strength, wear resistance and lifetime of construction parts.

*Key words: Metal Composites, Aluminium Matrix Composites, Automotive Industry, Technology*

## 1. UVOD

### 1.1. Općenito o kompozitima

**Kompozitni materijali** ili **kompoziti** su materijali koji nastaju umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s jasno definiranom granicom između njih. Cilj ovakvog spajanja jest dobivanje materijala s takvim svojstvima kakve ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Sastoje se od dva osnovna konstituenta – matrice i ojačala [1]. Zadaća ojačala jest ta da bude nosivi element i da osigura:

- visoku čvrstoću
- visoki modul elastičnosti
- otpornost na trošenje.

Uloga matrice je nešto drugačija i od nje se zahtijeva da:

- poveže ojačalo i drži ga zajedno
- štiti od vanjskih utjecaja
- prenosi opterećenja na ojačalo
- daje vanjsku formu kompozitu
- određuje njegovo ponašanje s obzirom na djelovanje atmosfere itd.

Kompoziti sami po sebi mogu imati različite karakteristike i svojstva zbog uporabe različitih ojačala i matrica pa će sama svojstva kompozita ovisiti o:

- svojstvima konstituenata, tj. o matrici i ojačalu
- veličini i raspodjeli konstituenata
- volumnom udjelu konstituenata
- obliku konstituenta
- prirodi i jakosti veza između konstituenata.

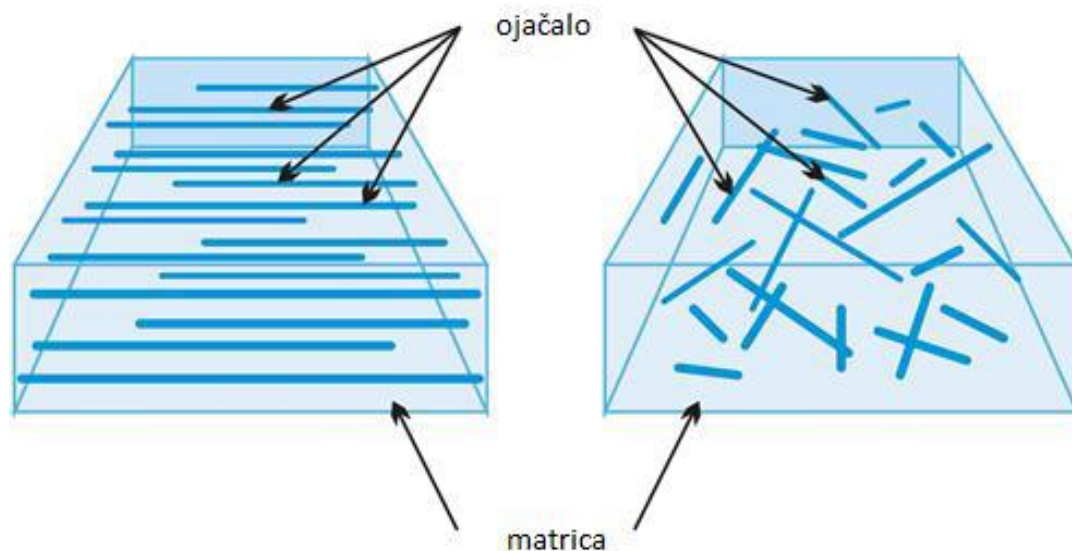
Naime, kompoziti su već dulji niz godina prisutni oko nas i prva saznanja o samoj pojavi kompozita datiraju još iz davnih 1500-ih godina prije Krista, kada su Egipćani i mezopotamski doseljenici koristili mješavinu blata i slame za stvaranje jakih i izdržljivih nastamba, dok su primjerice Mongoli uz pomoć drveta, kosti i ljepila životinjskog porijekla pravili luk i na taj način koristili kompozit, a da pri tome toga vjerojatno nisu ni bili svjesni.

U današnje vrijeme kompoziti se koriste gotovo u svim područjima – od automobilske, zrakoplovne, brodske i kemijske industrije pa sve do građevine, stomatologije i medicine.

## 1.2 Podjela kompozita

Kompozitni materijali se najčešće dijele s obzirom na:

- 1) materijal matrice – metalne, keramičke i polimerne
- 2) oblik ojačala – viskeri, vlakna i žice.



Slika 1. Prikaz matrice i ojačala u kompozitima [2]

Materijali koji se koriste kao matrice se dijele u tri glavne kategorije:

- a) **metalne matrice** – MMC (engl. *Metal Matrix Composites*)
  - prednosti: provode struju i toplinu, imaju dobru čvrstoću i žilavost, magnetični su (neki)
  - nedostaci: visoka gustoća, slaba otpornost na puzanje.
- b) **keramičke matrice** – CMC (engl. *Ceramic Matrix Composites*)
  - prednosti: visoka čvrstoća i krutost, niska gustoća, otporni na trošenje i koroziju
  - nedostaci: niska žilavost, teška strojna obrada.

**c) polimerne matrice – PMC (engl. *Polymer Matrix Composites*)**

- prednosti: dobra žilavost, dobra obradljivost, izuzetna korozijska postojanost, visoki omjer čvrstoća/gustoća
- nedostaci: niska krutost i čvrstoća, loša svojstva na visokim temperaturama.

Zanimljivo je spomenuti kako se unazad zadnjih par godina sve više viđa ugljik-ugljik kompozita, koji spadaju u novootkrivene materijale i specifični su po tome što mogu podnijeti vrlo visoke temperature – do 1700°C, a kratkotrajno čak i do 2700°C.

Sljedeća podjela kompozita je prema obliku ojačala:

**1) kompoziti ojačani česticama – njihova daljnja podjela ovisi o obliku i veličini čestica:**

- kompoziti s disperzijom
- kompoziti s velikim česticama.

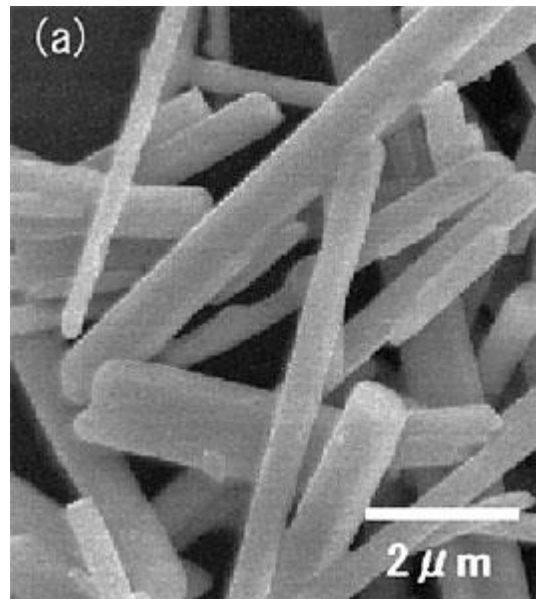
Kompoziti s disperzijom sadrže male čestice koje sprječavaju gibanje dislokacija i na taj način ojačavaju sam kompozit. Sadrže izuzetno sitne čestice čiji su promjeri manji od 10 µm. Njihova svojstva ovise o veličini čestica, volumnom udjelu i razmaku između čestica, a povećanjem temperature opada im čvrstoća.

Kompoziti s velikim česticama sadrže čestice promjera većim od 0,1µm. Njihova svojstva ovise o samom rasporedu i raspršenosti čestica. Namijenjeni su za proizvode kod kojih se ne traži posebno izražena čvrstoća (npr. abrazivne ploče).

**2) kompoziti ojačani vlaknima**

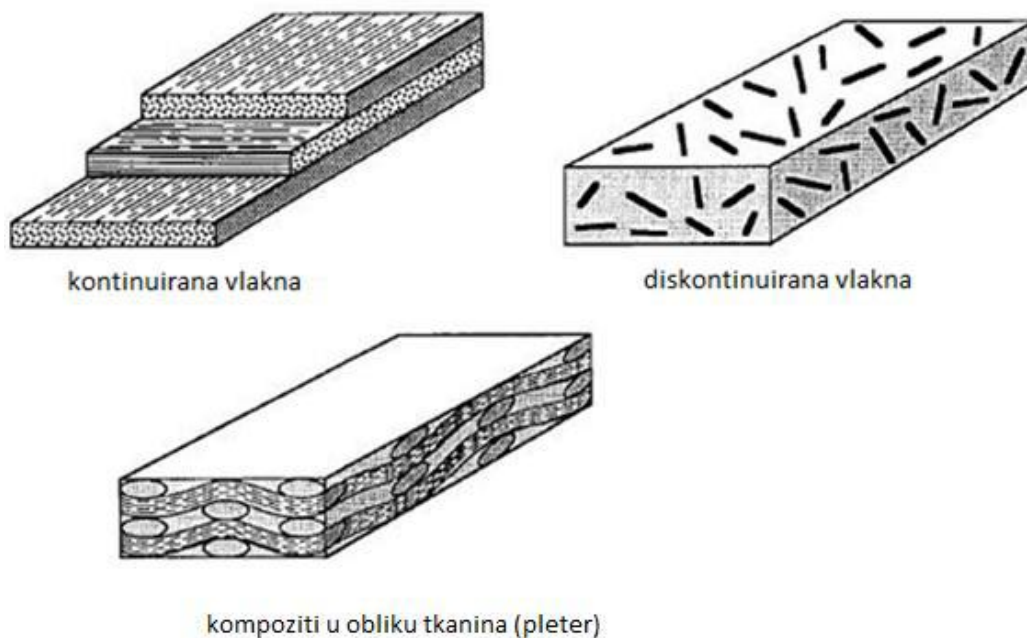
Kod ovakvih kompozita dolazi do poboljšanja žilavosti, čvrstoće, krutosti i povećanja omjera „čvrstoća/gustoća“ zahvaljujući prisustvu vlakana, a valja i napomenuti kako imaju visoku toplinsku stabilnost i kontroliranu rastezljivost pri visokim temperaturama. Kako vlakna mogu biti različitih dimenzija, oblika i orijentacija, i sama vlakna se mogu svrstati u odgovarajuće skupine:

- VISKERI – sićušni monokristali koji imaju ekstremno velik omjer „duljina/promjer“. Mogu biti od ugljika, silicijevog karbida, silicijevog nitrida ili aluminijske oksida. Imaju pravilnu kristalnu građu pa gotovo nema mogućnosti tečenja, što dovodi do visoke čvrstoće. Ne primjenjuju se toliko često zbog iznimno visokih cijena, te ih je vrlo teško ugraditi u matricu.



Slika 2. Viskeri od aluminijeva oksida [1]

- VLAKNA – mogu biti polikristalna ili amorfna, a izrađuju se najčešće od polimera i keramike (aramid, staklo, ugljik, bor)
- ŽICE - relativno velikih promjera, a najčešće su od Mo ili W. Primjenjuju se pri radijalnom čeličnom ojačavanju automobilskih guma i omotavanju raznih cijevi.



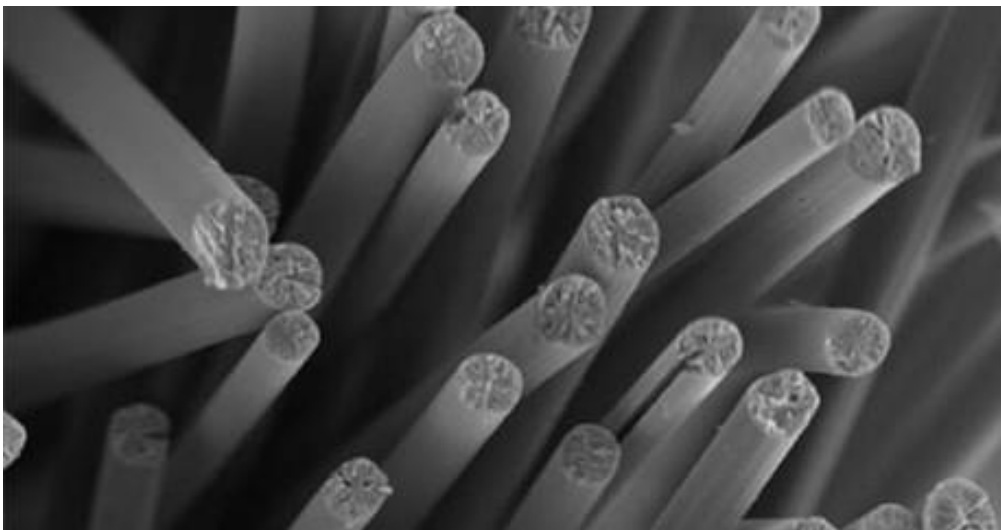
Slika 3. Oblici vlaknastih ojačala [3]

### STAKLENA VLAKNA

Imaju dobra površinska svojstva, dobru čvrstoću i cijenu, ali nedostatak im je nemogućnost primjene iznad 1000°C. Postoji više vrsta: E-staklo (primjenjivo do 500°C), S-staklo (primjenjivo do 1050°C) i C-staklo, a primjena im je raznolika -od sportske opreme i rekreacijskih plovila pa sve do zrakoplova (interijer Boeinga 767).

### UGLJIČNA VLAKNA

U primjeni su zadnjih 40-ak godina, a poznati su po vrlo visokoj specifičnoj čvrstoći i toplinskoj vodljivosti. Promjer vlakana im seže od 8 do 10 $\mu$ m, dok im modul elastičnosti  $E$  poprima vrijednosti od 220 GPa pa sve do 450 GPa. Vrste ugljičnih vlakana su: PAN (poliakrilonitril), katran i celulozna vlakna, a primjenjuju se npr. u zrakoplovstvu za podne nosače, vertikalne i horizontalne stabilizatore itd.



Slika 4. Prikaz ugljičnih vlakana [4]

### ARAMIDNA VLAKNA

Aramidna vlakna poznata su po krutosti, žilavosti, otpornosti na puzanje, umor i visoke temperature, ali su lošije tlačne čvrstoće i visoke cijene (skuplja od staklenih). U primjeni su od 1970-ih godina, a poznata su pod trgovačkim nazivima KEVLAR, NOMEX i TWARON. Područja primjene: balistika (pancirke), vatrootporne pregače, sport itd. Bitno je spomenuti i hibridne kompozite kojima je matrica ojačana kombinacijom dvaju različitih ojačala, najčešće



različitim vrstama vlakana. Jedna od kombinacija ojačala su ugljik/aramid, aramid/staklo i ugljik/staklo.

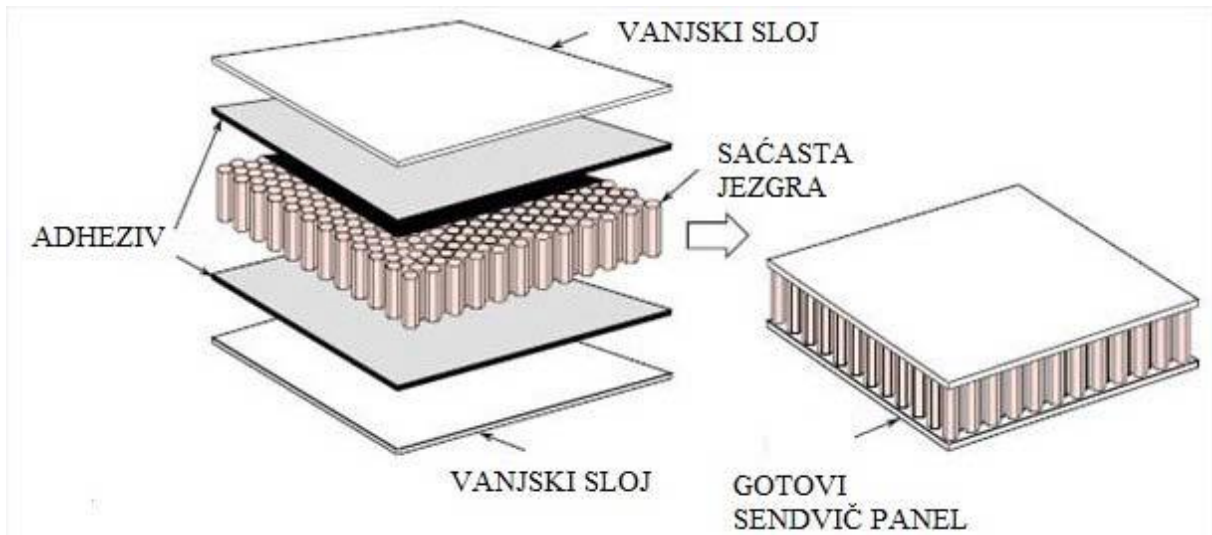
### 3) strukturni kompoziti

Strukturni kompoziti sastavljeni su od homogenog i kompozitnog materijala čija svojstva ovise o svojstvima konstitutivnih materijala, ali i o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije. U ovu skupinu ubrajamo laminat, koji su sastavljeni od slojeva ili ploča čija vlakna mogu biti različito orijentirana, te na taj način možemo postići različita svojstva (anizotropna svojstva). Razlog njihova stvaranja jest postizanje površine koja će biti postojana na agresivne medije te zbog postizanja visoke čvrstoće i kompaktnosti. Cilj je također i povećati otpornost na trošenje, a mogu se i prevlačiti raznim postupcima (npr. galvanizacija) kako bi se postigli deblji zaštitni slojevi.



Slika 5. Šperploča - primjer strukturnog kompozita [5]

Druga skupina strukturnih kompozita su sendvič-konstrukcije koje se sastoje od tankih vanjskih slojeva i srednjeg dijela (jezgre) koja služi za popunjavanje. Za vanjske slojeve se najčešće koriste Al-legure, vlaknima ojačani polimerni materijali, titanij i čelik, dok su jezgre najčešće u obliku pjena (PVC – polivinilklorid, PS – polistiren) ili saća (aramid, PP – polipropilen, drvo). Uloga jezgre jest razdvajanje površinskih slojeva, osigurati krutost u ravninama okomitim na površinski sloj i suprotstaviti se deformiranju. Primjenjuju se najviše u zrakoplovnoj industriji.



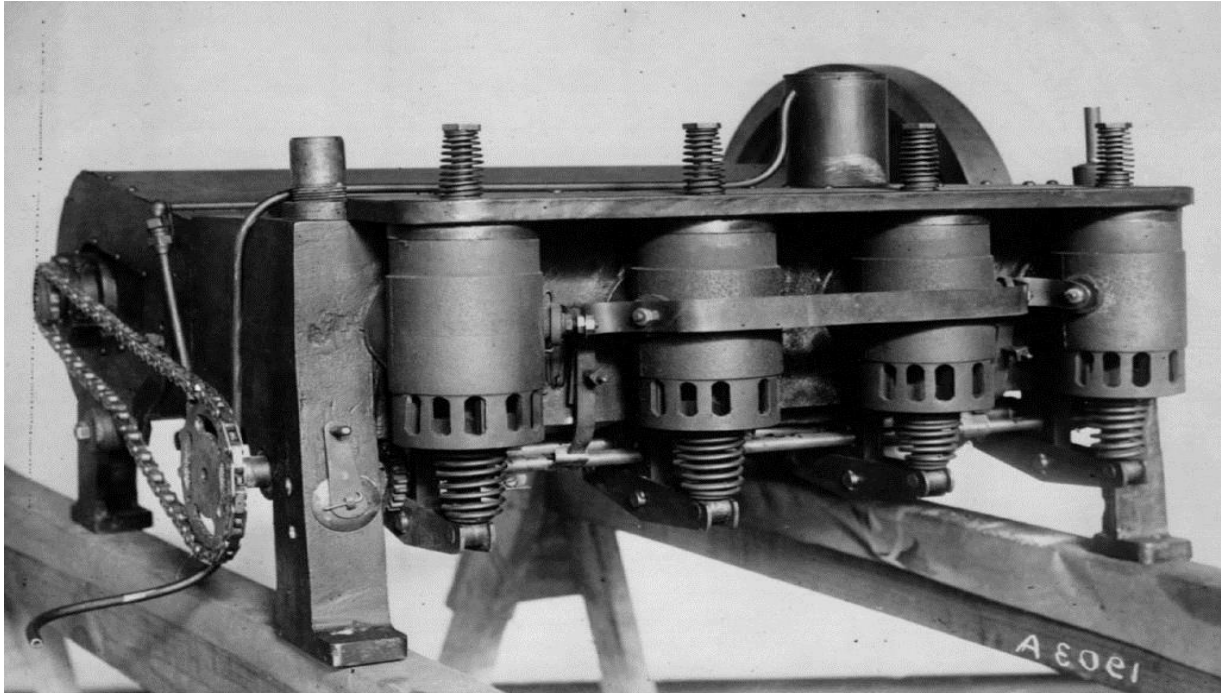
Slika 6. Sendvič konstrukcija sa sačastom jezgrom [6]

## 2. ALUMINIJSKI KOMPOZITNI MATERIJALI

Aluminij i legure na bazi aluminija posjeduju niz mehaničkih i fizikalnih svojstava koje ih čine pogodnima za korištenje u automobilskoj industriji, ali jedan od nedostataka im je izrazito slaba otpornost na zaribavanje, tj. na adheziju. Ojačanjem aluminijskih legura krutim mazivima, čvrstim keramičkim česticama, kratkim vlaknima i viskerima dobivamo metalnu matricu s multifunkcionalnim svojstvima, koja će imati odličan balans između mehaničkih, fizikalnih i triboloških karakteristika. Naprednim proizvodnim tehnologijama, kao što je utiskivanje i provlačenje vlakana u rastaljene legure, mogu se dobiti vrlo tanke komponente, npr. debljine konca. Kočnice za rotore, klipovi i klipnjače samo su neke od uspješnih primjena aluminijskih kompozitnih materijala u automobilskoj industriji. Posljednjih godina Nissan, Toyota i Honda koriste aluminijske kompozitne materijale za izradu blokova motora, čime se značajno smanjuje masa automobila.

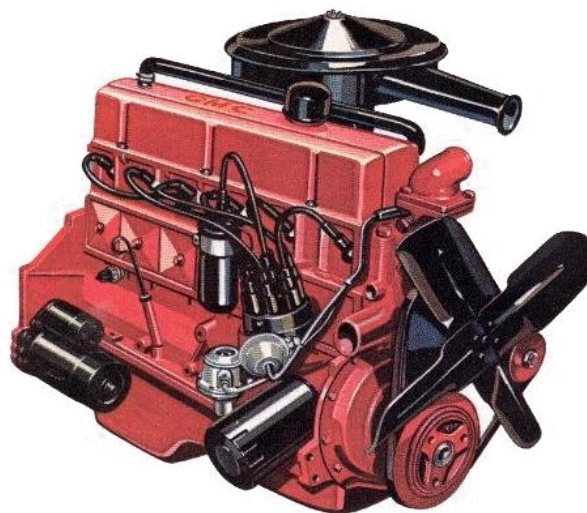
### 2.1 Razvoj i povijesna perspektiva

Na tribološke probleme aluminija i njegovih legura naišla su poznata braća Wright i njihov mehaničar Charles Taylor, koji su prije 100-tinjak godina pokušali razviti motor koji bi bio pogodan za njihov zrakoplov. Ubrzo su savladali dinamiku leta s Kittyjem Hawkom, stručnjakom za jedrilice i uputili se u kupnju za svoj prvi motor, koji je trebao razviti 80 do 90 konjskih snaga (60 do 67 kW) i koji neće biti teži od 80-ak kilograma. Prvo su napravili motor od sivog lijeva, no kako je on bio veće mase od očekivanog, prebacili su se na aluminij i na taj način značajno uštedjeli na masi motora, iako su cilindri u tom motoru imali određeni udio sivog lijeva.



Slika 7. Prikaz motora braće Wright iz 1903. godine [7]

U kasnim 60-ima prošlog stoljeća, General Motors je uspio osmisliti revolucionarni koncept i predstaviti ga u svojim „Vega“ motorima, a temeljio se na blokovima cilindrima i kućištu koji su bili izrađeni od lijevanog aluminija. Točnije, bila je to legura na bazi aluminija i silicija koja je sadržavala 16-18% Si, uz vrlo mali udio bakra. Taj potez je bio prekretnica u automobilskoj industriji kojim su uspjeli podići dotadašnje standarde. No, gledajući na to sve s tribološke strane, imali su problem s odvođenjem topline uslijed trenja, odnosno, toplina se nije odvodila dovoljno brzo pa „Vega“ motori ipak nisu doživjeli svoj dugi vijek trajanja. Danas se taj problem rješava ugradnjom ugljičnih vlakana u aluminijsku matricu.



Slika 8. Prikaz Vega motora u Chevroletu 153 [8]

Tadašnji motori su obično sadržavali četiri cilindra, dok u današnjoj modernoj industriji obično prevladavaju motori sa šest do osam cilindra, iako naravno postoje i motori s puno više cilindra.

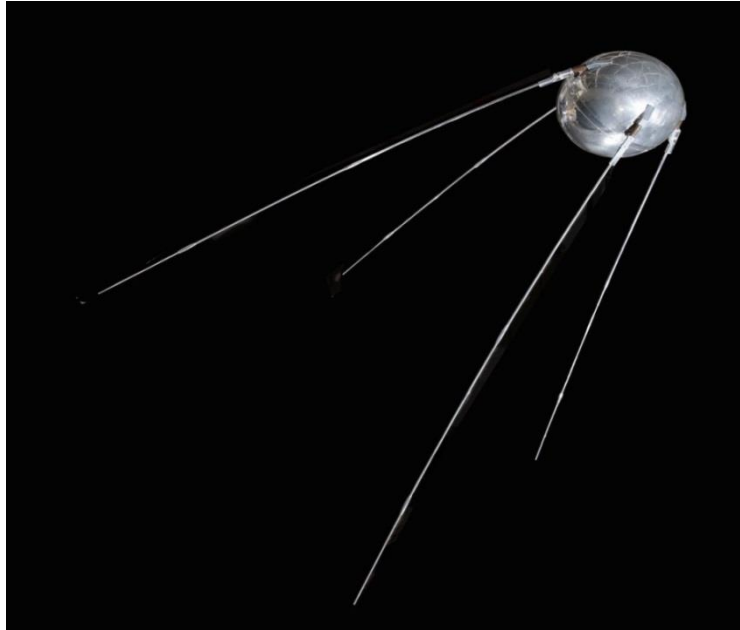


Chevrolet Camaro SS

2010 "1.99" 6.2L V-8 VVT (L99)

**Slika 9. Prikaz novijih GM V8 motora [9]**

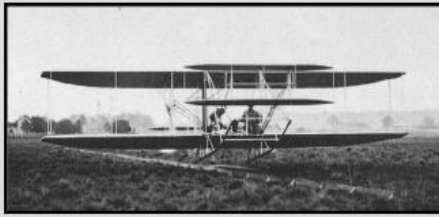
Primjena aluminijskih kompozitnih materijala nije izostala ni u svemirskim pothvatima. Jedno od glavnih događaja koje je obilježilo aluminijske i metalne matrice jest lansiranje prvog sovjetskog satelita „Sputnik 1“ u svemir, davne 1957. godine. Satelit je trebao biti izrađen od materijala koji je trebao biti lakši od monolitnih metala, ali i čvršći od polimernih kompozita kako bi se osigurala nosivost tereta i otpornost na temperature koje su sezale i do 1500 °C.



**Slika 10. Satelit Sputnik 1 [10]**

Osim navedenih industrija, po pitanju aluminijskih kompozita je daleko najrazvijenija zrakoplovna industrija. Između 1920-ih i 1930-ih godina struktura većih zrakoplova uglavnom je bila građena od metala. Optimalna svojstva posjedovale su i legure aluminija, stoga su se također koristile za izradu prvih letjelica od 1940-ih do 1970-ih godina. Sredinom 1960-ih i početkom 1970-ih godina počinju se proizvoditi i prvi kompozitni materijali, što je obilježilo razvoj nove generacije zrakoplova visokih performansi.

Primjena i razvoj kompozitnih materijala su se u početku odvijali isključivo u okvirima vojske na vojnim letjelicama, a sličan razvoj prati i civilno zrakoplovstvo, međutim sporije i u puno opreznijim uvjetima. Airbus (za razliku od Boeinga) je daleko napredniji kod primjene kompozita u civilnom zrakoplovstvu, prvenstveno kod repnih horizontalnih i vertikalnih stabilizatora na A300 serijama. Od A300 do A400M primjena kompozita u konstrukciji zrakoplova je znatno porasla, a sigurno će se daljnjim razvitkom tehnologije primjenjivati u sve većim razmjerima. Slika 11. prikazuje kronološku primjenu materijala u civilnom zrakoplovstvu, od primjene drveta za konstrukciju prvih letjelica, do najrazvijenijeg zrakoplova po pitanju kompozita, A380.



1903 : « Flyer » wood and fabric



1932 : Wood structure and skins



1933 : Metal structure and skins (B247)



1960 : Metal structure and skins (Caravelle)



1984 : F900. metal and modern composites



2005 : A380. metal and modern composites

Slika 11. Kronološka primjena materijala u izradi civilnih zrakoplova [11]

## 2.2. Zašto baš aluminij i kako nastaje?

Aluminij je „mladi“ materijal te je u nešto više od jednog stoljeća od njegove prve komercijalne proizvodnje, postao drugi najviše upotrebljavani metal u svijetu, nakon čelika. Aluminijske slitine su kao konstrukcijski materijal čest izbor za vodeće dizajnere, arhitekte i inženjere, koji su svi u potrazi za materijalom koji objedinjuje funkcionalnost i isplativost.

Zbog velikog afiniteta prema kisiku teže se reducira od svih prisutnih elemenata, a nedostatak mu je što se ne može dobiti direktnom redukcijom. Pri direktnoj redukciji najprije bi se reduciralo željezo, zatim mangan, silicij, titanij, a tek tada aluminij. Nečistoće iz tako dobivenog „sirovog“ aluminijske, ne bi se mogle ukloniti uobičajenim metodama metalurške rafinacije koje se baziraju na lakšoj oksidaciji nečistoća, jer se ovdje, zbog velikog afiniteta prema kisiku, najlakše oksidira aluminij. Zbog toga se za dobivanje aluminijske prvo mora dobiti čisti oksid aluminijske - glinica, koja se zatim reducira. Kao reducens za dobivanje aluminijske ne primjenjuje se ugljik, jer se glinica reducira s ugljikom na 2000 °C, a na toj temperaturi aluminij ima veliki afinitet prema ugljiku te dolazi do stvaranja karbida  $Al_4C_3$ . Zato ako se želi provesti redukcija s ugljikom, onda to uvijek mora biti u prisustvu nekog drugog elementa (silicija, željeza, bakra) koji ima visoku točku vrenja i koji se lako legira s aluminijem. Dobivena slitina može se primjenjivati kao takva, a može se primijeniti i kao sirovina za dobivanje aluminijske. Zbog tih razloga, aluminij se je komercijalno počeo proizvoditi tek u 19. stoljeću.

Proces proizvodnje aluminijske provodi se tako da se prvo iz aluminijske rude, najčešće boksita, dobiva čista glinica. Da bi se došlo do čiste glinice, boksit se najprije izlužuje s otopinom NaOH pri visokim temperaturama i tlakovima, pri čemu aluminij prelazi u otopinu u obliku aluminata ( $NaAlO_2$ ), a zatim se iz aluminatne otopine taloži čisti  $Al(OH)_3$ . Dobiveni  $Al(OH)_3$  se kalcinira da bi se odstranila voda i dobio konačni produkt glinica,  $Al_2O_3$ . Neizreagirane nečistoće iz boksita odstranjuju se u obliku ostatka koji se naziva crveni mulj.

Dobivena čista glinica odlazi tada na elektrolizu u rastaljenom kriolitu,  $Na_3AlF_6$ .

Elektroliza se provodi uz ugljične elektrode. Takva vrsta elektrolize naziva se elektroliza taljevine, taljevinska elektroliza ili elektroliza u rastaljenom stanju i može se reći da je to danas jedini način dobivanja aluminijske, makar se stalno ispituju i nastoje uvesti i druge metode [12].



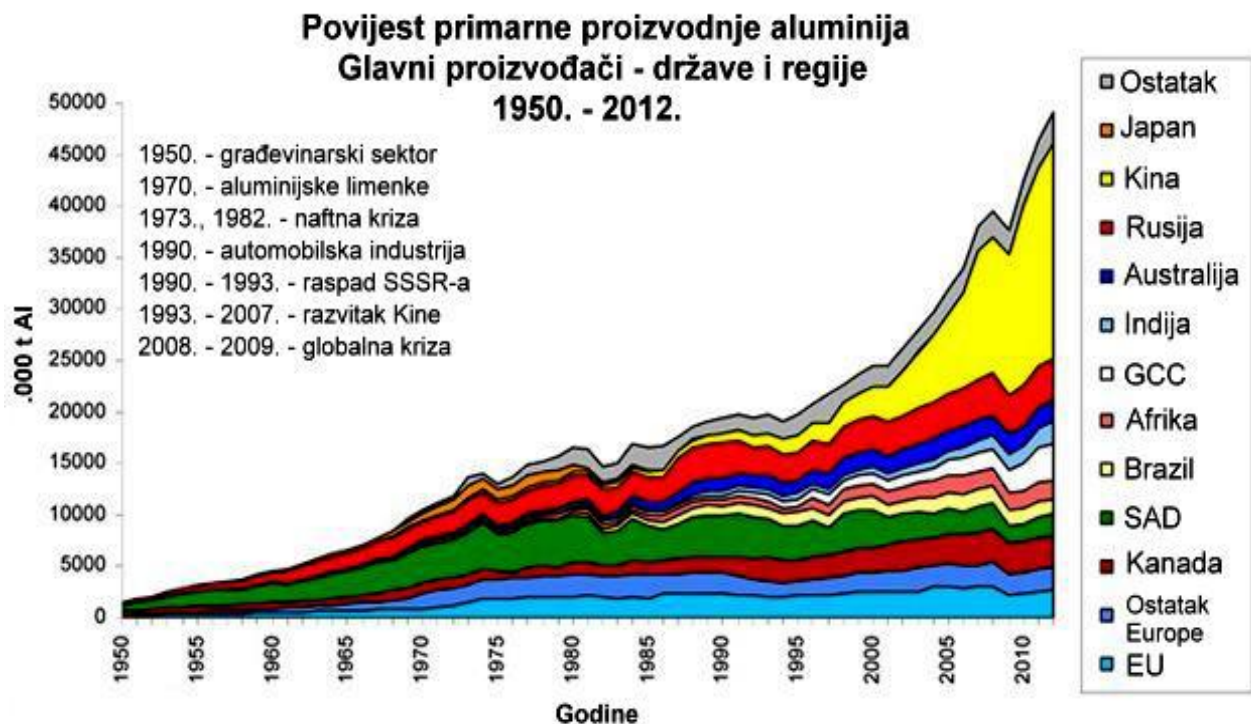
Cijena prvog proizvedenog aluminijskog aluminija bila je jako visoka, a povećanjem proizvodnje cijene se snižavaju, baš kao što je i prikazano u tablici 1.

1884. godine proizvedeno je u SAD-u 60 kg aluminija i prodano po cijeni srebra. Za usporedbu, 1995. godine cijena aluminija bila je 75 puta manja od cijene srebra [12].

**Tablica 1. Promjena cijena aluminija od početka proizvodnje pa sve do danas [12]**

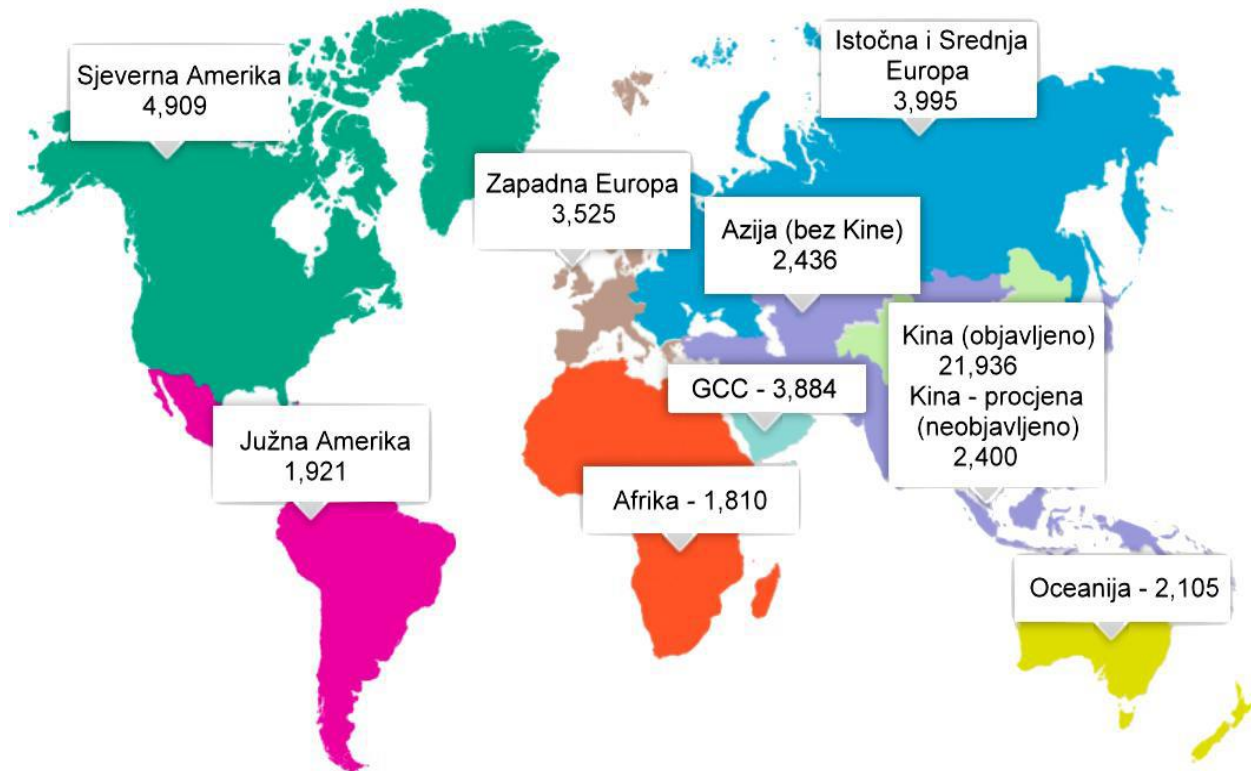
Godina	Cijena aluminija, [\$/kg]	Godina	Cijena aluminija, [\$/kg]
1852.	2180	1970.	0,85
1900.	0,96	1980.	1,57
1920.	1,32	1990.	1,40
1940.	0,41	2000.	1,20
1950.	0,39	2010.	1,40
1960.	0,57	2014.	1,70

U početku je samo nekoliko zemalja proizvodilo aluminij (1910. godine samo 7), da bi se vremenom njihov broj povećavao i 1980. godine došao na 50. Proizvodnja primarnog aluminija, kao prljava industrija, danas se seli u nerazvijene zemlje, uz pretpostavku da te zemlje imaju dovoljno energije [12].



**Slika 12. Proizvodnja aluminija kroz godine [12]**

Najveći proizvođač primarnog aluminija u svijetu trenutno je Kina s oko 24 milijuna tona, što je otprilike 50 % ukupne svjetske proizvodnje, koja je u 2013. godini iznosila 48,9 milijuna tona. Pregled vodećih svjetskih proizvođača aluminija za 2013. godinu prikazan je na slici 13. Navedeno područje GCC na slici (engl. *Gulf Cooperation Council*) objedinjava područje Bahreina, Omana, Saudijske Arabije i Ujedinjenih Arapskih Emirata [12].



**Slika 13. Ukupna svjetska proizvodnja aluminija 2013. godine u milijunima tona [12]**

Postoji mnogo klasifikacija aluminija koje se provode prema različitim kriterijima, a najvažnija od svih njih je njegova čistoća. Jedan primjer neslužbene klasifikacije aluminija je:

- < 99,5 % Al - slabo čist aluminij
- 99,5 - 99,9 % Al - komercijalno čist aluminij,
- 99,9 - 99,95 % Al - jako čist aluminij
- 99,99 % Al - „rafinal“
- 99,95 - 99,999 % Al - aluminij visoke čistoće
- > 99,999 % Al - aluminij ultravisoke čistoće [12].

Fizikalna, kemijska i mehanička svojstva aluminija su poput čelika, mjedi, bakra, cinka, olova ili titanija. Može se taliti, lijevati, strojno obrađivati i dobar je vodič električne struje. Zbog ove jedinstvene kombinacije svojstava, upotreba aluminija i njegovih slitina i dalje raste. Bez

aluminija ne možemo letjeti, voziti se u visokobrzim vlakovima i automobilima visokih performansi [12].

#### **- Lagan**

Aluminij je vrlo lagan metal s gustoćom od  $2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ , što je otprilike trećina uodnosu na čelik ( $7,85 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ). Korištenjem aluminija u vozilima smanjuje se težina i potrošnja energije, dok se nosivost povećava [12].

#### **-Visoke čvrstoće**

Čvrstoća mu je prilagodljiva ovisno o primjeni i postiže se modificiranjem sastava njegovih slitina. Legiranjem s malom količinom drugih metala postiže čvrstoću čelika i to sa samo trećinom svoje mase. Povećanje čvrstoće aluminijskih slitina ne dovodi do smanjenja plastičnosti [12].

#### **-Dugotrajan**

Svi su materijali podvrgnuti degradaciji ovisno o vremenskim uvjetima, vrstama korozije te načinu propadanja. Aluminij ima prirodnu sposobnost da se odupre tim utjecajima bolje od mnogih materijala. Trajnost aluminijskih konstrukcija, kao što su npr. građevinski objekti, jasno ukazuje na to. Aluminij se prirodno zaštićuje slojem oksida, čime postiže samozaštitu u normalnoj atmosferi, dok se posebnim postupcima (anodizacijom, lakiranjem i sl.) postiže izvanredan dekorativan izgled površine [12].

#### **-Plastičan**

Aluminij je plastičan materijal - njegova sposobnost oblikovanja je i više nego zadovoljavajuća. Aluminij ima i nisku temperaturu taljenja te se u rastaljenom stanju može se obraditi na više načina [12].

#### **- Dobar vodič topline i električne energije**

Aluminij je dobar električni vodič i po tom svojstvu nalazi se odmah iza srebra i bakra. Po jednom gramu mase, bolje provodi električnu struju od bakra, ali zauzima veći volumen od njega te je po kvadratnom centimetru poprečnog presjeka vodiča bakar bolji vodič. Dok je bakar manje reaktivan i može se lakše obrađivati od aluminija, vodiči od aluminija se koriste samo u slučajevima gdje je neophodno smanjiti masu vodiča. Aluminij se naročito koristi kao električni vodič za struju u električnoj mreži, kada se radi o velikim i debelim vodičima (npr. kao što su strujne šine i kablovi za uzemljenje) [12].

**- Otporan na koroziju**

Iako spada u skupinu neplemenitih metala, vrlo je otporan prema utjecaju korozivnih tvari kao što su voda, dušična kiselina, mnoga organska otapala te atmosferski utjecaji i morska atmosfera. Uzrok postojanosti je stvaranje tankog oksidnog sloja na površini metala koji se ne ljušti i štiti metal od daljnje oksidacije. Umjetno pasiviziranje površine provodi se postupkom elektrolitičke oksidacije poznate pod tehničkim nazivom eloksiranje [12].

**- Potpuno nepropustan i bez mirisa**

Aluminijska folija, čak i kada je izvaljana na samo 0,007 mm debljine, još uvijek potpuno nepropusna. Osim toga, aluminij nije toksičan i ne otpušta niti miris niti okus, što ga čini idealnim za pakiranje osjetljivih proizvoda poput hrane ili farmaceutskih proizvoda [12].

**- Ima dobra reflektirajuća svojstva**

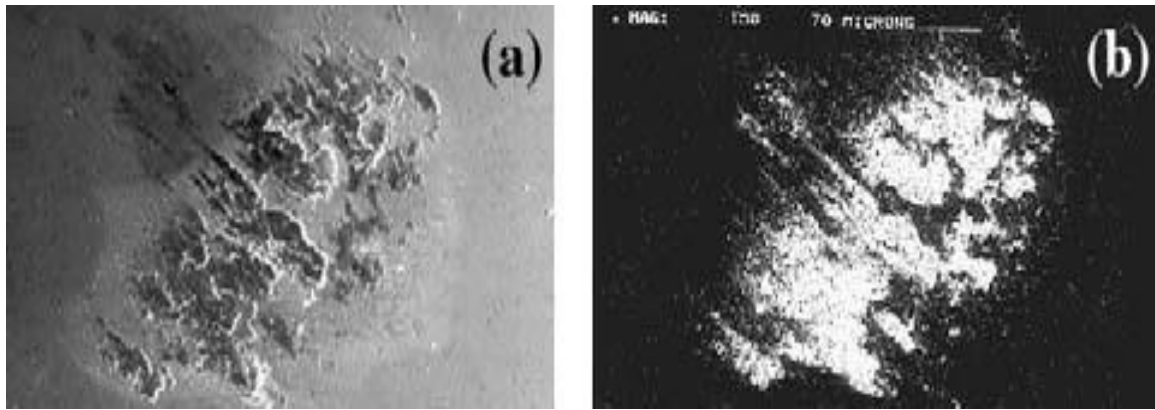
Aluminij je dobar reflektor vidljivog svjetla, kao i topline te je zajedno sa svojom malom masom idealan materijal za izradu primjerice rasvjetnih sredstava. Čisti aluminij reflektira 90 % svjetlosti ultraljubičastog i infracrvenog zračenja. Bez posebne pripreme površine, Al-*lim* trgovačke kvalitete reflektira 75 - 80 % Sunčevih zraka [12].

**- Mogućnost konstantnog recikliranja**

Aluminij je metal koji se može 100 % reciklirati bez smanjenja svojih svojstava. Ponovno pretaljivanje zahtijeva samo oko 5 % energije potrebne za proizvodnju primarnog metala [12].

**- Slaba otpornost na trošenje**

Široko je poznato kako prilikom klizanja mekanog metala (npr. aluminijska) o tvrdi materijal (npr. čelik) dolazi do trošenja mekšeg materijala, a kako bi se to spriječilo dodajemo mazivo u krutom ili tekućem obliku. Tu činjenicu može potvrditi i dobro znani test „kuglica po disku“, u kojem kuglica (indentor) načinjena od tvrdog materijala klizi po disku na koji se postavlja mekši materijal. Zbog prevelikog koeficijenta trenja (u ovom slučaju između 0,5 i 0,6) dolazi do nakupljanja čestica aluminijske na površinu kuglice, što rezultira trošenjem istoimenog materijala [13].



Slika 14. a) Nakupine čestica Al na kuglicu tijekom testa "kuglica po disku"

b) Prikaz rendgenske snimke traga trošenja (uvećano 200x) [13]

#### - Niskog tališta

Za razliku od volframa (W) koji je poznat po svojoj visokoj temperaturi tališta, a koja je ujedno i najveća od svih kovina (3422 °C), aluminij je na začelju te karakteristike s tek 660 °C te se zbog toga mora paziti u koje svrhe i u kojim temperaturnim područjima će se koristiti.

#### - Nizak modul elastičnosti ( $E$ ) i modul smičnosti ( $G$ )

Još jedna u nizu mana aluminijske su nize modula elastičnosti ( $E$ ) i modula smičnosti ( $G$ ). Modul elastičnosti iznosi  $E = 70\,000$  MPa, dok modul smičnosti iznosi  $G = 27\,000$  MPa. Usporedbe radi, to je 3 puta manje od prosječnog čelika kojemu modul elastičnosti iznosi  $E = 210\,000$  MPa, a modul smičnosti  $G = 81\,000$  MPa.

Od ostalih nedostataka bi trebalo spomenuti aluminij kako nije magnetičan, nosivost mu opada u zoni utjecaja topline (ZUT) tijekom zavarivanja i relativno je osjetljiv na djelovanje požara [12].

## 2.3. Aluminijske legure

Razlikujemo preko 500 različitih legura aluminija, a svaka ta podjela pripada svojoj „seriji legura“. Međunarodni sustav za oznake legura (*International Alloy Designation System - IADS*) je sustav klasifikacije koji se koristi u velikoj većini zemalja za kategorizaciju aluminijskih legura prema njihovom kemijskom sastavu. Obično se ovaj sustav koristi za klasifikaciju legura u avionima. Legure se klasificiraju u jednu od osam serija koje su prikazane u tablici 2. Pomoću glavnog legirnog elementa možemo utvrditi kojoj seriji (od 8 mogućih) legura pripada, te su oni prikazani navedenoj tablici. Serija 8000 se koristi za one legure koje se ne mogu dodijeliti niti jednoj od navedenih serija, a glavni legirni element im je obično litij. Svaka legura određene serije ima četveroznamenasti broj: xxxx, a prva brojka označava serijski broj, npr. 3xxx i 5xxx. Prvi primjer nam ukazuje kako je navedena legura u seriji 3000, jer sadrži početni broj 3 koji ga svrstava u seriju 3000, dok nam primjer 5xxx označava leguru u seriji 5000 itd. Broj koji se nalazi na drugome mjestu označava broj modifikacija tipa legure. To znači koliko je puta neka legura izmijenjena ili modificirana. Na primjer, iz legure „4232 Al“ vidimo kako nam je na drugome mjestu broj (2) koji nam govori da je legura izmijenjena dva puta, te da ima sličan sastav kao i verzije 4032 Al, 4132 Al, 4232 Al itd. Posljednja dva broja u četveroznamenastom sustavu se odnose samo za čistoću legura serije 1000, dok u ostalim serijama od 2000 do 8000 služe samo za identifikaciju različitih legura u serijama. Legure u seriji 1000 su poznate pod nazivom „komercijalno čisti aluminij“ i one sadrže minimalno 99% aluminija i kod njih (i samo kod njih) posljednje dvije brojke govore koliki je minimalni udio čistoće aluminija. Primjera radi, „1311 Al“ ima minimalnu čistoću od 99,00 %, a kako to znamo? Zato jer spada u seriju 1000 koja automatski sadrži 99% Al, a ova zadnja dva broja „11“ govore koliko točno iznosi taj minimum – dakle, čistoća aluminija u tom primjeru bi iznosila 99,11%. U idućem primjeru, „1263 Al“ minimalni udio aluminija bi bio 99,63%, jer spada u seriju 1000 i automatski ima 99% Al, a posljednje dvije znamenke „63“ nam ukazuju koliko točno iznosi ta minimalna čistoća. Kada se neka legura razvija, stavlja joj se prefiks X radi označavanja da još nije u potpunosti ocijenjena i klasificirana od strane IADS-a. Na primjer, legura X6136 ukazuje da je nova legura u seriji 6000, te se ona testira i ocjenjuje. Nakon tog procesa evaluacije, prefiks se briše i legura je poznata kao Al 6136. Većina zemalja koristi IADS za klasifikaciju aluminijskih legura, no neke države koriste i drugačije sustave klasifikacije - Velika Britanija koristi i IADS i BS (engl. *British Standards*), koji se također koristi za klasifikaciju aluminijskih legura [14].

Tablica 2. Serije legura aluminija s pripadajućim legirnim elementima [14]

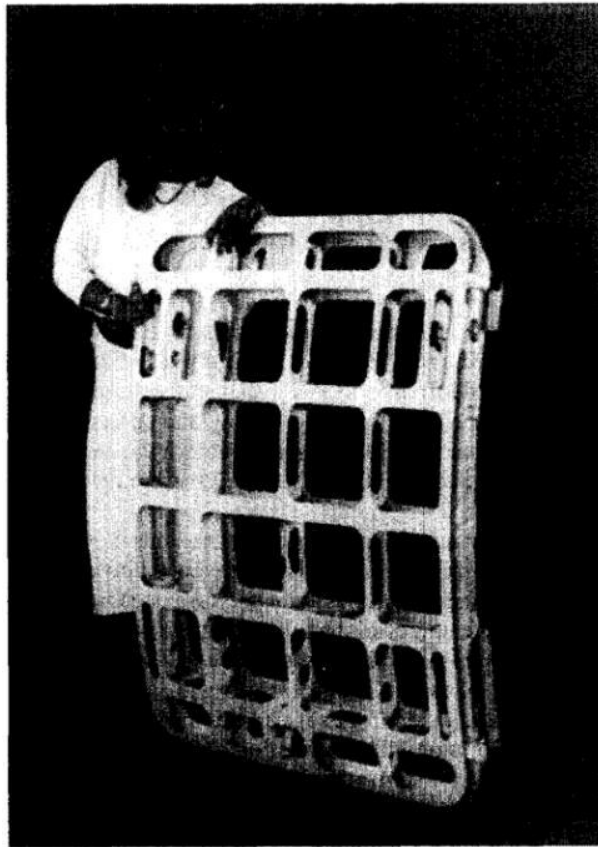
Serije legura	Glavni legirni element	Očvrsnute/neočvrsnute
1000	komercijalno čisti Al (>99% Al)	Precipitacijski neočvrsnute
2000	bakar (Cu)	Precipitacijski očvrsnute
3000	mangan (Mn)	Precipitacijski neočvrsnute
4000	silicij (Si)	Precipitacijski očvrsnute (ako je prisutan magnezij)
5000	magnezij	Precipitacijski neočvrsnute
6000	magnezij i silicij	Precipitacijski očvrsnute
7000	cink	Precipitacijski očvrsnute
8000	neki drugi (npr. litij)	Većinom precipitacijski očvrsnute

## 2.4. Vrste aluminijских legura

Aluminij može biti u gnječenom ili lijevanom stanju pa se na temelju toga i vrši podjela aluminijских legura. Ako je aluminij u lijevanom stanju, klasificira se kao ljevačka legura, a ako je u gnječenom stanju, klasificira se kao gnječenom legura, koja može, a i ne mora biti toplinski obrađena. Dakle da rezimiramo, dvije su glavne podijele aluminijских legura – ljevačke legure i gnječene legure. Mehanička svojstva lijevanih legura su uglavnom bolja u odnosu na gnječene legure, te se zbog toga više koriste u automobilske svrhe, a rjeđe u zrakoplovne. Znaju se ponekad koristiti u malim, nenosivim komponentama na avionu, kao što su dijelovi za sustav kontrole. U zrakoplovnoj industriji aluminij se primjenjuje u obliku gnječenih toplinski obrađenih legura, a sama čvrstoća takvih legura se može poboljšati plastičnom deformacijom (npr. izvlačenje, valjanje) i toplinskom obradom. U najširem smislu, pojam toplinske obrade se odnosi na zagrijavanje i hlađenje, s ciljem mijenjanja mikrostrukturnih karakteristika – kristalne rešetke, veličine zrna, gustoće dislokacija i mehaničkih svojstava, kao što su otpornost na umor i žilavost, te otpornosti na koroziju, otpornosti na oksidaciju itd. No, osim navedenih primjera, toplinskom obradom možemo eliminirati i zaostala naprezanja, koja mogu predstavljati problem u konstrukcijskim dijelovima, jer smanjuju vijek trajanja konstrukcijskog dijela, dovode do preranog prijeloma strojnog dijela itd. [14]

Međutim, korištenje termina toplinska obrada kod gnječenih aluminijskih legura obično podrazumijeva postupke zagrijavanja i hlađenja koji dovode do povećanja čvrstoće putem procesa znanog kao precipitacijsko očvršćivanje („starenje“).

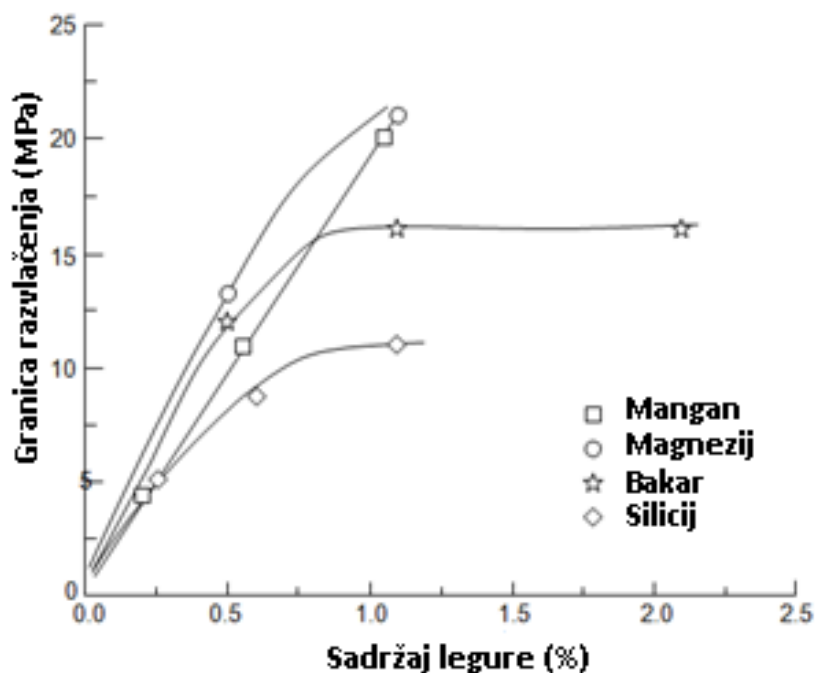
Kod gnječenih aluminijskih legura razlikujemo dvije glavne grupe: legure koje očvršćuju starenjem i legure koje ne očvršćuju starenjem. Najpoznatija karakteristika legura koje ne očvršćuju starenjem jest da nakon toplinske obrade ne mogu biti ojačane precipitacijskim očvršnućem. Imaju relativno nisku granicu razvlačenja, nešto ispod 300 MPa, čime su neprikladne za avionske primjene, ali i za automobilske. Legure koje očvršćuju starenjem su suprotnih karakteristika, što se da zaključiti iz njihova imena i njihova sposobnost jest dijametralno suprotna očekivanju „starenja“ materijala – one imaju sposobnost povećanja čvrstoće precipitacijskim očvršnućem nakon toplinske obrade. Osim precipitacijskog očvršnuća, ove legure koriste i ojačavanje granicama zrna, kao dodatni mehanizam u povećanju čvrstoće. Granica razvlačenja im se kreće u rasponu od 450 do 600MPa, a kombinacija niske cijene, male mase, visoke čvrstoće i žilavosti čini ih pogodnima za upotrebu u raznim konstrukcijskim dijelovima zrakoplova i automobila [15].



Slika 15. Aluminijski odljevak koji se koristi kod prtljage Airbusa [15]

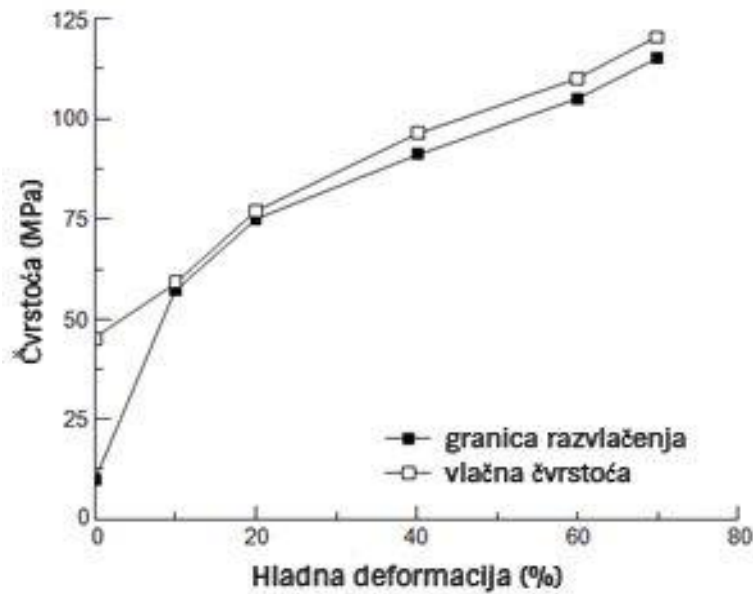


Kao što je spomenuto, upotreba kovanih legura aluminija koje starenjem ne očvršćuju jest ograničena u zrakoplovnim i automobilskim industrijama, a glavni nedostatak im je čvrstoća, otpornost na umor i duktilnost, a to je sve potrebno kako bi neka strukturna komponenta bila stabilna i upotrebljiva. Granica tečenja većine ovih legura je ispod 225 MPa, čime ne zadovoljavaju zahtjeve zrakoplovnih i automobilskih konstrukcija, koje su pod utjecajem velikih dinamičkih naprezanja. Serije 1000, 3000, 5000 i većina 4000 legura ne mogu biti očvrsnute starenjem putem toplinske obrade, jer većina legiranih elemenata ima izrazito nisku topljivost u aluminiju na sobnim temperaturama, pa se češće upotrebljava očvršnuće granicama zrna. Sama nemogućnost otapanja velike količine legirajućih elemenata u obliku intersticijskih ili supstitucijskih kristala mješanaca znači da se vrlo malo očvršnuće može postići[16]. Slika 16. nam pokazuje porast granice razvlačenja aluminija velike čistoće ojačavanjem uz pomoć udjela legiranih elemenata [15],[17].



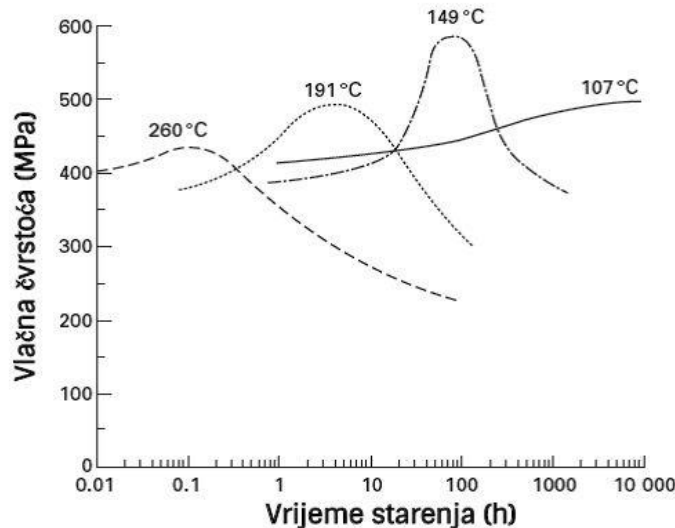
Slika 16. Utjecaj legiranih elemenata u čistom aluminiju na granicu razvlačenja [17]

Umnažanje dislokacija i očvršnuće granicama zrna pomoću hladne deformacije efikasni su mehanizmi legura koje ne očvršćuju starenjem, a njihova je uloga povećanje čvrstoće. Na primjeru slike 17. vidimo kako hladna deformacija utječe na povećanje granice razvlačenja „čistog“ aluminija [15],[17].



Slika 17. Utjecaj hladne deformacije na čvrstoću čistog aluminija [17]

Mehanička svojstva aluminijskih legura koje očvršćuju starenjem ovise isključivo o temperaturi i vremenu na kojem se starenje odvija, a slikom 18. prikazani su učinci temperature starenja na vlačnu čvrstoću aluminijskih legura u ovisnosti o vremenu i temperaturi starenja [18].



Slika 18. Utjecaj starenja na vlačnu čvrstoću [18]

## 2.5. Serije legura aluminija

### Legura aluminija serije 1000

Kao što je prethodno i spomenuto, serija 1000 se svrstava u „komercijalno čisti aluminij“ čija minimalna čistoća iznosi 99%. Jako rijetko joj se dodaju vrlo male količine legirnih elemenata, iz razloga što oni ostavljaju tragove nečistoća, a jedni od takvih legirnih elemenata su bakar, željezo i silicij. Takvi tragovi nečistoća ostaju u metalu, a njihovo uklanjanje je veoma skupo pa se i sami proces dodavanja legirnih elemenata izbjegava. Unatoč njihovoj niskoj koncentraciji, nečistoće imaju značajan utjecaj na mehanička svojstva. Primjera radi, nečistoće nastale od bakra, silicija i željeza povećavaju granicu tečenja za 300 MPa, a vlačnu čvrstoću za čak 40%. Legure iz ove serije se koriste za dijelove u kojima nije potrebna visoka čvrstoća, kao što su npr. poklopci amortizera u automobilima i lopatice na malim civilnim avionima. Također se koriste kao spremnici goriva automobila i uljni spremnici [14], [15], [17].

### Legura aluminija serije 2000 (Al-Cu)

To su legure na bazi bakra, koji ima ulogu glavnog legirnog elementa. Karakterizira ih visoka čvrstoća, te otpornost na umor i žilavost. Jedna od najčešćih je legura „2024 Al“ koja uz aluminij sadrži i 1,5% bakra. Takve legure se koriste za štitnike kotača automobila, okvire motora te vrhove zrakoplovnih krila. Smanjenjem nečistoća, a posebice željeza i silicija, postiže se bolja žilavost i bolja otpornost na pojavu pukotina uslijed umora [14], [15], [17].

**Legura aluminija serije 3000 (Al-Mn)**

Glavni legirni element ove serije je mangan. Granica razvlačenja im je ispod 200 MPa, što je relativno nisko te se zbog toga koriste za izradu spremnika goriva, štitnika kotača automobila i za „nosove“ pojedinih zrakoplova [15], [17].

**Legura aluminija serije 4000 (Al-Si)**

Sadrže značajne količine silicija. Ne mogu se ojačati toplinskom obradom, osim ako je prisutan magnezij koji će stvoriti  $Mg_2Si$  intermetalne spojeve. Upotreba ovih legura u avionima i automobilima je ograničena, jer postoji opasnost od stvaranja krutih faza silicija u matrici aluminija, što uzrokuje smanjenje duktilnosti i žilavosti [15].

**Legura aluminija serije 5000 (Al-Mg)**

Sadrže magnezij koji stvara intermetalne spojeve  $Mg_2Al_3$  koji povećavaju čvrstoću same legure. Sama legura nema neku veliku primjenu, a glavni nedostatak jest što se nastali  $Mg_2Al_3$  ne mogu kontrolirati toplinskom obradom, tj. ponekad mogu narasti i iznad svojih standardnih veličina [15], [17].

**Legure aluminija serije 6000 (Al-Mg-Si)**

Sadrže čak dva glavna legirna elementa – magnezij i silicij. Mogu očvrnuti starenjem, a formiraju  $Mg_2Al_3$  i  $Mg_2Si$  spojeve. Karakterizira ih izrazito niska žilavosti, zbog čega se povremeno koriste za izradu rebara avionskih krila, ventilacije zrakoplova, te spremnika goriva automobila [14], [15], [17].

**Tablica 3. Legure aluminija serije 7000 [17]**

Legure	Cu (%)	Zn (%)	Mg (%)	Mn (%)	Cr (maks. %)	Si (maks. %)	Fe (maks. %)
7049	1,2 - 1,9	7,2 - 8,2	2,0 - 2,9	0,2	0,22	0,25	0,35
7050	2,0 - 2,6	5,7 - 6,7	1,9 - 2,6	0,1	0,04	0,12	0,15
7075	1,2 - 2,0	5,1 - 6,1	2,1 - 2,9	0,3	0,28	0,4	0,5
7079	0,4 - 0,8	3,4 - 4,8	2,9 - 3,7	0,3	0,25	0,3	0,4
7090	0,6 - 1,3	7,3 - 8,7	2,0 - 3,0	-	-	0,12	0,15
7091	1,1 - 1,8	5,8 - 7,1	2,0 - 3,0	-	-	0,12	0,15
7178	1,6 - 2,4	6,3 - 7,3	2,4 - 3,1	0,3	0,35	0,4	0,5
7475	1,2 - 1,9	5,2 - 6,2	1,9 - 2,6	0,6	0,25	0,1	0,12

### **Legure aluminija serije 7000 (Al-Cu-Zn)**

Predstavljaju najčešće korištene legure u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji. Glavni legirni elementi su bakar i cink, premda cinka ima 3 do 5 puta više nego bakra. Može im se dodati i magnezij, a navedeni elementi im stvaraju precipitate iznimno visoke čvrstoće, kao što su  $\text{CuAl}_2$  i  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$ . Imaju veću čvrstoću od legura iz serije 2000, a granica razvlačenja im se kreće u rasponu 470-600MPa. Koriste se za konstrukcijske dijelove koji moraju izdržati visoka dinamička naprezanja [14], [15], [17].

### **Legure aluminija serije 8000 (Al-Li)**

Aluminijske legure koje se ne mogu razvrstati prema njihovom kemijskom sastavu u neku od prethodno navedenih serija, dodijeljene su seriji 8000. Pojedine legure iz ove serije sadrže litij, jedinstven legirni element koji smanjuje gustoću, a istovremeno povećava Youngov modul elastičnosti i vlačnu čvrstoću [19].

## **2.6. Trendovi i industrijska uporaba aluminijskih kompozita**

Kompoziti, polimeri i keramika su materijali koji zadnjih desetak godina dominiraju u pojedinim industrijama. Razlog primjene kompozita s metalnom matricom u automobilskim i zrakoplovnim industrijama te agrikulturnom sektoru leži u zahtjevima tih industrija koje ovi materijali mogu ispuniti. Primarni je zahtjev, kao što je već prethodno spomenuto, smanjenje mase samih konstrukcijskih dijelova, a da pritom učinkovitost i performanse ostanu na vrlo visokoj razini. Automobilske industrije su u današnje vrijeme sve više i više podložne zahtjevima kupaca, koji prvenstveno zahtijevaju sigurnost i udobnost, a nije na odmet i ušteda goriva. Kako bi ti zahtjevi bili ispunjeni, automobilske industrije se okreću upotrebi aluminijskih kompozitnih materijala (engl. AMC – *Aluminum Matrix Composites*) koji su lagani i koji učinkovito poboljšavaju sam proizvod. Odlikuju se po iznimno visokoj specifičnoj krutosti, a sama visoka čvrstoća im nudi široki izbor primjene – od robotike pa sve do vratila, automobilskih motora i dijelova kočnica. Posjeduju iznimna fizikalna i mehanička svojstva, kao što su visok modul elastičnosti, dobra duktilnost, niski koeficijent toplinskog rastezanja, izvrsnu otpornost na trošenje i visokotemperaturno puzanje itd. Dodaju im se razne vrste keramike (npr.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC, MgO,  $\text{B}_4\text{C}$ ) koje posjeduju superiorna svojstva, npr. visoku tvrdoću, visoku tlačnu čvrstoću, otpornost na trošenje, izvrsnu toplinsku postojanost i stabilnost itd. Aluminij sadrži okside koji su pogodni za uporabu u ljevarstvu, ali se u

današnje vrijeme koriste u kombinaciji sa silicijevim (SiC), titanijevim (TiC) i borovim karbidom (B<sub>4</sub>C), koji imaju vrlo veliku primjenu u svemirskoj i zrakoplovnoj industriji, a neka od njihovih svojstva navedena su u tablici 4 [20].

**Tablica 4. Mehanička i fizikalna svojstva keramika [20]**

Keramika	Gustoća ( $\rho$ , g/cm <sup>3</sup> )	Modul elastičnosti ( $E$ , GPa)	Tlačna čvrstoća ( $\sigma_T$ , MPa)	Koeficijent toplinske provodljivosti ( $\lambda$ , W/mK)	Koeficijent toplinskog istezanja ( $\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> /K)
SiC	3,21	430	2800	132	3,4
B <sub>4</sub> C	2,52	450	3000	29	5,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,92	350	2500	32,6	6,8
TiC	4,93	345	2500	20,5	7,4

Prethodno navedena tablica pokazuje mehanička i fizikalna svojstva keramičkih materijala, a kako bi se ona postigla, mikrostruktura kompozita ojačanog tim česticama mora biti homogena. Što to znači? To znači da čestice moraju biti jednoliko raspoređene unutar matrice. Kod kompozita ojačanih česticama, veličina prisutnih čestica je veća od 1  $\mu\text{m}$ , što znači da poboljšavaju i ojačavaju kompozit u dvostrukom smislu. Prvo, svojim jednolikim rasporedom čestica jednoliko raspoređuju naprezanje na matricu, a drugo, stvaraju nekoherentnu vezu između čestica i matrice, tj. dolazi do nagomilavanja dislokacija po granicama zrna, čime materijal očvrstne. Stupanj očvrstnuća ovisi o nekoliko faktora – volumnom udjelu čestica, rasporedu, veličini i obliku čestica itd.

Matrica aluminijskih kompozita može se dobiti iz sljedeće 3 faze:

- tekuće stanje – dobiveno postupkom lijevanja potpomognuto ultrazvukom, vakuuskom infiltracijom, disperzijskim metodama [21], [22].
- kruto stanje – dobiva se najčešće metalurgijom praha, gdje se prah konsolidira i oblikuje kako bi se dobila kompaktna smjesa [22].
- plinovito stanje – najrjeđe korišteno stanje, zbog skupoće postupaka [22].

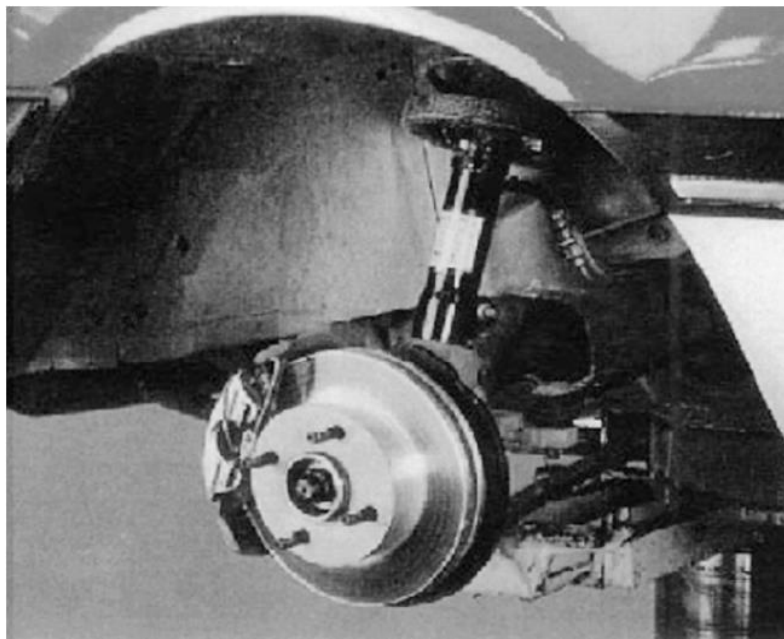
Lijevanje je jedno od najčešće korištenih postupaka za dobivanje aluminijskih kompozita, a glavna prednost mu je što je ekonomski isplativ i jeftin.

Kompoziti napravljeni od legura malih masa (ne samo aluminijski) imaju velik potencijal za primjenu u automobilskim industrijama, jer bi se od njih izrađivala koljenasta vratila, glave cilindara, blokovi motora, klipovi, klipnjače, ventili itd. Kako bi se navedeno potkrijepilo primjerom, na dolje navedenim slikama prikazane su konstrukcijski dijelovi automobila – klip od aluminijske matrice koja sadrži kratka vlakna ojačana  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i kočioni disk ojačan česticama  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



**Slika 19. Klip od aluminijske matrice ojačane s  $Al_2O_3$  [23]**

Disk-kočnice izrađene od prethodno navedenih materijala imaju veću postojanost svojstava na povišenim temperaturama. Naime, standardne disk-kočnice se izrađuju od lijevanog željeza koji nema visoku toplinsku provodljivost i otpornost na trošenje, dok disk-kočnice ojačane česticama  $Al_2O_3$  prikazane na slici 20. postižu puno bolja ili optimalna svojstva – imaju bolju otpornost na trošenje i visoku toplinsku provodljivost, a zasluge idu aluminiju i tehnologiji koja je primijenjena – gravitacijskim lijevanjem ili preciznim lijevanjem u kokilne kalupe.



**Slika 20. Disk kočnica ojačana česticama  $Al_2O_3$  [23]**



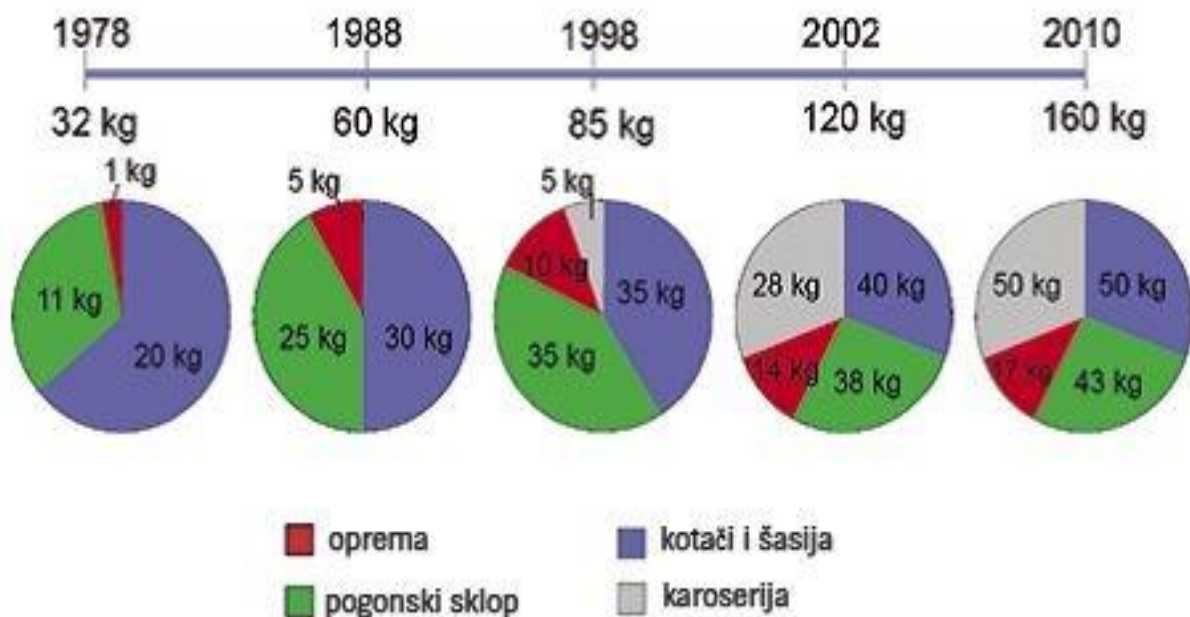
Nedavna istraživanja pokazuju kako se važni elementi u konstruiranju metalnih matrica (npr. homogena mikrostruktura, izotropna svojstva i ekološki prihvatljiva svojstva) mogu proizvesti na različite načine, a najčešći je pomoću ojačavanja čestica, pri čemu će svojstva ovisiti o veličini i obliku čestica.

U tablici 5. prikazani su dodatni primjeri primjene aluminijskih kompozita u suvremenim automobilskim industrijama, od Toyote, Nissana i Honde pa sve do General Motorsa, Lotus Elissea i Volkswagena [22].

**Tablica 5. Prikaz aluminijskih kompozita u suvremenoj automobilskoj industriji [22]**

<b>Proizvođači</b>	<b>Korištena matrica</b>	<b>Konstruktivski dijelovi</b>
Duralcan, Martin Marietta, Lanxide	Al/SiC	klipovi
Duralcan, Lanxide	Al/SiC	četkice kočnica, čahure
GKN, Duralcan	Al/SiC	osovina propelera
Nissan	Al/SiC	klipnjače
Dow Chemical	Mg/SiC	lančanicci, koloture
Toyota	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	klipni prsteni
Dupont, Chrysler	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	klipnjače
Hitachi	bakar/ugljik	kolektori
Martin Marietta	Al/TiC	klipovi, klipnjače
Honda	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	blokovi motora
Lotus Elisse, Volkswagen	Al/SiC	četkice kočnica
Chrysler	Al/SiC	četkice kočnice
General Motors (GM)	Al/SiC	stražnje kočnice automobila EV-1
MC-21, Dia-Compe, Manitou	Al/SiC	kočnice za bicikle, diskovi kočnica

U zadnjih 10 godina, upotreba aluminijskih kompozita se gotovo udvostručila u suvremenim automobilskim industrijama. Procjenjuje se kako je prije nešto više od 10-ak godina količina aluminija korištena za izradu jednog automobila iznosila 240kg, dok je danas ta brojka nešto veća i iznosi 340kg. Bitno je za napomenuti kako u te brojke nije uračunata količina aluminija korištena u izradi same karoserije automobila, tako da sama brojka korištenog aluminija sigurno premašuje 400kg. Podaci i analize koje provode proizvođači govore kako se uporabom ovakvih kompozita sama veličina bloka motora može smanjiti, a da pritom performanse ostaju iste. Razlog leži u tome kako se smanjenjem dimenzija motora smanjuje i sama potrošnja goriva, jer je automatski potreban manji protok goriva te se paralelno smanjuje i kapacitet spremnika goriva automobila. Istraživanja su pokazala kako smanjenjem mase automobila za 10%, potrošnja goriva padne za 8-10%. Današnje šasije i karoserije automobila sadrže u sebi 40% aluminija, dok se odljevci istoimenog materijala također primjenjuju i u izradi dijelova kočnica, amortizera, osovine upravljača, kućišta ležaja, instrumentalne ploče itd.



Slika 21. Promjena aluminija u automobilskim industrijama kroz godine [24]

U idućem odlomku prikazani su detaljnije aluminijski kompoziti ojačani silicijevim karbidom (SiC), koji se najčešće primjenjuju u suvremenoj automobilskoj i zrakoplovnoj industriji zbog niza prednosti i optimalnih svojstava koje tvore s aluminijem.

## 2.7. Aluminijski kompoziti ojačani silicijevim karbidom

Prilikom djelovanja naprezanja na kompozit, matrica je ta koja ima ulogu jednoliko rasporediti naravno naprezanje, a kako ne bi došlo do oštećenja samog kompozita, bitno je kakvim će karbidima taj kompozit biti ojačan. Kako bi veza između matrice i ojačala bila što bolja, ojačala se nastoje namočiti u posebnim smjesama prije samog lijevanja.

U tablici 6. prikazani su elementi koji se dodaju aluminijskoj matrici kako bi se postigla što bolja mikrostrukturalna svojstva, a zanimljivo je spomenuti kako se tijekom procesa lijevanja, rastaljenom aluminiju dodaje magneziju obliku trakica, kako bi se poboljšala sposobnost kvašenja. Veličina čestica silicijevog karbida kreće se u rasponu od 53  $\mu\text{m}$  do 74  $\mu\text{m}$ , a iz tablice se vidi koliki je udio magnezija potreban kako bi se povećalo kvašenje [25].

**Tablica 6. Udio komponenata u Al matrici [25]**

Elementi	Željezo (Fe)	Silicij (Si)	Mangan (Mn)	Bakar (Cu)	Magnezij (Mg)	Aluminij (Al) - osnova
udio, %	0,16	0,19	0,01	0,01	0,01	99,62

Silicijev karbid se aluminijskoj matrici dodaje u procesu lijevanja. Aluminij se stavlja u elektrootpornu peć kako bi se rastalio, a kad temperatura taljevine dosegne 750 °C, ubacuje se magnezij. Slijedeći na redu je silicijev karbid. Nakon određenog vremenskog perioda, kad temperatura taljevine padne na 730 °C, kroz lijevak se ubacuju čestice silicijevog karbida koje su prethodno bile zagrijane na temperaturu od 800 °C, u trajanju od dva sata. Predzadnji korak uključuje miješanje tako dobivene smjese (taljevine), a sam proces traje desetak minuta i odvija se u miješalici, koja se okreće brzinom od 500 okretaja u minuti. U posljednjem koraku taljevinu se izliva u metalni kalup, koji je prethodno bio zagrijan na temperaturu od 670 °C te slijedi skrućivanje.

Osim navedenih čestica silicijevog karbida (SiC), aluminijski kompoziti se često ojačavaju i s titanijevim karbidom (TiC), borovim karbidom (B<sub>4</sub>C), ugljičnim česticama itd [26].



**Slika 22. Elektrootporna peć za taljenje metala [27]**

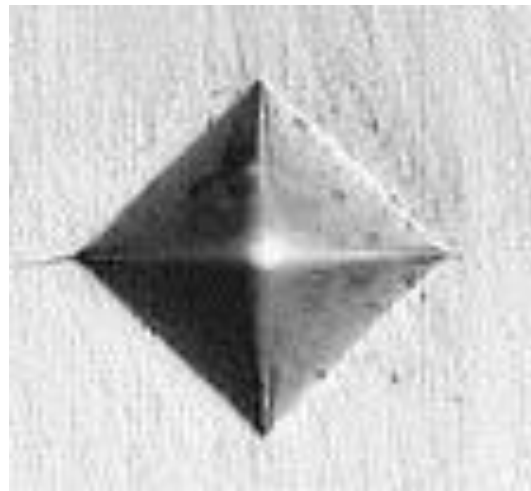
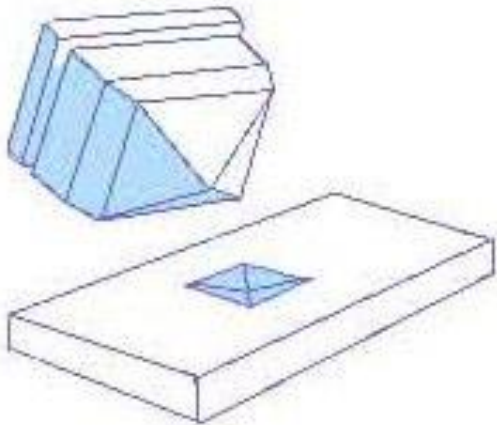
Tvrdoća predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog, znatno tvrdog tijela. Tvrdoća se može izraziti i kao otpor materijala prema plastičnoj deformaciji. Unatoč tome što tvrdoća ne predstavlja fizikalno egzaktno definirano mehaničko svojstvo, mjerenje tvrdoće je jedan od najraširenijih postupaka na području ispitivanja mehaničkih svojstava. Razlog tome je, s jedne strane, što je tvrdoća u vezi s nekim drugim mehaničkim svojstvima (npr. vlačnom čvrstoćom), a s druge strane, mjerenje tvrdoće je jednostavnije i prije svega brže od ispitivanja nekih drugih mehaničkih svojstava.

Postoje tri načina ispitivanja tvrdoće:

1. ispitivanje tvrdoće zarezom – Mohsova ljestvica tvrdoće
2. ispitivanje tvrdoće utiskivanjem (statičke metode) – Brinell, Vickers i Rockwell tvrdoće
3. ispitivanje tvrdoće odskokom (dinamičke metode).

Ispitivanje tvrdoće zarezom određeno je Mohsovom ljestvicom tvrdoće, a ona predstavlja niz od deset minerala poredanih po tvrdoći, od kojih se svaki mineral koristi za procjenu relativne tvrdoće drugih minerala ili tvari. Niz od tih deset minerala uključuje: talk, gips, kalcit, fluorit, apatit, ortoklas, kremen, topaz, korund i dijamant. Ljestvica nije pravocrtna, a što je neki mineral „viši“ u Mohsovoj ljestvici, to mu je i veća tvrdoća. Ako ispitivana tvar može zarezati površinu minerala iz Mohsove ljestvice, ona je tvrđa od tog minerala [28], [29].

Vickersova metoda je slična Brinellovoj metodi, a razlikuju se u penetrantu ili indentoru. Brinellova metoda za indentor koristi kuglicu od kaljenog čelika, dok Vickersova metoda koristi istostraničnu četverostranu dijamanatnu piramidu s vršnim kutom  $136^\circ$ . Primjenom ovakve geometrije penetratora dobivamo vrijednosti tvrdoće neovisne o primijenjenoj sili, a sama metoda je univerzalna, odnosno, primjenjiva je i za tvrde i za meke materijale. Dobivena vrijednost tvrdoće je bezdimenzijska veličina, a uz iznos tvrdoće se navodi i sila opterećenja. Trajanje opterećenja iznosi 10 do 15 s, a smanjivanjem sile utiskivanja dolazi do rasipanja rezultata tvrdoće. Prednost ove metode jest što je univerzalna metoda i što je moguće mjerenje vrlo tankih i tvrdih materijala. Nedostatak je mogućnost loma dijamanatne piramide, potrebna je posebna priprema površine te je potreban mjerni mikroskop kako bi očitali dijagonalni otisak [29].



Slika 23. Ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom [29]

Tvrdoća po Vickersu računa se po formuli

$$HV = \frac{0,189 * F}{d^2},$$

pri čemu  $F$  predstavlja silu mjerenu u njutnima (N), a  $d$  predstavlja srednju vrijednost dijagonale otiska izraženu u milimetrima (mm).

Sile utiskivanja kreću se od 49 N pa sve do 980 N. Ukoliko je primijenjena sila u rasponu od 1,96 do 49 N govorimo o semimikrotvrdoći, a ukoliko se rabe sile manje od 1,96 N govorimo o mikrotvrdoći [29].

Semitvrdoćom možemo odrediti tvrdoće tankih uzoraka te tankih slojeva, a mikrotvrdoćom je moguće mjerenje tvrdoće pojedinih faza (npr. mjerenje tvrdoće kristalnih zrna u mikrostrukturi materijala). Za kraj još valja spomenuti kako se navedena metoda ispituje prema normi HR EN ISO 6507-1:2014 [29].

Mikrotvrdoća kompozita određuje jakostveze između matrice i ojačala. U tablici 7. prikazano je kako udio silicijevog karbida djeluje na tvrdoću aluminijskih kompozita. Početna tvrdoća aluminijskog kompozita prema Vickersovoj metodi iznosi  $24,50 \pm 0,35$ . Maksimalna tvrdoća u navedenim primjerima se postiže kombinacijom aluminijskog kompozita i silicijevog karbida čiji udio iznosi 20 %, a navedena vrijednost tvrdoće iznosi  $45,40 \pm 1,06$  HV [30].

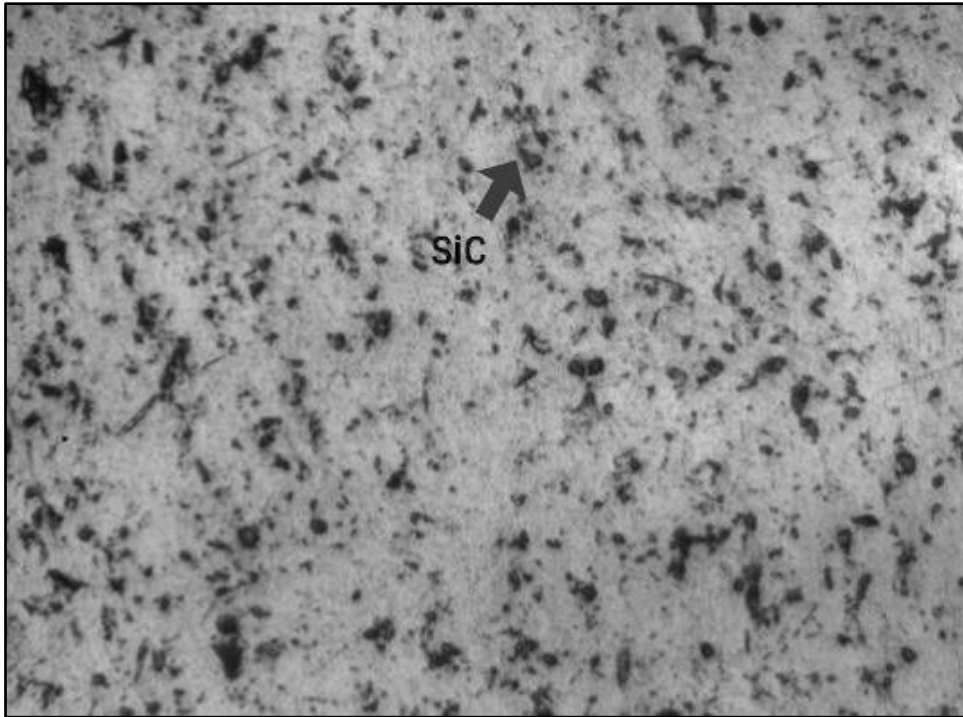
**Tablica 7. Utjecaj udjela silicijevog karbida na tvrdoću aluminijskih kompozita [31]**

Kombinacije	Tvrdoća po Vickersu
Al + 0% SiC	$24,50 \pm 0,35$
Al + 5% SiC	$38,67 \pm 1,81$
Al + 10% SiC	$42,30 \pm 2,43$
Al + 20% SiC	$45,40 \pm 1,06$

Dakle, porastom udjela silicijevog karbida raste i tvrdoća samih aluminijskih kompozita.

Nakon analize tvrdoće, u daljnjem dijelu teksta prikazan je utjecaj mikrostrukture na svojstva kompozita te poveznicu matrica-ojačalo. Redom su prikazane i analizirane slike različitih mikrostrukturnih stanja kompozita.

Sljedeće tri slike pokazuju mikrostrukturna stanja aluminijskih kompozita ojačanih silicijevim karbidom. Na slici 24. prikazana je mikrostruktura koja se sastoji od aluminijskog kompozita i 5 %-tnog udjela silicijevog karbida, na slici 25. slijedi mikrostruktura s 10 %-tnim udjelom i na slici 26. s 20 %-tnim udjelom silicijevog karbida [31].



Slika 24. Al matrica s 5% vol. SiC-a [31]

Promatra se gdje će se u matrici distribuirati i grupirati čestice silicijevog karbida. Slika 25 dobro predložuje nehomogen raspored čestica silicijevog karbida te kako su pojedina područja u mikrostrukturi ostala prazna i nepopunjena, a razlog je što se prilikom procesa proizvodnje kompozita stvorila površinska napetost između tekućeg aluminija i čestica SiC-a, koja je uzrokovala ovakav raspored konstituenata unutar mikrostrukture [31].

Osim navedenog grupiranja čestica silicijevog karbida, promatra se i poroznost koji se javlja unutar mikrostrukture. Na zadnjoj slici, slici 26. jasno je naznačena poroznost, a razlog njenog nastanka opet leži u samome proizvodnom procesu aluminijskih kompozita. Naime, prilikom dodavanja čestica silicijevog karbida, uz čestice je bio prisutan i zrak koji se uvukao između taljevine i čestica i ostao zarobljen te time uzrokovao poroznost. Povećanjem udjela silicijevog karbida, povećava se i udio zraka, stoga se može zaključiti kako će aluminij s 20 %-nim udjelom silicijevog karbida sadržavati i najviše poroznosti [31].



Slika 25. Al matrica s 10 % vol. SiC-a [31]



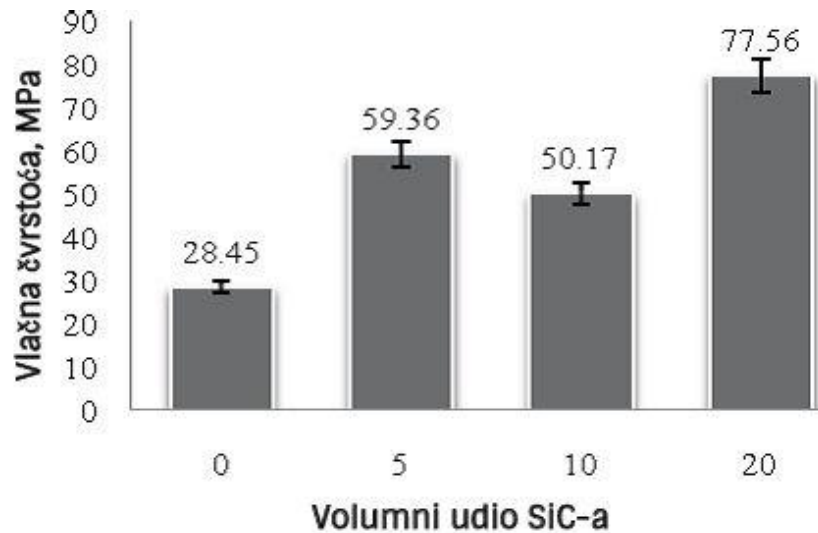
Slika 26. Al matrica s 20 % vol. SiC-a [31]

Na istim tim primjerima, s istim volumnim udjelom SiC-a, razmatrana je i prikazana vlačna čvrstoća. Provedena ispitivanja vlačne čvrstoće ukazuju kako je vlačna čvrstoća neojačane matrice aluminija puno niže čvrstoće od matrice ojačane silicijevim karbidom, slika 27., što je i logično. Pri samome ispitivanju, primijenjeno opterećenje se na ovakvu matricu bolje raspoređuje zbog povećane gustoće dislokacija i čvrstoće veza između čestica silicijevog karbida. Da bi došlo do pucanja aluminijskih kompozita ojačanih ovakvim ojačalom, primijenjeno opterećenje mora „razbiti“ tanku površinu formiranu između matrice i ojačala.



Kako porastom volumnog udjela silicijevog karbida raste i poroznost, tako se i podebljava ta tanko formirana površina koja će moći podnijeti veća naprezanja.

Međutim, iznimka je primjer aluminijskog kompozita s 10 %-tnim udjelom SiC-a, kod kojega je došlo do segregacije čestica SiC-a, što uzrokuje smanjenje vlačne čvrstoće [31].



Slika 27. Ovisnost vlačne čvrstoće o vol. udjelu SiC-a [31]

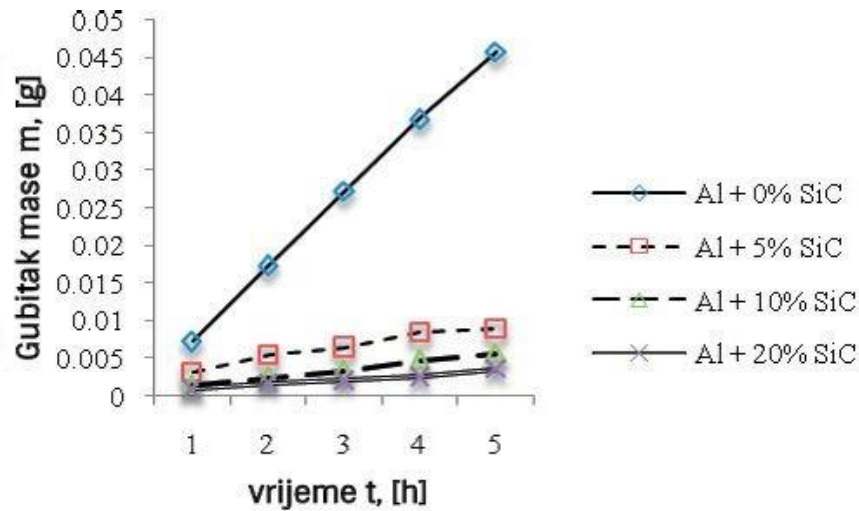
Posljednje svojstvo koje će se spomenuti je otpornost na trošenje. Najjednostavniji primjer trošenja materijala kojeg susrećemo u svakidašnjem životu jest korozija. To je proces nenamjernog razaranja konstrukcijskih materijala uzrokovano fizikalnim, fizikalno-kemijskim i biološkim djelovanjima. Korozija razara metale i anorganske nemetale (npr. beton), a sudjeluje i u oštećivanju (degradaciji) organskih materijala – polimera i drveta. Intenzitet korozije ovisi o:

- metalu koji korodira (sastav i mikrostruktura)
- agresivnoj atmosferi/okoline koja ga okružuje (sastav i koncentracija)
- korozijskim produktima (fizikalna i kemijska svojstva produkata korozije)
- fizikalnim uvjetima (temperatura, hrapavost površine, naprezanja)
- brzini gibanja agresivnog medija.

Postoji više vrsta korozije, npr. opća, lokalna, napetosna, selektivna i interkristalna korozija, koja je najopasnija jer se javlja na granicama zrna i nije vidljiva golim okom. Najčešće metode sprječavanja korozije su organskim premazima i prevlakama, inhibitorima korozije te odabirom korozijski postojanih materijala.

Na slici 28. prikazano je kako se mijenja masa uzoraka aluminijskog kompozita s vremenom izloženosti uvjetima korozije. Sa slike je jasno vidljivo kako je matrica od čistog aluminijskog pretrpjela veće masene gubitke nego matrica ojačana silicijevim karbidom.

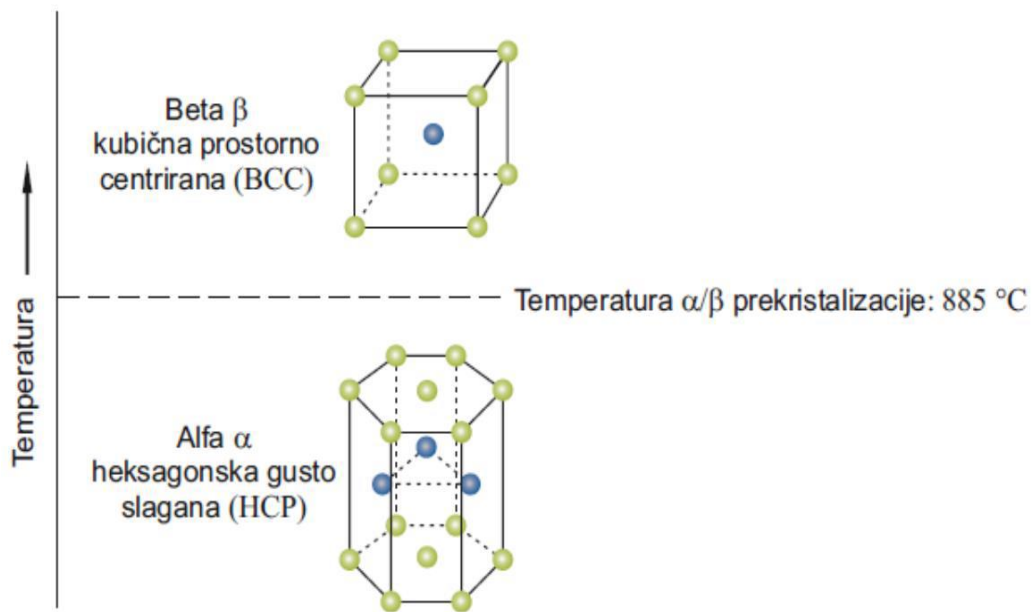
Razlog je vrlo jednostavan, aluminij je mekani materijal te se zbog toga vrlo lako odnosi s površine materijala, ostavljajući iza sebe tvrde čestice SiC-a koji štite od daljnjeg trošenja. Kako se povećava udio silicijevog karbida, tako raste i otpornost na trošenje pa je tako aluminijska matrica ojačana s 20%-tnim volumnim udjelom SiC-a pretrpjela najmanje masene gubitke, što potvrđuje i dijagram [31].



Slika 28. Utjecaj vol. udjela SiC-a na gubitak mase kompozita tijekom vremena [31]

## 2.8. Aluminijski kompoziti ojačani titanijevim karbidom

Titanij (Ti) se uz aluminij ubraja u široko primjenjive elemente. Ima ga čak i u Zemljinoj kori, s udjelom od oko 0,7 %. Prvenstveno se primjenjuje kod visoko čvrstih konstrukcija koje zahtijevaju visoku korozivnu postojanost, a spada u skupinu polimornih metala. Sadrži gusto slagano heksagonalnu (HCP) rešetku na sobnoj temperaturi koja će se pri temperaturama od 885 °C transformirati u kubičnu prostorno centriranu (BCC) rešetku, koju će zadržati sve do temperature tališta [32].



Slika 29. Kristalna struktura titanija (Ti) [32]

Titanij karakteriziraju sljedeća svojstva:

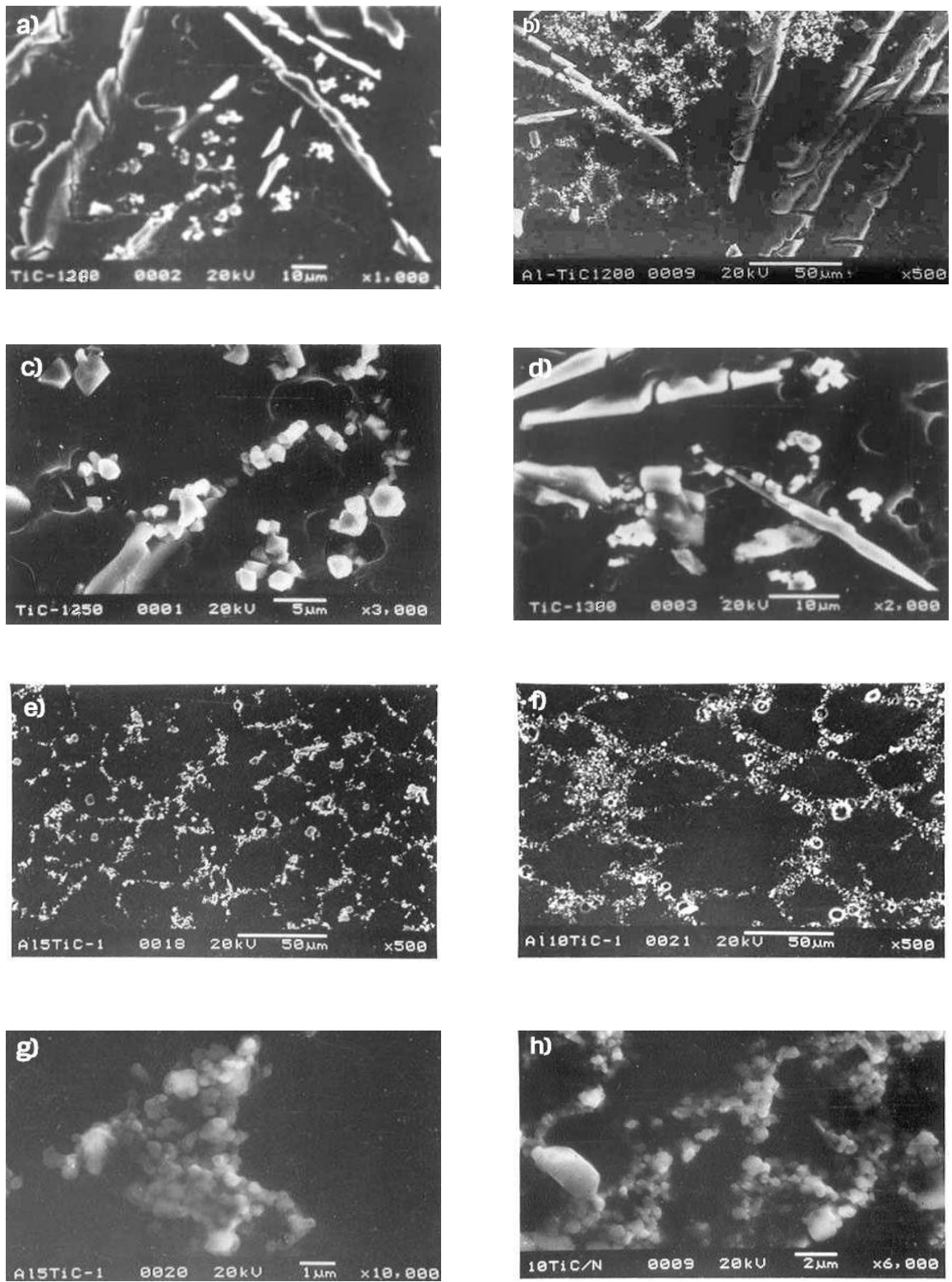
- visoka vlačna čvrstoća i granica razvlačenja
- relativno niska gustoća- 4500 kg/m<sup>3</sup>
- visoka specifična čvrstoća–postojana u područjima od -200°C do 550°C
- visoka dinamička izdržljivost – puno bolja od aluminija
- zadovoljavajuća toplinska stabilnost – čisti titanij postojan je do 315 °C, dok neke njegove legure mogu podnijeti temperature i do 600 °C
- visoka korozivna postojanost –postojan i u znatno agresivnim medijima (npr. morska voda, kiseline, kloridne otopine)
- odlična biokompatibilnost – otporan je na djelovanje tjelesnih tekućina te je zbog toga visoko primjenjiv u području medicine

- dobra otpornost na puzanje – ukoliko je legiran, može posjedovati značajno veću otpornost na puzanje od aluminijskih i njegovih legura
- relativno visok modul elastičnosti – od 100 pa do 120 GPa, ovisno radi li se o čistome ili legiranom titaniju
- zadovoljavajuća toplinska vodljivost –  $\lambda = 16,75 \text{ W/mK}$ .

Hladno oblikovanje titanija je samo po sebi vrlo ograničeno i ako se zahtijevaju veći stupnjevi deformacije, potrebna su česta međuzarenja. Na višim temperaturama oblikovljivost će biti bolja, ali se pri tome ne smije prijeći  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  zbog velikog afiniteta titanija prema kisiku, vodik, dušiku i ugljiku. Titanij je teško obradiv odvajanjem čestica (OOČ) jer je vrlo žilav i počne se lijepiti za alat pa postoji opasnost i od zapaljenja strugotine. Obično se klasificira prema sadržaju svojih  $\alpha$  i  $\beta$  faza, te su legure podijeljene u četiri grupe –  $\alpha$ -legure, približno  $\alpha$ -legure,  $(\alpha+\beta)$ -legure i  $\beta$ -legure. Sve grupe su odlično zavarljive u vakuumu ili u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (Ar, He). Njegova izrazito visoka cijena proizlazi iz njegove izrazite reaktivnosti i visoke temperature tališta ( $1670 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Proizvodni troškovi i troškovi prerade ovih legura danas su još uvijek vrlo visoki, što djelomično ograničava primjenu [32].

Praktična primjena aluminijskih kompozita ojačanih titanijevim karbidom (TiC) gotovo je ista kao i kod ostalih aluminijskih kompozita, najčešće su to automobilska i zrakoplovna industrija te svemirska industrija. Čestice TiC-a dodaju se aluminiju tijekom postupka lijevanja na isti način kao i silicijev karbid. Sadrže jedan glavni nedostatak, a to je formiranje  $\text{TiAl}_3$  spojeva tijekom postupka lijevanja koji umanjuju mehanička svojstva samog kompozita.  $\text{TiAl}_3$  spojevi iniciraju i ubrzavaju stvaranje pukotina, a utječu i na žilavost tako što je smanjuju. No, spojeva  $\text{TiAl}_3$  mogu se ukloniti raznim toplinskim obradama. Na slici 30. prikazane su mikrostrukturne promjene snimane SEM-om koje se javljaju kod ovakvih kompozita te kako se mijenjao udio nepoželjnih  $\text{TiAl}_3$  čestica u ovisnosti o vremenu i temperaturi. Slike 30.a) i b) pokazuju stanje Al-TiC kompozita nakon žarenja na temperaturi od  $1200^\circ\text{C}$ , gdje se vidi prisustvo loših  $\text{TiAl}_3$  čestica.

Iduće četiri slike, 30. c) do f), pokazuju mikrostrukturno stanje koje je nastalo podvrgavanjem kompozita na temperature od  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  u trajanju od 30-tak minuta, koje jasno ukazuju kako se povišenjem temperature i dovoljnim držanjem na toj temperaturi,  $\text{TiAl}_3$  čestice uklanjaju. Nakon uklanjanja  $\text{TiAl}_3$  čestica, slobodne TiC čestice počinju se skupljati i formirati u raznim oblicima i jednoliko raspoređivati po matrici, što mogu potvrditi slike 30. g) i h) [33].



Slika 30. Mikrostrukturno stanje Al-TiC kompozita [33]

### 3.ZAKLJUČAK

Nakon iznesenih informacija o aluminijskim kompozitnim materijalima u ovome završnom radu, može se zaključiti kako su kompoziti, općenito, visoko primjenjivi materijali zbog svoje karakteristične konstrukcije. Sastoje se od matrice i ojačala koje mogu biti različitih kombinacija. Matrica daje vanjsku formu, jednoliko raspoređuje naprezanja i štiti kompozit od štetnih vanjskih utjecaja, dok ojačalo utječe na mehanička i fizikalna svojstva – povisuje modul elastičnosti, vlačnu čvrstoću i otpornost na trošenje. Za automobilsku industriju pogodne su metalne matrice, od kojih se posebno ističu aluminijske. Zbog svoje niske gustoće, dobre žilavosti i otpornosti na koroziju, aluminijske matrice se koriste prilikom izrade blokova motora, klipova, klipnjača, disk kočnica i lančanika, a bitno smanjuju i potrošnju goriva. Ovakvi kompoziti se najčešće primjenjuju u kombinaciji s česticama silicijevog karbida (SiC) koji im povisuje tvrdoću, vlačnu čvrstoću i otpornost na trošenje, a kombinacija s titanijevim karbidom (TiC) čini ih pogodnima za konstrukcijske dijelove koji zahtijevaju visoku dinamičku izdržljivost, otpornost na puzanje i korozijsku postojanost. Primjenom aluminijskih kompozita u automobilskoj industriji zajamčena kvaliteta te zajamčena svojstva i vijek trajanja proizvoda opravdavaju njihovu relativno visoku cijenu.

## LITERATURA

- [1] Materijali II prezentacija, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1369657197-0-materijaliikompoziti2013.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliikompoziti2013.pdf), 2011/12. (3.2.2018.)
- [2] The Essential Chemical Industry, <http://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/composites.html> (3. 2. 2018.)
- [3] Product Design, <http://imeulia.blogspot.hr/2011/08/classes-and-characteristics-of.html>, (3. 2. 2018.)
- [4] Carbon Fibres, [http://www.technicaltextile.net/businessleads/ProductImages/6434\\_15\\_229.jpg](http://www.technicaltextile.net/businessleads/ProductImages/6434_15_229.jpg), (3. 2. 2018.)
- [5] Drvona, <http://www.drvona.hr/index.php?lang=hr&page=proizvodi&catID=123&productID=1423>, (3.2. 2018.)
- [6] Fibre Reinforced Plastic, <http://www.fibre-reinforced-plastic.com/2010/12/sandwich-composite-and-core-material.html> (5. 2. 2018.)
- [7] The Wright Brothers, [http://www.wright-brothers.org/Information\\_Desk/Just\\_the\\_Facts/Engines\\_&\\_Props/Wright\\_Engine\\_&\\_Props\\_images/1903-Wright-Brothers-engine-on-stand.jpg](http://www.wright-brothers.org/Information_Desk/Just_the_Facts/Engines_&_Props/Wright_Engine_&_Props_images/1903-Wright-Brothers-engine-on-stand.jpg) (5. 2. 2018.)
- [8] Chevy C60 Engine, [http://www.chevyc60.com/engine/I-6\\_250sm.gif](http://www.chevyc60.com/engine/I-6_250sm.gif) (5. 2. 2018.)
- [9] Pace Performance, <https://paceperformance.com/images/F29476176.jpg> (5. 2. 2018.)
- [10] Smithsonian National Air and Museum, <https://airandspace.si.edu/collection-objects/sputnik-1-replica> (5. 2. 2018.)
- [11] Primjena kompozita u zrakoplovnoj konstrukciji, <https://dr.nsk.hr/islandora/object/vuka%3A356/datastream/PDF/view>, 2016. (5. 2. 2018.)
- [12] Dolić, N.: Metalurgija aluminija, Metalurški fakultet u Zagrebu, 2015.
- [13] Prasad, S.V., Asthana, R.: Aluminum metal matrix composites for automotive applications: tribological considerations, 17 (3) (2004) 445–453
- [14] Ashby, M. F.: Materials selection in mechanical design, 3rd edition, Butterworth–Heinemann, Oxford, 2005.
- [15] Starke, E. A., Staley, J. T.: Application of modern aluminium alloys to aircraft, Progress in Aerospace Sciences, 32 (2–3) (1996) 131–172.
- [16] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu., FSB, 2011.
- [17] Budinski, K.G., Budinski, M. K.: Engineering materials: properties and selection, 8th ed., Pearson, 2005.

- [18] Gregson, P. J.: Aluminium alloys: physical metallurgy, processing and properties, in High performance materials in aerospace, ed. H. M. Flower, Chapman & Hall, London, 1995.
- [19] Giummarra, C., Thomas, B., J.Rioja, R.: New Aluminium Lithium Alloys For Aerospace Applications, Alcoa Center, USA, 2007.
- [20] C.A. Smith: Discontinuous Reinforcements for Metal-Matrix Composites, ASTM Handbook Vol. 21 Composites, 2001.
- [21] Dinaharan, I., Nelson, R., Vijay, S.J., Akinlabi, E.T.: Microstructure and wear characterization of aluminium matrix composites reinforced with industrial waste fly ash particulates synthesized by friction stir processing. Material characterization Vol. 118, pp. 149 – 158, 2016.
- [22] Bisane, V. P., Sable, Y. S., Dhobe, M. M., Sonawane, P. M.: Recent development and challenges in processing of ceramics reinforced Al matrix composite through stir casting process – a review, International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS) 2 (10) 2015 11-16.
- [23] K.U. Kainer: Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering, 2006.
- [24] Aluminum Matrix Composites in Automotive Applications, <https://vdocuments.site/aluminium-matrix-composites-in-automotive-applications.html> (13.2.2018.)
- [25] Dunia Abdul Saheb: Aluminum silicon carbide and aluminum graphite particulate composites, ARPN J. Eng. Appl. Sci. 6 (2011) 41-46.
- [26] Habibur Rahman, Md., Mamun Al Rashed, H. M.: Characterization of silicon carbide reinforced aluminum matrix Composites, Procedia Engineering, 90 (2014) 103-109.
- [27] Alibaba, [https://www.alibaba.com/product-detail/Small-aluminum-electric-resistance-melting-furnace\\_60452939716.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Small-aluminum-electric-resistance-melting-furnace_60452939716.html) (16. 2. 2018.)
- [28] Tvrdoća, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a> (16. 2. 2018.)
- [29] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Ispitivanje%20tvrdoce.pdf>.
- [30] Veeresh Kumar, G. B., Rao, C. S. P., Selvaraj, N.: Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites - a review, J. Miner. Mater. Charac. Eng. 10 (2011) 59-91
- [31] Habibur Rahman, Md., Mamun Al Rashed, H. M.: Characterization of silicon carbide reinforced aluminum matrix Composites, Procedia Engineering, 90 (2014) 103-109.



- [32] Posebni metalni materijali, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1476191917-0-predavanjapmmak\\_god\\_2016\\_17.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1476191917-0-predavanjapmmak_god_2016_17.pdf), 2016/17.(16.2.2018.)
- [38] Rai, R.N., Saha S.C., Datta, G.L., Chakraborty, M.: Studies on synthesis of in-situ Al-TiC metal matrix composites, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 117 (2016) 012042

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija