

# Keramički kompozitni materijali u suvremenoj automobilskoj industriji

---

**Dolenčić, Filip**

**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:235:823587>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-31**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Filip Dolenčić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Irena Žmak, dipl. ing.

Student:

Filip Dolenčić

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Ireni Žmak na ukazanom povjerenju, susretljivosti i pomoći oko izrade ovog završnog rada. Također, zahvaljujem Luki Bukovcu i svim kolegama studentima na pruženoj pomoći tijekom studiranja.

Konačno, zahvaljujem obitelji na potpori koju su mi pružili tijekom studiranja.

Filip Dolenčić



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: **Filip Dolenčić**

Mat. br.: 0035197079

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Keramički kompozitni materijali u suvremenoj automobilskoj industriji**

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

Opis zadatka:

Keramički kompozitni materijali oblikovani po mjeri specifičnih radnih uvjeta posjeduju izvrsnu postojanost na vrlo visoke temperature, na nagle promjene temperature i izvrsnu otpornost na trošenje. Jedan od današnjih trendova razvoja u automobilskoj industriji je smanjenje mase i dimenzija motora s ciljem smanjenja potrošnje goriva, a bez da se pritom smanjuje snaga motora.

U okviru završnog rada potrebno je:

1. istražiti trendove razvoja u automobilskoj industriji i područja razvoja materijala sa značajnijim napretkom
2. prikazati područja primjene keramičkih kompozita u automobilskoj industriji
3. opisati vrste ojačala keramičkih kompozita koje se uspješno primjenjuju
4. dati pregled poboljšanja mehaničkih, toplinskih i triboloških svojstava keramičkih kompozita u odnosu na ekvivalentne automobilske dijelove izrađene od metalnih materijala
5. opisati suvremene tehnologije izrade keramičkih kompozita za automobilsku industriju.

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

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITI .....	4
2.1. POJAM KOMPOZITNIH MATERIJALA.....	4
2.2. Podjela kompozitnih materijala .....	6
2.2.1. Oblik ojačala: [3] .....	6
2.2.2. Materijal matrice .....	12
3. KERAMIČKI KOMPOZITNI MATERIJALI U SUVREMENOJ AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI.....	24
3.1. Primjena keramičko-kompozitnih materijala u automobilske industriji .....	24
4. POSTUPCI PROIZVODNJE KOMPOZITA S KERAMIČKOM MATRICOM.....	40
4.1. CVD (Chemical Vapour Deposition).....	40
4.2. USMJERENA OKSIDACIJA METALA .....	41
4.3. PROIZVODNJA SIC/SIC KOMPOZITA IMPREGNACIJOM POLIMERA I PIROLIZOM.....	42
4.4. CVI (Chemical Vapour Infiltration) .....	44
5. ZAKLJUČAK.....	46

## POPIS SLIKA

Slika 1.1	Trabant [19].....	2
Slika 1.2	Kočioni diskovi izrađeni od CMC-a [5] .....	3
Slika 2.1	Razne varijacije konstituenata o kojima ovise svojstva kompozita [3] .....	5
Slika 2.2	Usporedba kompozita ovisno o vrsti ojačala: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [16].....	6
Slika 2.3	Abrazivne ploče od kompozita ojačanog česticama [18].....	7
Slika 2.4	Viskeri [3] .....	7
Slika 2.5	Ojačanja automobilske gume [17] .....	8
Slika 2.6	Legura Ag-Cu ojačana ugljičnim vlaknima [3] .....	8
Slika 2.7	Dijagram naprezanje-istezanje vlaknima ojačanog kompozita [3] .....	9
Slika 2.8	Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala [3] .....	9
Slika 2.9	Usmjerenost vlakana [3] .....	10
Slika 2.10	Dijagram naprezanje-istezanje pojedinih vrsta vlakana [3].....	10
Slika 2.11	Paneli vrata plastomerne matrice ojačane ugljikovim vlaknima[1].....	12
Slika 2.12	Lisnata opruga za Mercedes Sprinter izrađena od polimernog kompozita [1] .....	13
Slika 2.13	Sjedala iz <i>Opel Insignije OPC</i> [1].....	13
Slika 2.14	Klipnjača s Al matricom ojačana $Al_2O_3$ česticama[3].....	17
Slika 2.15	Ventili s Ti matricom ojačani SiC česticama[3] .....	17
Slika 2.16	Aluminij SiC-grafit kompozit za automobilske kočnice[4].....	17
Slika 2.17	Napredovanje napukline [9].....	18
Slika 2.18	CMC sa SiC matricom ojačanom s kontinuiranim SiC vlaknima [7].....	21
Slika 2.19	Mikrostruktura kompozita sa $SiN_4$ matricom ojačanom SiC viskerima [7] .....	22
Slika 2.20	Proizvodnja ugljičnih vlakana [7] .....	23
Slika 3.1	Ventili u automobilskom motoru[5] .....	25
Slika 3.2	Prodaja vozila Chevrolet u ovisnosti o broju cilindara u motoru [11].....	27
Slika 3.3	Konstrukcija turbopunjača [8] .....	28
Slika 3.4	Shematski prikaz motora s turbopunjačem [8] .....	29
Slika 3.5	Nissanov turbopunjač od silicij nitrida [12].....	30
Slika 3.6	Usporedba brzine vrtnje za rotore na bazi keramike i metala [12] .....	30

---

Slika 3.7 Komponente keramičke plinske turbine od keramičkog kompozitnog materijala [13]	32
.....	32
Slika 3.8 Čvrstoća u ovisnosti o brzini udara čestica [13] .....	33
Slika 3.9 Dijagram puzanja monolitne keramike i keramičkog kompozita [13] .....	34
Slika 3.10 Dijagram naprezanje-istezanje monolitika keramike i CMC-a. [7].....	35
Slika 3.11 Ispitivanje kočionih diskova [5].....	36
Slika 3.12 Samoventilirajući keramičko kompozitni disk (PCCB).....	37
Slika 3.13 Odnos mase keramičkog kompozitnog kočionog diska i mase diska od sivog lijeva [5] .....	38
Slika 3.14 Porsche keramička kompozitna spojka (PCCC) [10] .....	39
Slika 4.1 CVD postupak [7] .....	40
Slika 4.2 Postupak usmjerene oksidacije metala [15] .....	41
Slika 4.3 Postupak impregnacije polimera i pirolize [15].....	42
Slika 4.4 Postupak CVI (Chemical Vapour Infiltration) [15] .....	44



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Orijentacijske vrijednosti svojstava nekih vrsta vlakana [4].....	11
Tablica 2. Orijentacijske vrijednosti svojstava SiC matrice ojačane SiC vlaknima[3].....	20
Tablica 3. Postupak proizvodnje ugljik-ugljik kompozita postupkom impregnacije [7].....	23

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A$	%	istezljivost
$d$	mm	promjer
$E$	GPa	modul elastičnosti
$R_m$	MPa	vlačna čvrstoća
$v$	m/s	brzina
$\alpha$	1/K	koeficijent toplinskog istezanja
$\varepsilon$	mm/mm	istezanje
$\lambda$	W/mK	koeficijent toplinske vodljivosti
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$\sigma$	MPa	naprezanje

## SAŽETAK

Kompozitni materijali danas su postali neizostavan dio suvremenog inženjerstva materijala, izrađeni su po mjeri da prate svojstva koja odgovaraju specifičnim radnim uvjetima te sve više dobivaju na značaju, razvoju i upotrebi naspram tradicionalnih konvencionalnih konstrukcijskih materijala.

Uz malu masu, dobra mehanička svojstva, antikorozivnost, postojanost na visokim temperaturama jedna od prednosti kompozitnih materijala je i jednostavno održavanje i samim time dulji vijek trajanja.

Kompozitni materijali primjenu pronalaze u brodogradnji, zrakoplovnoj i automobilske industriji te u novije vrijeme u sportovima kao što su „Formula 1“, biciklizam, streličarstvo i drugi.

Ovim radom prikazana je upotreba kompozita u automobilske industriji, pregled kompozita ovisno o vrsti materijala matrice i ojačala, uvod u „CMC“ (engl. *Ceramic Matrix Composites*), pregled mehaničkih, toplinskih i triboloških svojstava keramičkih kompozita u odnosu na ekvivalentne automobilske dijelove izrađene od metalnih ili keramičkih materijala te suvremene tehnologije za izradu keramičkih kompozita za automobilske industriju.

Ključne riječi: kompoziti, keramički kompozitni materijali, automobilska industrija

## **SUMMARY**

Composite materials have become an inevitable part of modern materials engineering, they are built to meet the specific requirements of specific working conditions, and they increasingly gain on importance, development and usage compared to conventional construction materials.

Along with low mass, good mechanical properties, anti-corrosion and high temperature stability, one of the benefits of composite materials is simple maintenance and therefore longer life span.

Composite materials are found in naval architecture, aerospace and automotive industries, and in recent times in sports such as "Formula 1", cycling, archery and others.

This thesis shows the use of composites in the automotive industry, an overview of the same depending on the type of matrix material and reinforcement, introduction to "CMC" (Ceramic Matrix Composites), a review of mechanical, thermal and tribological properties of ceramic composites in comparison to equivalent automotive parts made of metal or ceramic materials and modern technology for making ceramic composites for the automotive industry.

Key words: Composite Materials, Automotive Industry, CMC

## 1. UVOD

Unazad nekoliko desetljeća kompoziti ili kompozitni materijali sve više dobivaju na značaju, razvoju i upotrebi naspram konvencionalnih materijala zbog potrebe za lakim i visokočvrstim konstrukcijama.

Nastali spajanjem dva različita materijala, omogućavaju dobivanje željenih svojstava kakve ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe, izradu vrlo složenih oblika otpornih na koroziju te isto tako dimenzijski postojanih materijala u radu s ekstremno visokim temperaturama.

Automobilska industrija jedna je od najvažnijih industrijskih grana u svijetu po prihodu i broju zaposlenih.

Kompoziti se u automobilskoj industriji upotrebljavaju još od 1950-ih.

Već su tada bile jasne prednosti takve proizvodnje automobilskih dijelova: mala masa, sniženje troškova ujedinjavanjem dijelova, zadovoljavajuća mehanička svojstva, antikorozivnost, postojanost na visokim temperaturama itd.[2]

Prednosti su tijekom godina prevagnule nad nedostacima kao što su viša cijena potrebnih sastojaka, izbjegavanje novih materijala te poteškoće u velikoserijskoj proizvodnji.[2]

Za proizvodnju velikih serija automobilskih dijelova danas se rabi injekcijsko i izravno prešanje te slaganje preprega za skupe dijelove koji se proizvode u manjim serijama. [2]

U posljednjih 50 godina znatno je porasla upotreba kompozita u automobilskoj industriji, sukladno poboljšanju njihovih svojstava.[2]

Zbog svoje male mase koja znači manju potrošnju goriva te nižih investicijskih troškova koji olakšavaju prelazak na ovakvu proizvodnju, kompoziti su vrlo perspektivna vrsta materijala u automobilskoj industriji.[2]

Polimerni kompoziti pojavili su se u automobilima ubrzo nakon završetka Drugoga svjetskog rata, upotreba im je u početku bila ograničena na male i sporedne komponente. [2]

U Istočnoj Njemačkoj se 1950-ih počeo proizvoditi *Trabant* (slika 1.1), koji predstavlja početak upotrebe biljnih vlakana jer mu je šasija bila napravljena od pamučnih vlakana u poliesterskoj matrici.[2]

Proizvedena su tri milijuna primjeraka te je stoga najpoznatiji povijesni automobil napravljen od polimernog kompozita. [1]



**Slika 1.1 Trabant [19]**

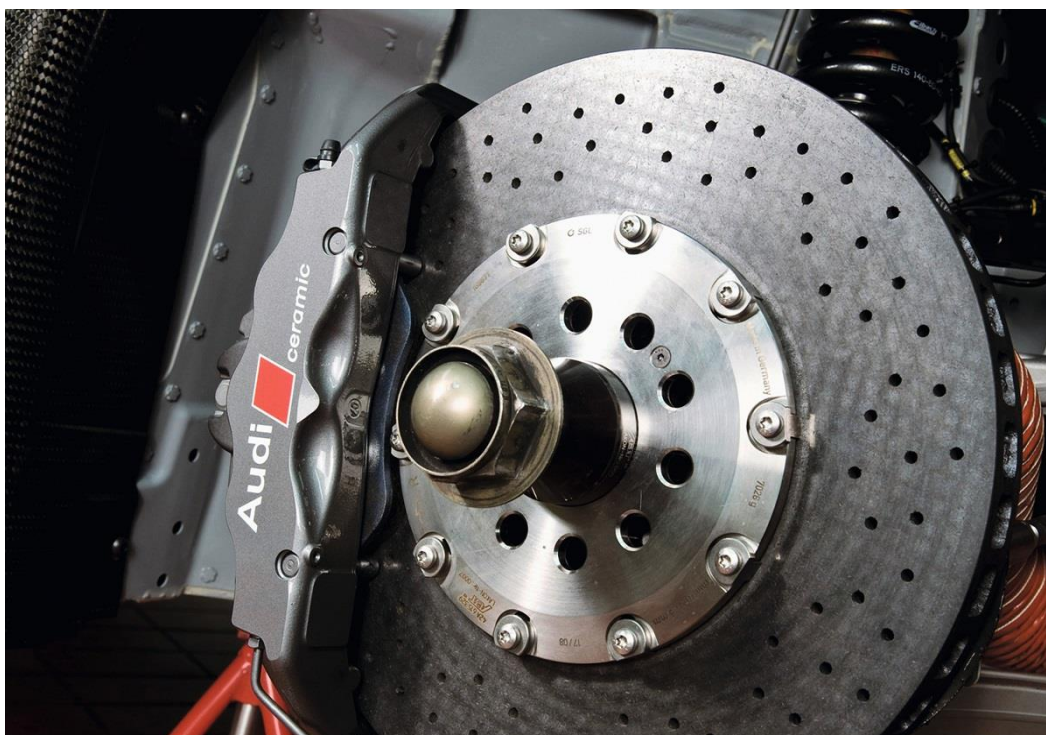
U kasnim 1970-ima zbog potrebe za manjom masom automobila razvijene su mnoge nove primjene kompozitnih materijala te je upotreba znatno povećana. [1]

Kompoziti, koji su do tada uglavnom izgrađivali estetske dijelove, počeli su se ozbiljno razmatrati kao materijal za strukturne komponente.

Potaknuti visokim cijenama goriva, ali i napretkom na području električne energije koja je vezana uz automobile, inženjeri ulažu velik napor kako bi razvoj automobila usmjerili prema trendu u kojem novi automobili moraju biti što lakši, no ujedno zadržati visoku razinu sigurnosti. Primjenom inovativnih materijala dolazi do razvoja projekata u kojima se glavna riječ vodi oko smanjenja mase vozila, uz istodobno pružanje pune slobode konstruktorima u razvoju vozila, njegovih performansa te estetskog izgleda.[1]

Nove lagane komponente koje čine kompozitne materijale hit su među proizvođačima vozila, posebice u segmentu luksuznih automobila, pri čemu jamče potpunu sigurnost unatoč sve jačem trendu smanjenja mase vozila.[1]

Stoga danas kompozite možemo naći i u vidu dijelova prijenosa, lisnatih opruga, kotača, kočionih diskova (slika 1.2), zakretnih lopatica turbopunjača, ventila, košuljica cilindara, obloga katalizatora, filtara čestica, svjećica, senzora i još mnogo drugih.



**Slika 1.2 Koćioni diskovi izrađeni od CMC-a [5]**

Danas su rijetki dijelovi automobila koji nisu napravljeni od kompozitnih materijala. Naglasak se stavlja u prvom redu na profit, ali i na zaštitu okoliša, tj. ekologiju.

Današnji doprinos kompozitnih materijala automobilskim tehnologijama prostire se od performansa u vožnji, pročišćavanju ispušnih plinova, poboljšanju efikasnosti goriva pa sve do samog estetskog izgleda određenih dijelova napravljenih od kompozita te samim time čine nezaobilazan dio suvremene automobilske industrije.

## 2. KOMPOZITI

### 2.1. POJAM KOMPOZITNIH MATERIJALA

**Kompozitni materijali** ili **kompoziti** su proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s jasnom granicom između njih. Posljedica je dobivanje materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe.[3]

Neke od općih prednosti kompozitnih materijala pred konvencionalnim materijalima jesu sljedeće [3]:

- mogućnost izrade vrlo složenih oblika
- smanjenje troškova naknadne obrade dijelova
- mogućnost spajanja dijelova tijekom samog postupka proizvodnje
- dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima
- otpornost na koroziju
- dizajniranje svojstva.

Kompozitni materijali se sastoje od dva osnovna konstituenta:

- matrice
- ojačala.

Zadaća ojačala je da budu nosivi element kompozita, tj. da osiguraju [3]:

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

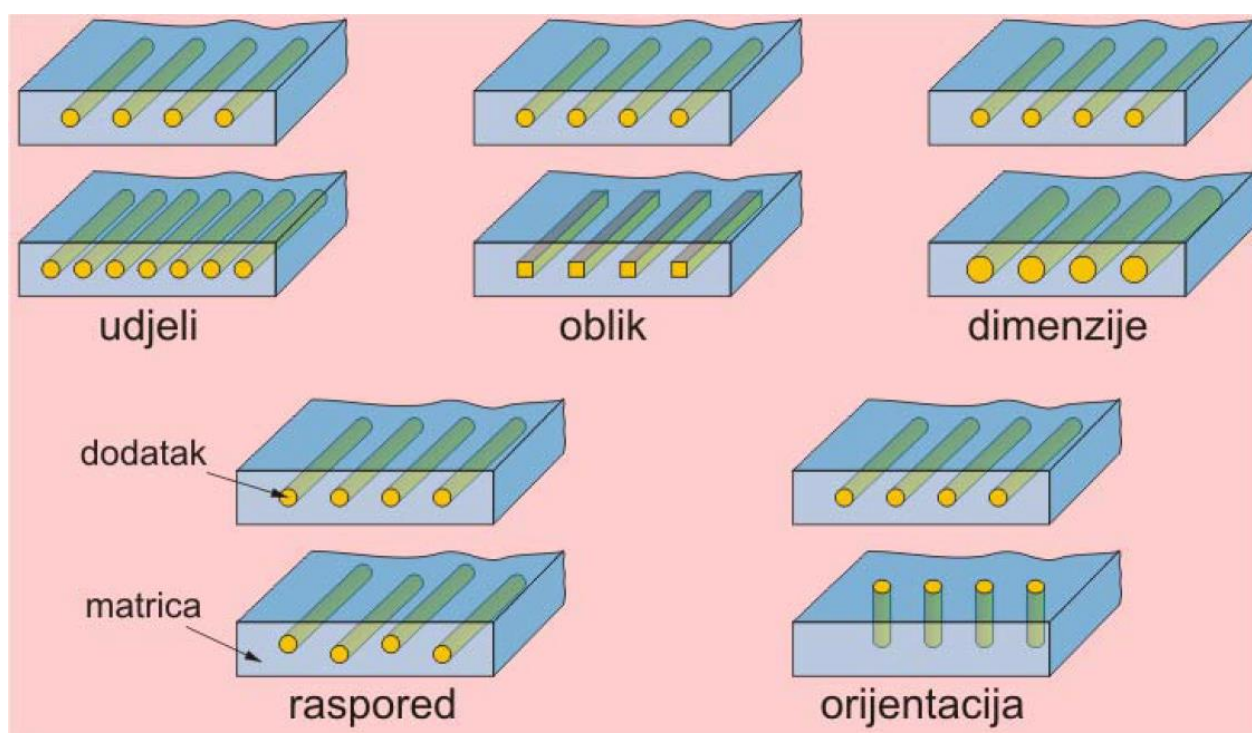
Zadaće matrica je da [3]:

- drži ojačala zajedno
- štiti ih od vanjskih utjecaja
- ima važnu funkciju u prijenosu opterećenja na ojačalo
- daje vanjsku formu kompozitu
- određuje njegovo ponašanje u obzirom na djelovanje atmosfere.



Svojstva kompozita ovisit će o [3]:

- svojstvima konstituenata, tj. matrice i ojačala
- veličini i raspodjeli konstituenata
- volumnom udjelu konstituenata
- obliku konstituenata
- prirodi i jakosti veza između konstituenata, slika 2.1.



Slika 2.1 Razne varijacije konstituenata o kojima ovise svojstva kompozita [3]

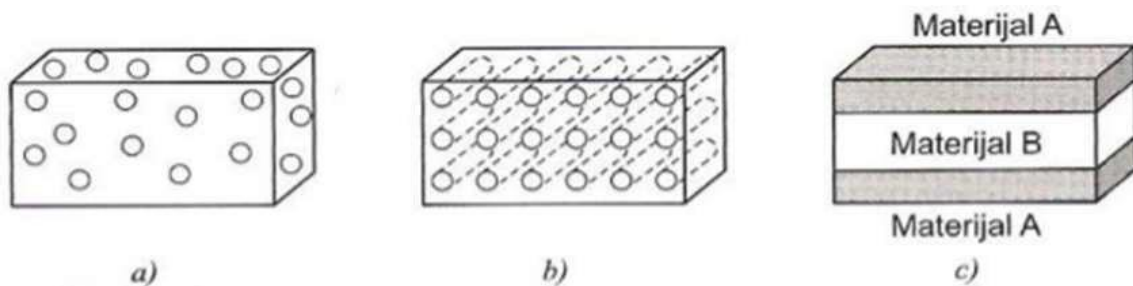
## 2.2. Podjela kompozitnih materijala

Podjela kompozita najčešća je obzirom na:

- oblik ojačala
- materijal matrice.

### 2.2.1. Oblik ojačala: [3]

- česticama ojačani: velike čestice, disperzijom ojačani
- vlaknima ojačani: viskeri, vlakna, žice
- strukturni: laminati i sendvič konstrukcije, slika 2.2.



Slika 2.2 Usporedba kompozita ovisno o vrsti ojačala: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [16]

- **kompoziti ojačani česticama** ovise o obliku i veličini čestica [3]:
  - 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  $10\mu\text{m}$ .  
Njihova svojstva ovise o veličini čestica, volumnom udjelu i razmaku između čestica, a povećanjem temperature opada im čvrstoća.
  - kompoziti s velikim česticama sadrže čestice koje su izuzetno male i čiji promjer varira između 10 i 250 nm.  
Svojstva im ovise o samom rasporedu i raspršenosti čestica.  
Nalaze primjenu kod proizvoda kod kojih se ne traži posebno izražena čvrstoća (npr. abrazivne ploče, slika 2.3).



**Slika 2.3** Abrazivne ploče od kompozita ojačanog česticama [18]

- **vlaknima ojačani kompoziti** [3]:

dolazi do povećanja čvrstoće, žilavosti, krutosti te povećanja omjera čvrstoća/gustoća uslijed ugradnje čvrstih, krutih i krhkih vlakana u mekaniju, duktilniju matricu.

Materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna te osigurava duktilnost i žilavost, budući da vlakna nose veći dio opterećenja, slika 2.7.

Dva značajna svojstva vlakana su visoka toplinska stabilnost i kontrolirana rastezljivost pri povišenim temperaturama.

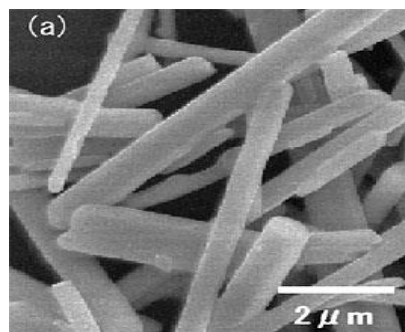
Osnovna podjela je na :

- viskere
- žice
- vlakna.

*Viskери* su sićušni monokristali koji imaju ekstremno veliki omjer „duljina/promjer“, slika 2.4.

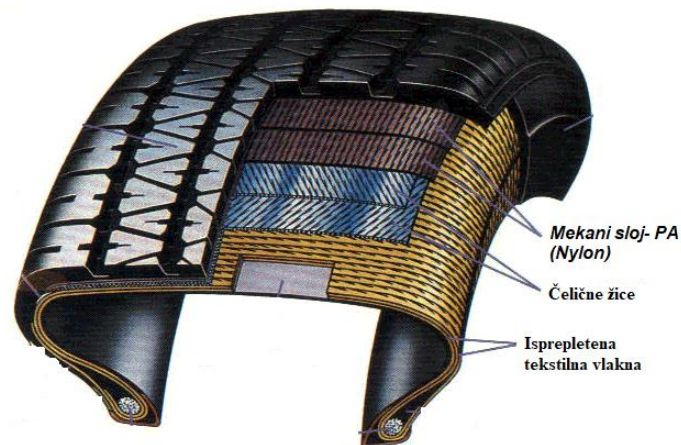
Posljedica malih dimenzija je veliki udio pravilne kristalne građe, pa gotovo nema mogućnosti tečenja što dovodi do izuzetno visoke čvrstoće. [3]

Ne primjenjuju se često zbog visoke cijene i vrlo ih je teško ugraditi u matricu.[3]



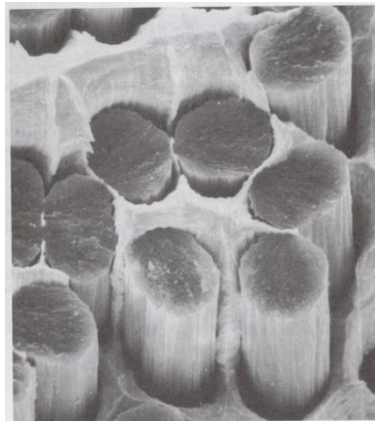
**Slika 2.4** Viskeri [3]

Žice su relativno velikog promjera, tipični materijali su čelik, molibden i volfram. Primjenjuju se pri radijalnom čeličnom ojačavanju (armiranju) automobilskih guma, slika 2.5, pri namotavanju čahura/košuljica, te kod žicama omotanih visokotlačnih cijevi.[3]



**Slika 2.5 Ojačanja automobilske gume [17]**

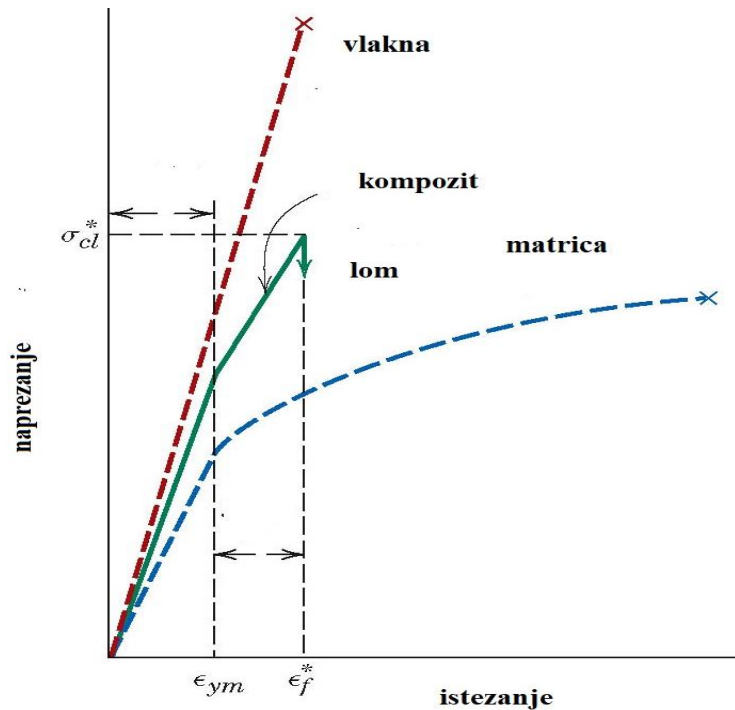
Vlakna su ili polikristalna ili amorfna te imaju mali promjer. Materijali vlakana mogu biti polimerni ili keramički aramid, staklo, ugljik, slika 2.6, bor, aluminij-oksidi i silicij-karbid.[3]



**Slika 2.6 Legura Ag-Cu ojačana ugljičnim vlaknima [3]**

Vlakna se razlikuju prema [3]:

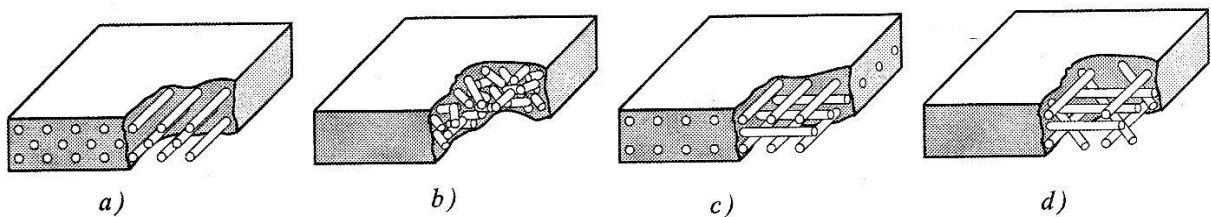
- vrsti
- duljini
- promjeru
- orijentaciji.



Slika 2.7 Dijagram naprezanje-istezanje vlaknima ojačanog kompozita [3]

Karakteristike kompozita ojačanog vlaknima ovise o [3]:

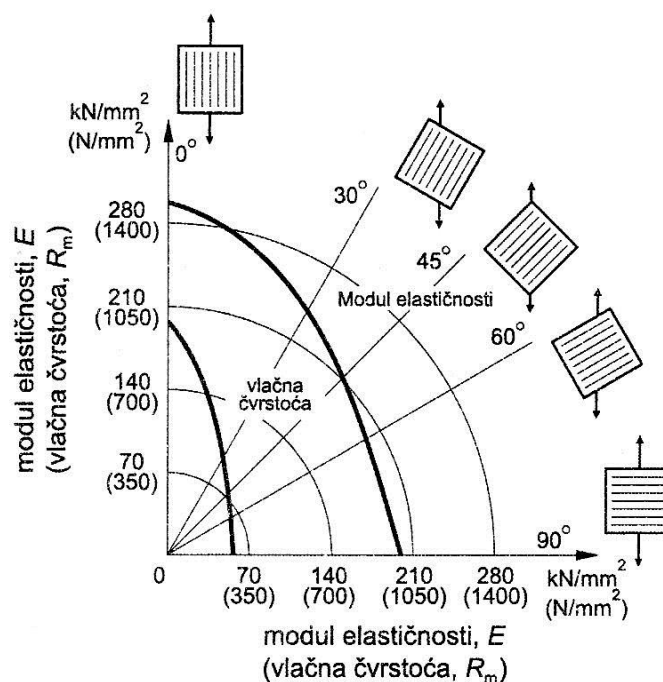
- omjeru duljina/promjer vlakana
- volumnom udjelu vlakana
- usmjerenosti (rasporedu) vlakana
- svojstvima vlakana
- svojstvima matrice.



Slika 2.8 Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala [3]

Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala na slici 2.8 [3]:

- kontinuirana jednosmjerna vlakna
- slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna
- ortogonalno raspoređena vlakna
- višesmjerno usmjerena vlakna



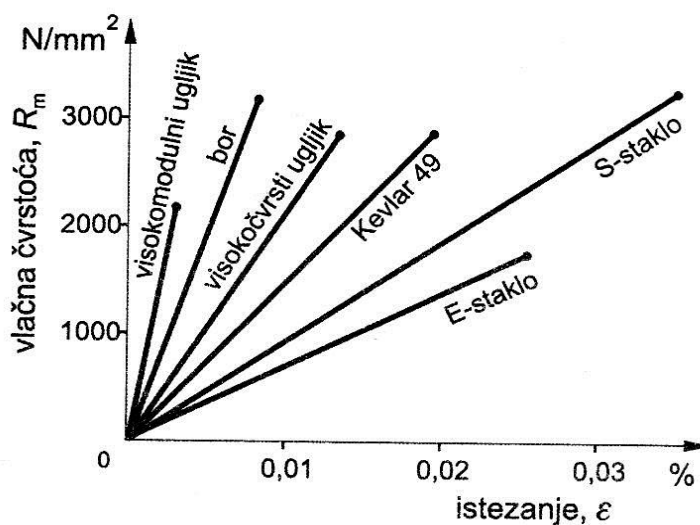
Slika 2.9 Usmjerenost vlakana [3]

Vlakna jednakog smjera imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima (slika 2.9). [3]

Stavljanjem vlakana pod nekim kutom u odnosu na opterećenje smanjit će se čvrstoća, ali će se postići jednoličnija svojstva samog kompozita. [3]

Vlakna trebaju biti čvrsta, kruta, lagana, a također trebaju imati visoko talište.

Materijali vlakana moraju imati visoki modul elastičnosti, slika 2.10. [3]



Slika 2.10 Dijagram naprezanje-istezanje pojedinih vrsta vlakana [3]

**Tablica 1. Orijentacijske vrijednosti svojstava nekih vrsta vlakana [4]**

vrsta vlakana	cijena kn/kg	$R_m$ MPa	$E$ GPa	$A$ %	$d$ $\mu\text{m}$	$\rho$ $\text{kg/m}^3$
staklena	15...19	3400...4800	70...85	3...5	3...13	2400...2500
aramidna	190...230	2400...3150	59...146	2	12	1400...1470
ugljična	38...190	3100...4300	235...290	0,5...1,9	5...10	1740...1820
borna	<2600	3000...4000	370...440	0,4	50...140	2400...2600
SiC	1900...10000	1200...3000	130...400	0,6...1,5	10...15	2300...3000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1900...3800	1400...2000	150...470	0,8	10...20	2700...3900

Vlakna za ojačavanje dijele se prema kemijskom sastavu, strukturi i uporabi, tablica 1.

Kod polimernih kompozita primarna funkcija vlakana je povećanje čvrstoće i krutosti.

U keramičkih kompozita primarna funkcija vlakana je olakšati rad pri visokim temperaturama, osigurati dobru lomnu žilavost i spriječiti pojavu krhkog loma.

Kod metalnih kompozita važno je osigurati rad pri visokim temperaturama da ne dođe do žilavog loma.

### 2.2.2. Materijal matrice

➤ *Polimerni kompoziti (Polymer Matrix Composites-PMC)*

PMC spadaju među najstarije kompozite, međutim i dalje se unapređuju njihova svojstva i proširuje polje primjene.

Od ovih kompozita izrađuju se konstrukcije koje moraju biti čvrste, krute, lagane i korozijski postojane te su pretežno zamjena za Al i Mg-legure, ali iza druge metalne materijale.

Cilj ojačavanja je povišenje čvrstoće i krutosti (modula elastičnosti). [1]

Najviše vrijednosti čvrstoće i modula elastičnosti postižu se ojačavanjem vlaknima. Specifična čvrstoća (odnos čvrstoće i gustoće) i specifična krutost (odnos modula elastičnosti i gustoće) ovih materijala su znatno viši od metalnih materijala. [1]

Polimeri se ojačavaju prirodnim vlaknima (lan, juta, kudjelja i sl.) radi bolje recikličnosti i manje opasne proizvodnje u odnosu na ojačavanje staklenim vlaknima. [2]

Prednosti polimernih kompozita su dobra žilavost, dobra obradljivost, izuzetna korozijska otpornost, visoki omjer čvrstoća/masa, dok od nedostataka možemo primijetiti nisku čvrstoću i pad mehaničkih svojstava pri visokim temperaturama. [1]

Uz dobra mehanička svojstva polimerni kompoziti se mogu naći u skupocjenim automobilima kao paneli vrata, slika 2.11 ili dijelovi armaturnih ploča gdje inženjeri imaju na raspolaganju i ugljikovim vlaknima ojačane matrice koje uz iznimno malu masu nude i egzotičan izgled, što je zapravo najčešći razlog proizvodnje takvih materijala. [1]



**Slika 2.11 Paneli vrata plastomerne matrice ojačane ugljikovim vlaknima[1]**



Polimerni kompoziti su našli primjenu u oprugama gdje bolje apsorbiraju vibracije te proizvode manje zvukova pri savijanju. [1]

Trajnost im je pet puta dulja nego čelične opruge, a masa je također smanjena pet puta.

Slika 2.12 prikazuje lisnata oprugu za *Mercedes Sprinter*. [1]



**Slika 2.12 Lisnata opruga za Mercedes Sprinter izrađena od polimernog kompozita [1]**

Za primjer imamo i školjku sjedala *Opel Insignije OPC* (slika 2.13), koja je načinjena od kompozita ojačanog vlaknima: sastoji se od poliamida ojačanog staklenim vlaknima, čime je postignuta 45 % manja masa nego kod modela s običnim sjedalima. [1]

Kompozit je veoma čvrst, a debljina stijenke je samo 2 mm. [1]



**Slika 2.13 Sjedala iz Opel Insignije OPC [1]**

Postupci proizvodnje polimernih kompozita [7]:

- oblikovanje naštrcavanjem
- ručno polaganje
- pultrudiranje
- RTM (engl. *Resin Transfer Moulding*)
- namatanje (engl. *Filament Winding*)
- prepreg.

➤ *Metalni kompoziti (engl. Metal Matrix Composites-MMC)*

Kompoziti s metalnom matricom zanimljivo su područje istraživanja, zato što su sposobni osigurati više uporabne temperaturne granice od njihovih osnovnih metala i mogu se oblikovati tako da se dobije povećana čvrstoća, krutost, toplinska vodljivost, abrazijska otpornost, otpornost puzanju i dimenzijska stabilnost. [6]

U MMC-u kontinuirana ili matrična faza je općenito legura, rjeđe čisti metal, a ojačalo se sastoji od visokovrijednih ugljičnih, metalnih ili keramičkih dodataka. Tijekom proizvodnje kompozita miješaju se zajedno matrica i ojačalo. Nasuprot polimernim kompozitima oni su nezapaljivi, ne otplinjavaju u vakuumu i minimalno su osjetljivi na organske tekućine kao što su goriva i otapala. [6]

Ojačala, kontinuirana ili diskontinuirana, mogu činiti 10 do 60 vol.% kompozita. [6]

Kontinuirano vlakno ili vlaknasta ojačala uključuju ugljik (C), silicijev karbid (SiC), bor, aluminijski oksid ( $Al_2O_3$ ) i metale visokog tališta. [6]

Diskontinuirana ojačala sastoje se uglavnom od SiC u obliku viskera (w), čestica (p) SiC,  $Al_2O_3$  ili titanijevog diborida ( $TiB_2$ ) i kratkih ili nasjeckanih vlakana  $Al_2O_3$  ili ugljika. [6]

Osnovni nedostaci MMC su relativno visoka gustoća, složenost proizvodnje koja traži visoke temperature te loša recikličnost. [4]

Stoga su matrice najviše od Al, Ti i Mg-legura, ali i Cu i superlegura za više radne temperature. [3]

Procesi proizvodnje MMC-a dijele se u primarne i sekundarne grupe. [6]

Primarni proces je postupak kojim se sintetiziraju kompoziti od osnovnih materijala, matrice i ojačala. [6]

Sekundarni proces se sastoji od svih dodatnih stupnjeva potrebnih za preradu primarnog kompozita u konačni dio. [6]

U nekim slučajevima oba stupnja odvijaju se istodobno, ovisno o željenom konačnom proizvodu i postupcima proizvodnje korištenim u procesu. [6]

Postupci u čvrstom stanju (engl. *Solid State Processing*) odvijaju se kod niže temperature s mogućnošću bolje kontrole termodinamike i kinetike graničnih površina. [6]

Neki od postupaka proizvodnje MMC-a u čvrstom stanju su: [7]

- difuzijsko spajanje
- visokotemperaturna sinteza toplim prešanjem
- metalurgija praha.

Postupci u tekućem stanju (engl. *Liquid Processing*) koriste se za što bolje povezivanje matrice i vlakana. Poželjno je da taljevina iz matrice teče u međuprostore nerazvrstanog vlakna da bi se osiguralo potpuno pokrivanje vlakana. [6]

Neki od postupaka proizvodnje MMC-a u tekćem stanju su: [7]

- lijevanje miješanjem
- lijevanje u poluskrućenom stanju
- oblikovanje u poluskrućenom stanju
- infiltracija:
  - spontana infiltracija
  - prisilna infiltracija
  - infiltracija pod tlakom
  - vakuumska infiltracija
  - infiltracija mehaničkim pritiskom
  - centrifugalna infiltracija
  - ultrazvučna infiltracija.
- tlačno precizno lijevanje
- brzo skrućivanje
- oblikovanje naštrcavanjem.

Jedan od primjera gdje se koristi MMC u automobilskoj industriji je klipnjača (slika 2.14) napravljena od Al-legure ojačane s  $Al_2O_3$  česticama. [3]

Ona ima puno bolja mehanička svojstva i otpornost na umor od čelične klipnjače, a uz sve to ima i 42 % manju masu.[7]



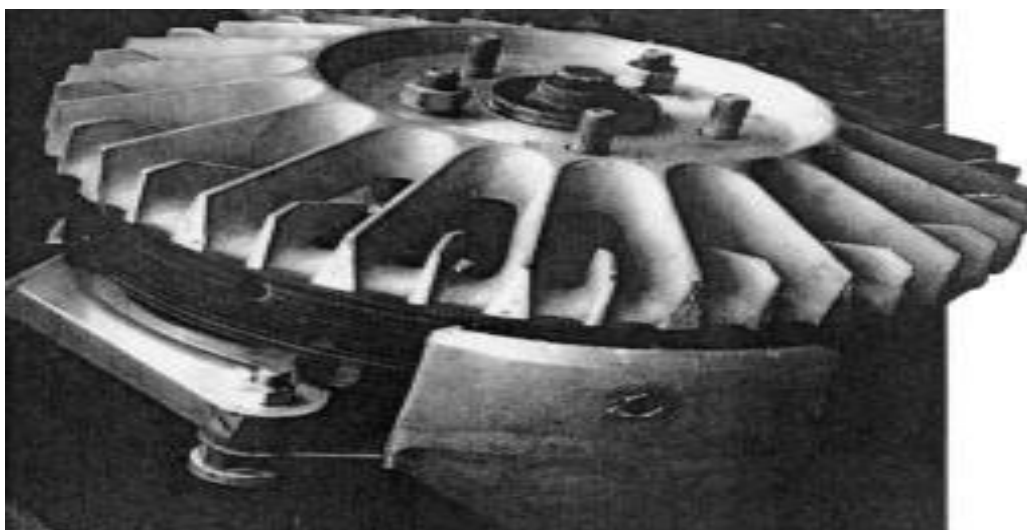
**Slika 2.14 Klipnjača s Al matricom ojačana  $\text{Al}_2\text{O}_3$  česticama[3]**

Ventili (slika 2.15) automobilskog motora napravljeni od kompozita s Ti-matricom koja je ojačana SiC česticama.[3]



**Slika 2.15 Ventili s Ti matricom ojačani SiC česticama[3]**

Još jedan od primjera primjene MMC je Al-SiC-Ni-grafit za dijelove automobilskih kočnica (slika 2.16) kao zamjena za sivi lijev.[4]



**Slika 2.16 Aluminij SiC-grafit kompozit za automobilske kočnice[4]**

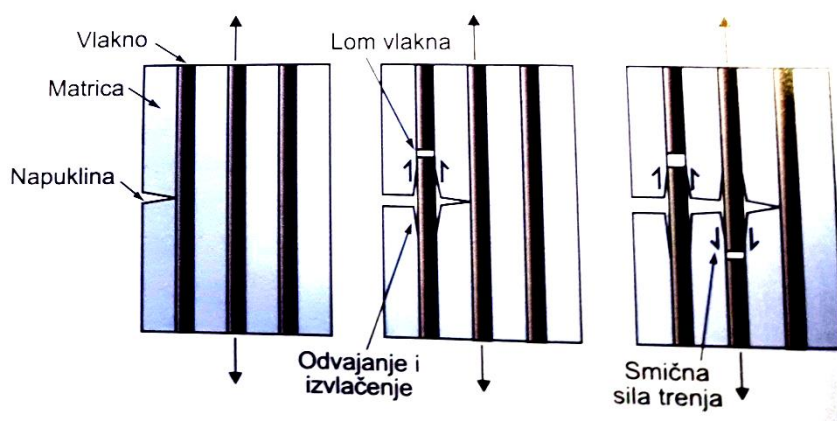
➤ *Keramički kompoziti (engl. Ceramic Matrix Composites-CMC)*

Keramike su poznate kao vrlo tvrdi i kruti materijali, otporni na puzanje pri vrlo visokim temperaturama i postojani prema nizu agresivnih medija.

Skлонost krhkosti keramike nastoji se smanjiti razvojem suvremenih keramičkih kompozita.

Ugradnjom vlakana, čestica ili viskera jednog keramičkog materijala u matricu druge vrste keramike, lomna žilavost se može povećati i do deset puta. [9]

To se postiže međudjelovanjem propagirajuće napukline i ojačala pri čemu ojačala otežavaju ili sprječavaju napredovanje napukline kod keramičkih kompozita, ali i drugih vlaknatih kompozita, a temelji se na utrošku energije za odvajanje, lomljenje i izvlačenje vlakana, umjesto za napredovanje napukline (slika 2.17). [9]



**Slika 2.17 Napredovanje napukline [9]**

Materijal matrice [3]:

OKSIDNE:

- $\text{Al}_2\text{O}_3$
- $\text{SiO}_2$
- Munit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )
- Ba-, Li- i Ca-aluminosilikat

NEOKSIDNE:

- SiC
- $\text{Si}_3\text{N}_4$
- $\text{B}_4\text{C}$
- AlN

Oksidne matrice pružaju nešto bolju toplinsku i kemijsku stabilnost, dok neoksidne nešto bolja mehanička svojstva.

Materijal ojačala [3]:

*Diskontinuirana (viskeri, pločice, čestice) vlakna*

- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, AlN, TiB<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C, BN

- SiC najzastupljeniji zbog stabilnosti u nizu oksidnih i neoksidnih keramičkih matrica koriste se kod reznih alata

- daju nešto niža mehanička svojstva, no mogu se proizvoditi nekim od klasičnih postupaka proizvodnje monolitne keramike što je jeftiniji postupak.

*Kontinuirana vlakna*

- staklo, mulit, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C, SiC

- SiC vlakna najviše se koriste zbog visoke čvrstoće, tvrdoće i toplinske stabilnosti

- bolja mehanička svojstva, no dobivaju se složenijim i skupljim postupcima.

Prednosti keramičkih kompozita [3]:

- stabilnost na ekstremno visokim temperaturama
- otpornost na toplinski šok
- iznimna otpornost na koroziju
- velika tvrdoća
- mala masa.

Nedostatak keramičkih kompozita [3]:

- sklonost krhkom lomu.

Keramički kompoziti su primjenjivi za mehanički opterećene dijelove pri najvišim radnim temperaturama (to su npr. ugljik/ugljik kompoziti za dijelove svemirskih letjelica).[4]

Razvoj ovih vrsta kompozita je u vrlo ranoj fazi i postoji još niz tehnoloških problema, te se njihova šira primjena očekuje tek za nekoliko godina.[4]

Zbog krhkosti, krutosti i visoke tlačne čvrstoće keramička matrica se ponaša drugačije od žilavih polimernih i metalnih matrica. [4]

Žilavost keramičkom kompozitu povisuju vlakna na taj način što se energija za širenje pukotine troši za lomljenje, odvajanje i izvlačenje vlakana iz matrice.[9]

Njihova niska gustoća i toplinska vodljivost čini ih atraktivnim za primjenu u toplinskim strojevima, zrakoplovnim i svemirskim uređajima, kad su ovi izvrgnuti visokim temperaturama. [4]

Uz postojanje ekonomičnih postupaka za izradu keramičkih kompozitnih materijala, oni bi bili idealni za primjenu na visokim temperaturama ( $> 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), u uvjetima kemijski agresivne okoline i abrazijskog trošenja. [4]

Ovi su kompoziti teži za izradu od drugih jer su potrebne više temperature i tlakovi, a keramička matrica se teže prilagođava ojačalu od polimerne ili metalne.

Daljnji razvoj keramičkih kompozita ograničen je tehnologijama proizvodnje tankih prevučenih vlakana koja će biti otporna puzanju i djelovanju agresivne okoline, kao i niskotemperaturnim procesima izrade. [4]

Materijal matrice keramičkih kompozita:

- KERAMIČKI KOMPOZITI SA SiC MATRICOM

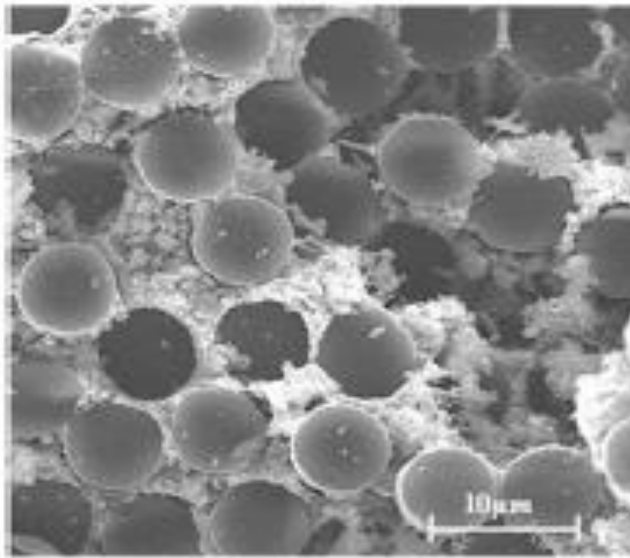
Česti u industrijskoj primjeni, koriste kontinuirana SiC, slika 2.18 ili C-vlakna (novije) te se javlja problem prijanjanja matrice i vlakana.[7]

Neka od svojstava su visoka toplinska vodljivost, mala toplinska rastezljivost, mala masa, vrlo dobra otpornost na koroziju i na trošenje, te otpornost na ekstremno visoke temperature ( $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pri kojima dolazi do stvaranja tankog sloja oksida na površini. [7]

**Tablica 2. Orijentacijske vrijednosti svojstava SiC matrice ojačane SiC vlaknima[3]**

gustoća, $\text{kg/m}^3$	2100
tlačna čvrstoća, MPa	450
vlačna čvrstoća, MPa	262
smična čvrstoća, MPa	34
modul elastičnosti, GPa	96
koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK	2,7
koeficijent toplinske rastezljivosti, 1/K	1,32





**Slika 2.18** CMC sa SiC matricom ojačanom s kontinuiranim SiC vlaknima [7]

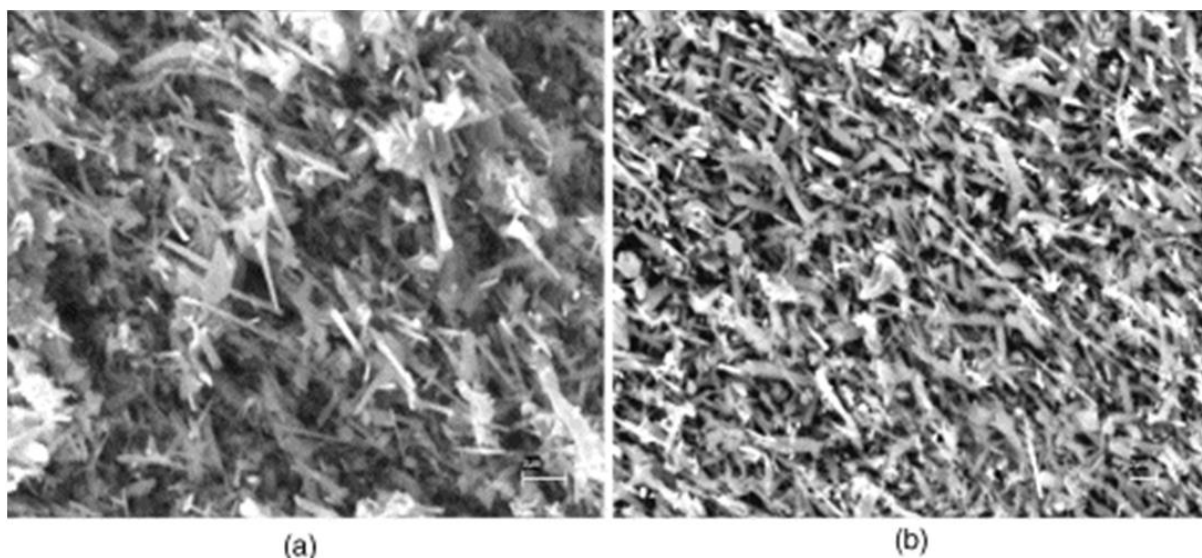
Primjenjuje se ojačanje i  $TiB_2$  česticama, kompozit se dobiva postupkom sinteriranja praha  $SiC-TiO_2-B_4C-C$  bez tlaka, nakon čega slijedi vruće izostatičko prešanje. Dobiva se vrlo visoka savojna čvrstoća ( $> 800$  MPa) i lomna žilavost. [7]

#### ▪ KERAMIČKI KOMPOZITI SA $Si_3N_4$ MATRICOM

Kompoziti sa  $Si_3N_4$  matricom imaju svojstva vrlo slična svojstvima kompozita sa SiC matricom, slika 2.19.

Lošija strana ovih matrica je to da su manje toplinski stabilne i imaju manju toplinsku vodljivost.

$Si_3N_4$  matrica ojačana sa SiC viskerima daje vrlo visoku čvrstoću, modul elastičnosti te kemijsku inertnost pri visokim temperaturama i dobru lomnu žilavost. [7]



**Slika 2.19** Mikrostruktura kompozita sa  $\text{SiN}_4$  matricom ojačanom SiC viskerima [7]

#### ▪ KERAMIČKI KOMPOZITI S $\text{Al}_2\text{O}_3$ MATRICOM

Imaju visoku čvrstoću i tvrdoću, temperaturnu stabilnost, otpornost na trošenje, otpornost na koroziju na povišenim temperaturama te povišenu lomnu žilavost.[7]

Vrlo često se za ojačanje  $\text{Al}_2\text{O}_3$  matrice koriste  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vlakna.[7]

Prevlake na vlaknima su vrlo važne jer se njima znatno smanjuje krhkost. [7]

#### ▪ KERAMIČKI KOMPOZITI S UGLJIČNOM MATRICOM

Prednosti keramičkih kompozita s ugljičnom matricom su visok vlačni modul elastičnosti, visoka vlačna čvrstoća, činjenica da se neka svojstva ne mijenjaju niti pri temperaturi višoj od  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ , otpornost na puzanje, relativno visoka lomna žilavost te njezin širok raspon ( $20\text{-}100\text{ Nmm}^{3/2}$ ), mala toplinska rastezljivost, velika toplinska vodljivost ( $250\text{-}350\text{ W/mK}$ ) i mala osjetljivosti prema toplinskom šoku.[7]

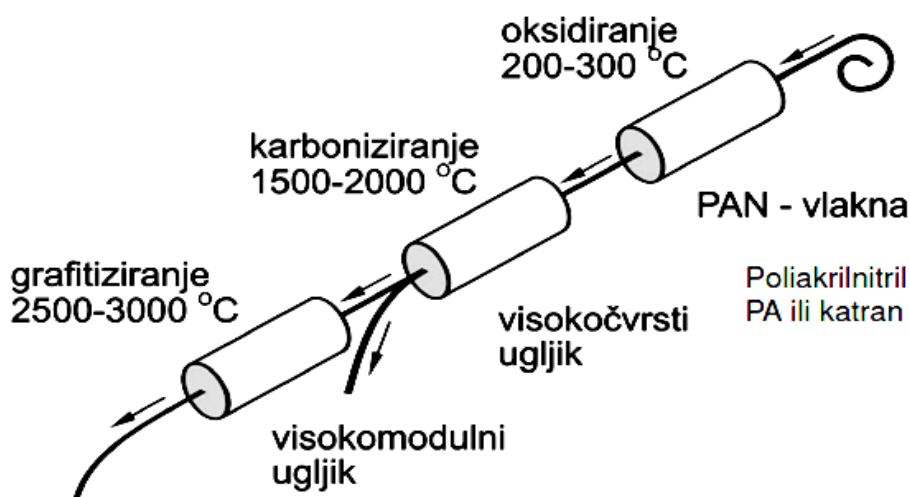
Nedostatak je sklonost oksidaciji pri temperaturi većoj od  $450\text{ }^\circ\text{C}$  te je nužna zaštita od oksidacije modifikacijom matrice i dodavanjem različitih inhibitora oksidacije.[7]

Inhibitori mogu biti B, Si, Zr te nanošenje keramičkih prevlaka koje su najčešće višeslojne prevlake karbida, nitrida i oksida, silicija te aluminijskih.[7]

Proizvodnja C/C kompozita odvija se postupkom impregnacije, koji je vrlo kompliciran i skup proces te je potrebna priprema predoblika u obliku vlakana 2D ili 3D, tablica 3 i slika 2.20. [7]

**Tablica 3. Postupak proizvodnje ugljik-ugljik kompozita postupkom impregnacije [7]**

- priprema predoblika vlakana – 2D ili 3D
- impregnacija s vrućom smolom pod visokim tlakom
- pečenje (piroliza) u peći da ispare iz smole svi elementi osim ugljika - karbonizacija
- ugrijavanje > 3000 °C čime se stvaraju mala grafitna područja i postiže konačna čvrstoća
- višekratno ponavljanje gornjih koraka



**Slika 2.20 Proizvodnja ugljičnih vlakana [7]**

### 3. KERAMIČKI KOMPOZITNI MATERIJALI U SUVREMENOJ AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI

#### 3.1. Primjena keramičko-kompozitnih materijala u automobilske industriji

Automobilska industrija značajno se razvijala kroz napretke ostalih tehnologija, posebice tehnologija kao što su elektronika koje su uz pomoć naprednih materijala također pridonijele daljnjem napretku automobila.

Doprinos keramičkih materijala automobilske industriji prostire se od performansa u vožnji, pročišćavanja ispušnih plinova do sigurnosti i napretka u efikasnosti goriva.

U automobilima je uspješno primijenjeno više keramičkih komponenata, na primjer senzori detonacije goriva, senzori kisika, katalizatori ispušnih plinova te kočioni diskovi u sportskim inačicama serijskih automobila.

Ovaj dio rada odnosi se na doprinos keramike i keramičkih kompozita automobilske tehnologijama.

Također govori o potencijalnim projektima u budućnosti, uključujući turbodizelske agregate s unutarnjim izgaranjem, keramičke plinske turbine, gorive ćelije te vozila na električnu energiju budući da su keramičke tehnologije intenzivno uključene u izazov postizanja naprednih izvora energije.

Sve češće u izradi visokopterećenih dijelova automobila koristi se keramika i keramički kompoziti, zahvaljujući izdržljivosti na visokim temperaturama, velikoj tvrdoći, odnosno otpornosti na trošenje i znatno manjoj specifičnoj težini (gustoći) od čelika i aluminija.

Bitni aspekti performansa u vožnji automobila su brža vožnja, trenutno zaustavljanje i postojanost u zavojima.

Ove karakteristike izravno su povezane s učinkom automobilske motora, pneumatika, sustava za kočenje i dijelova karoserije.

Krenuvši od motora, mogućnost sustava ventila da omogući glatko prodiranje i ispuštanje plinova u komorama za izgaranje je bitna kako bi sukladno tome motori mogli funkcionirati na visokim brzinama (slika 3.1).[12]

Sustavi bočnih ventila korišteni u ranom razdoblju automobilske industrije pretvoreni su u

efikasnije sustave i u novijim vozilima korištene su dvostruke nadzemne bregaste osovine s četiri ventila po cilindru. [12]

Ova promjena provedena je iz razloga što nadzemne bregaste osovine dopuštaju ventilima glatko otvaranje i zatvaranje te je sustav s više ventila djelotvorniji za razmjenu plinova u komorama za izgaranje zbog velikih otvora. [12]

Jedan od bitnih aspekata je smanjenje mase ventila što bi također bilo djelotvorno za lakše otvaranje i zatvaranje. Lagani materijali kao što su silicijev nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) te legure titanija i aluminija su razmatrane kao moguće zamjene za superlegure na bazi nikla koje se trenutno koriste za ispušne ventile. [12]

U zadnje vrijeme, legure titanija i aluminija su ustvari korištene u komercijalnim vozilima, dok su ventili proizvedeni od silicijevog nitrida korišteni u vrlo ograničenim količinama u formulama za utrkivanje.[12]



**Slika 3.1 Ventili u automobilskom motoru[5]**

Kompresorski sustavi omogućavaju generaciju motora iznimno visoke snage zahvaljujući sposobnosti postizanja visokog tlaka zraka u cilindrima motora.

Najlakši način da se dobije više snage iz motora je da se poveća količina zraka i goriva koje može u motoru sagorjeti.

Jedna od mogućnosti je da se poveća obujam bilo povećanjem obujma cilindra ili dodavanjem cilindra.

Ako taj način nije moguć ili isplativ, turbopunjač je jednostavnije i kompaktnije rješenje.

Turbopunjači su turbinski pogoni s prisilnim indukcijskim kompresorom pogonjeni ispušnim plinovima. Turbopunjači koriste turbinski rotor pogonjen plinovima iz ispušnog razvodnika motora i impeler povezan s turbinom zajedničkom osovinom za stlačivanje okolnog zraka, kako bi ga dostavili u usisavač zraka u motoru. [13]

Turbopunjači omogućavaju motoru da sagori više goriva i zraka tako što u postojeći obujam motora stlačivanjem ubacuju više goriva i zraka.

Turbopunjači su jedan od nekolicine sistema za dodatno unošenje zraka u motor, tj. oni smanjuju obujam zraka koji ulazi u motor.

Prednost smanjivanja obujma zraka koji ulazi u motor kroz usisnu granu je da dozvoljava motoru da ima više zraka u cilindru, a samim tim više goriva treba da bi se napravila odgovarajuća smjesa.

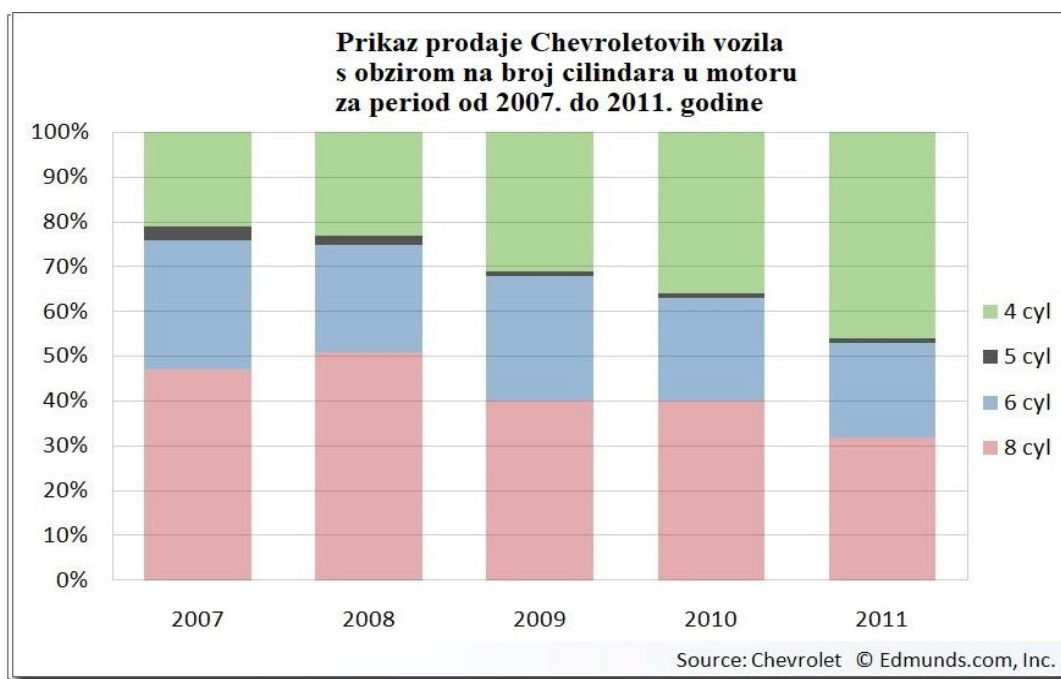
Upravo zbog toga dobiva se više snage iz svake eksplozije unutar svakog cilindra motora. Motor s turbopunjačem po definiciji proizvodi više snage od motora koji nema turbopunjač, a to značajno poboljšava odnos snaga / masa motora. [14]

To dovodi do još jednog novog trenda u autoindustriji, a riječ je o modelu smanjivanja obujma samog motora (engl. *downsizing*). [11]

Obujam motora označava vrijednost obujma jednog cilindra pomnoženim s brojem cilindara motora.

Posljedicu „downsizinga“ možemo vidjeti u smanjenju broja cilindra pa time i radnog obujma motora, što samim time dovodi do smanjenje mase motora, manje potrošnje goriva uz očuvanje ili poboljšanje samih performansa motora.

Mnogobrojni proizvođači automobila su već primijenili koncept „downsizinga“ kao što možemo vidjeti na slici 3.2 gdje tvrtka Chevrolet bilježi sve veći porast prodaje štedljivijih četverocilindričnih agregata naspram većih šesterocilindričnih te motora s osam cilindara.[11]



**Slika 3.2 Prodaja vozila Chevrolet u ovisnosti o broju cilindara u motoru [11]**

Isto tako primijećena je značajno niža emisija štetnih CO<sub>2</sub> plinova primjenjivanjem koncepta „downsizinga“. Učinkovitost „downsizinga“ može varirati i do 5 % kod dizelskih agregata te do 40 % kod benzinskih motora. [11]

Potrebne mjere koje je potrebno izvršiti da bi se došlo do učinkovitosti „downsizinga“ razmotrene su u vidu upotrebe komprimiranog zraka pomoću raznih turbokompresora ili turbopunjača te samim time potrebnu modifikaciju na području odabira materijala pojedinih dijelova ili dimenzioniranju njihove geometrije i konstrukcije.

To dovodi do usporedbe i pregleda turbopunjača i njegovih glavnih dijelova prema materijalima od kojih su napravljeni i njihovim svojstvima.

Da bi turbopunjači postigli odgovarajuću kompresiju, turbopunjač koristi ispušne plinove motora da bi zavrtio svoju turbinu koja opet ubrzava unos zraka.

Turbopunjač je pričvršćen na ispušnu granu motora, a ti ispušni plinovi okreću turbinu. Turbina je osovinom povezana s kompresorom koji se nalazi između filtra za zrak i usisne grane motora i taj kompresor tlači zrak koji se ubacuje u cilindre (slika 3.3).

Plinovi izgaranja iz cilindra prolaze preko lopatica turbine koje okreću samu turbinu i što više plinova izgaranja prolazi kroz lopatice, to se turbina brže okreće. [14]

S druge strane osovine na koju je pričvršćena turbina nalazi se kompresor koji stlačuje zrak u cilindre.

Kompresor je tzv. centrifugalna pumpa koja uvlači zrak u centar svojih lopatica i gura ga dalje kako se okreće (slika 3.4). [14]

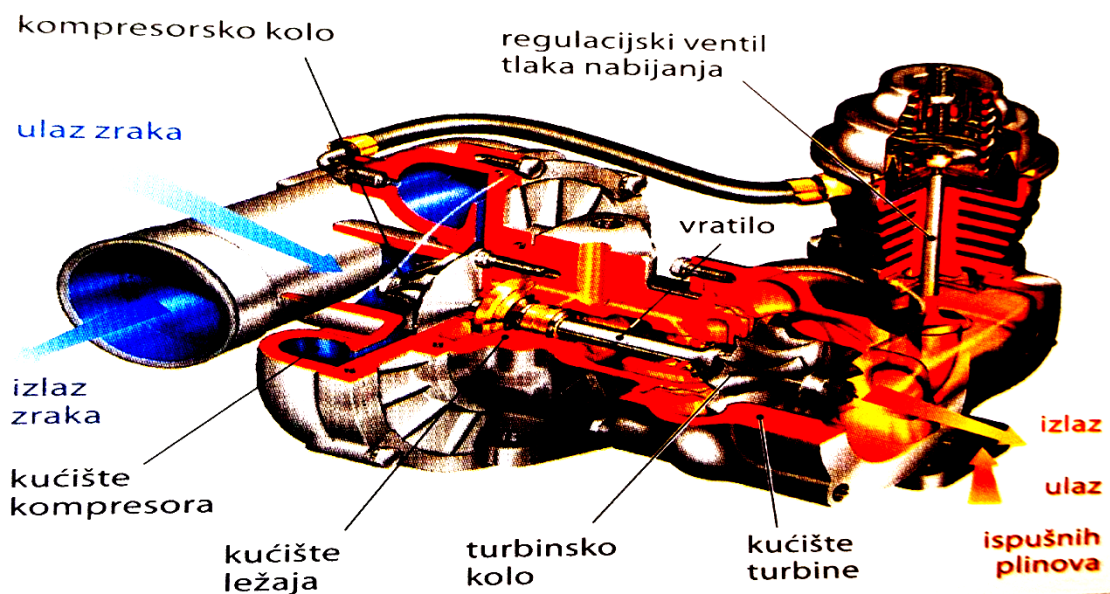
Da bi izdržala 150 000 okretaja u minuti, osovina turbine mora biti pričvršćena veoma pažljivo. [14]

Većina ležaja bi se pri ovoj brzini okretanja vjerojatno razbila pa tako turbopunjači koriste fluid (ulje) koje je u veoma tankom sloju između ležaja i osovine te smanjuje trenje, a istovremeno hladi osovinu i druge dijelove turbopunjača. [14]

Turbina turbopunjača se obično vrti od 100 000 do 150 000 okretaja u minuti, a kako je direktno povezana na ispušnu granu motora temperature na kojima turbina radi su veoma visoke. [14]

Tijekom takta usisa turbopunjačem se tlači u cilindar što veća količina svježeg zraka.

Osim toga, izvan cilindra se smjesu goriva i zraka, odnosno čisti zrak, djelomično ili potpuno pretkomprimira. [8]



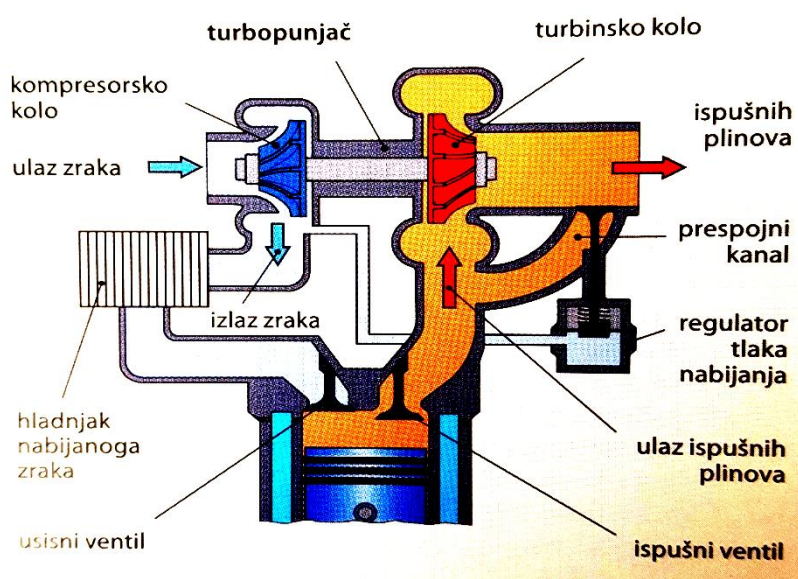
Slika 3.3 Konstrukcija turbopunjača [8]



Ispušni plinovi motora pogone turbinsko kolo, a preko vratila i kompresorsko. Kompresor usisava svježi zrak i daje ga cilindrima pod određenim tlakom. Tijekom predtlačanja zrak se zagrije i do 180 °C. [8]

Sustavi turbopunjača podobni su za postizanje izuzetno velike snage dodavanjem malenih turbojedinica motorima.

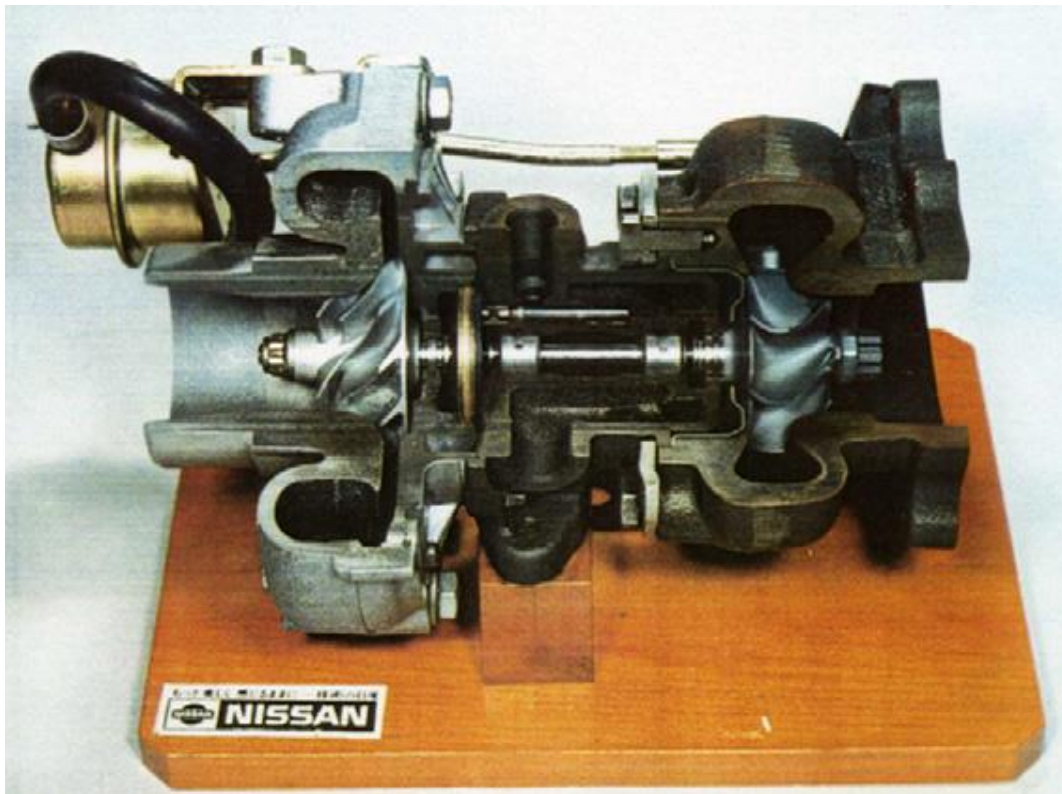
Takvi punjači djeluju s malim zakašnjenjem na brze promjene položaja papučice gasa jer zbog inercije, ispušni plinovi ne mogu pratiti brze promjene opterećenja. Takva pojava se još zove i „turborupa“. [8]



**Slika 3.4 Shematski prikaz motora s turbopunjačem [8]**

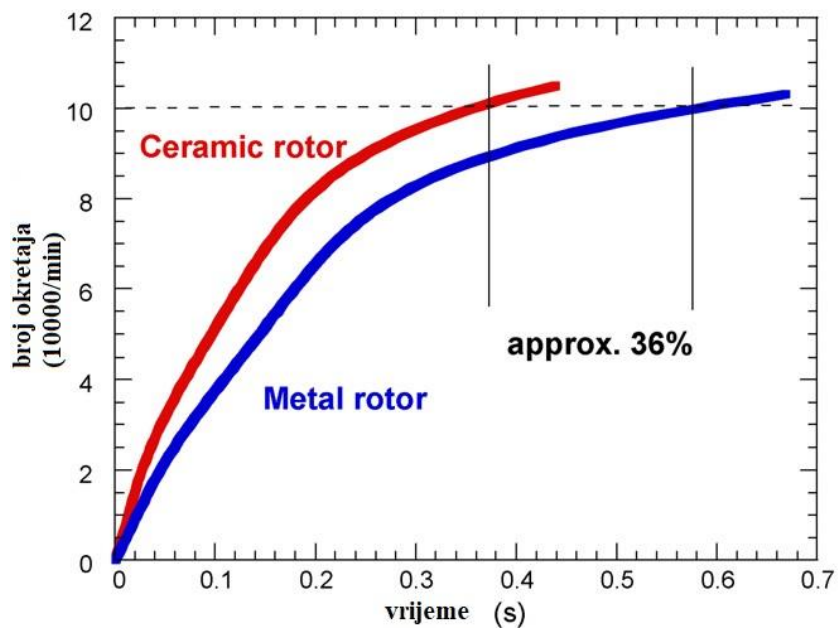
Međutim, postoji neizbježna pauza između namjere za ubrzanjem koju iskazujemo pritiskom na papučicu goriva i stvarnog ubrzanja automobila. Ovo zaostajanje uzrokovano je vremenom koje je potrebno da bi turbina dosegla brzinu potrebnu da dobavi pritisak punjaču. Smanjivanjem inercijske mase rotora turbine učinkovit je način da se smanji turbozaostajanje. [13]

Na slici 3.5 vidimo keramički turbopunjač proizveden od silicij nitrida ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Turbozaostajanje je u ovom slučaju reducirano zahvaljujući činjenici da je silicijev nitrid lakši od tradicionalnih superlegura na bazi nikla. [12]



Slika 3.5 Nissanov turbopunjač od silicij nitrida [12]

Brzine vrtnje rotora na bazi keramike i metala uspoređene su na slici 3.6. Vrijeme potrebno da se dostigne 10 000 okretaja u minuti keramičkih rotora umanjeno je za 36 % .[12]



Slika 3.6 Usporedba brzine vrtnje za rotore na bazi keramike i metala [12]

Također vrijedi zapaziti da su sustavi turbokompresora vrlo prikladni za dizelske motore, dok bi njihova primjena na benzinske motore mogla rezultirati fenomenom detonacije unatoč velikoj prednosti u vidu visoke izlazne snage.[12]

Općenito, benzinski motori zahtijevaju gorivo sa specificiranim visokim indeksom protiv detonacije budući da se radom motora na visokim stupnjevima kompresije postiže visoka efikasnost. [12]

Temperatura mješavine zraka i goriva povisuje se adijabatskim kompresijama te pritiskom iz turbokompresora te bi tako te mješavine plinova na visokim temperaturama mogle dovesti do samostalnog izgaranja što bi vodilo detonaciji.[12]

Toplinska efikasnost plinskih turbina vrlo je visoka za ogromne motore, ali je u globalu niska za male motore. Očekuje se da će viša toplinska efikasnost biti postignuta tek kada i mali motori budu radili na višim temperaturama.[12]

Automobili opremljeni keramičkim turbinama goriva su uspješno testirani u realnim uvjetima vožnje na cesti.

Međutim, njihove performanse nisu uspjele doseći željenu razinu. Problemi identificirani u projektu „Napredne turbine goriva“ oko 1989. godine sumirani su niže [12]:

- (1) kvar keramičkih rotora uzrokovani stranim predmetima
- (2) curenje goriva kroz članke
- (3) toplinska deformacija
- (4) nedovoljno podmazivanje rotirajućih dijelova
- (5) niska čvrstoća keramičkih materijala pri povišenim temperaturama.

Japanski projekt automobilske keramičke plinske turbine (CGT, od engl. *Ceramic Gas turbine*) snage 100 kW započet je 1990. i uspješno je priveden kraju 1997. [13]

Ovaj projekt podržavalo je Ministarstvo međunarodne trgovine i industrije i provedeno je od strane neprofitne organizacije „Petroleum Energy Center“ kako bi se postigli ciljevi kao što je viša toplinska efikasnost za 40 %, izlazna snaga od 100 kW pri temperaturi na ulazu u turbinu od 1350 °C te smanjenje ispušnih plinova kako bi se prilagodili određenim eko-normama. [13]

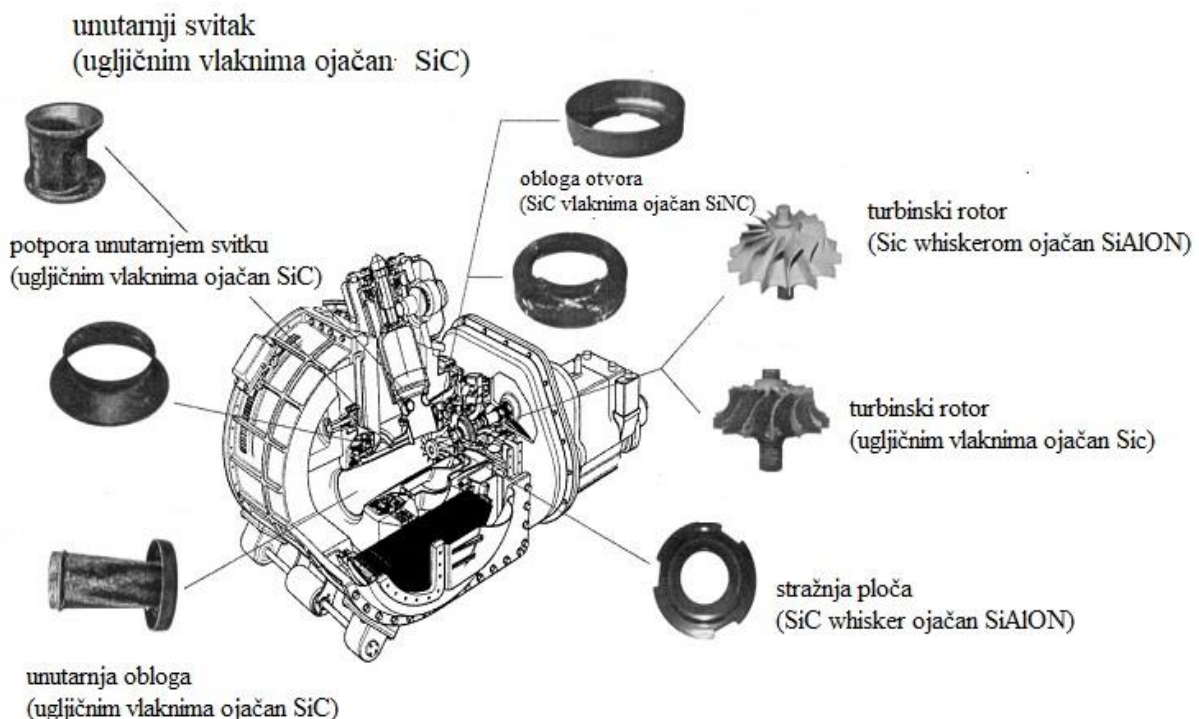
Naposljetku, postignuta je izlazna snaga od 92,3 kW i toplinska efikasnost od 35,6 % koristeći se relativno novim materijalima - keramičkim kompozitnim materijalima. [13]

Međutim, primjena keramičkih kompozitnih materijala (CMC) u novim područjima kao što su plinske turbine koje rade pri iznimnim uvjetima u kojima bi CMC trebao efikasno funkcionirati još uvijek nije dovoljno istražena.

Keramički kompoziti su također razvijani u spomenutom sedmogodišnjem projektu. Primjene CMC-a na druge komponente također su se pozitivno razvijale, s obzirom na ograničenost upotrebe monolitne keramike.

Istraživanje se bavilo i tehnologijama za proizvodnju komponenata od materijala otpornih na toplinske šokove i ekstremne temperature uzimajući u obzir da je temperatura usisa turbine 1350 °C .[13]

Keramički kompozitni materijal je razvijen kako bi se savladala krhkost monolitne keramike. Komponente keramičke plinske turbine prikazane na slici 3.7 sastoje se od turbinskog rotora, stražnje ploče, obloge otvora, obloge produžetka, potpore unutarnjeg svitka i drugih komponenata razvijenih od keramičkih kompozitnih materijala.[13]



**Slika 3.7** Komponente keramičke plinske turbine od keramičkog kompozitnog materijala [13]

Otpornost na toplinski šok, sudar čestica i puzanje bitne su karakteristike zahtijevane od materijala koji rade pri visokim temperaturama.

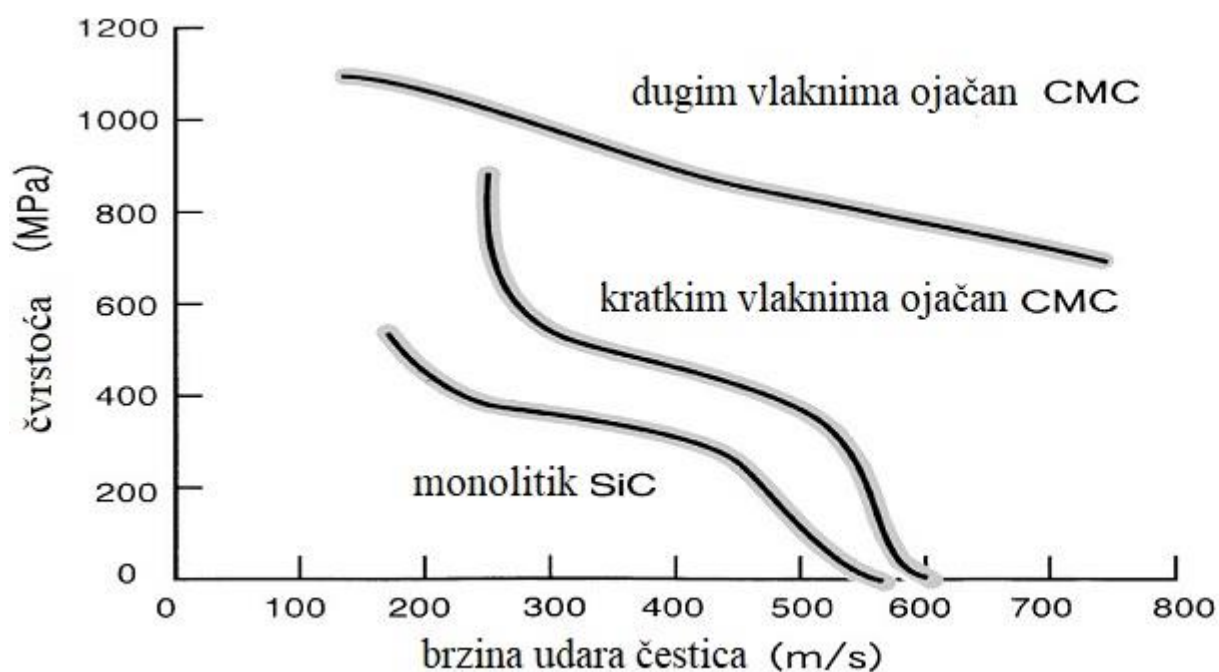
Cirkonijske kuglice promjera 1 mm ispucane su u testne dijelove raznih CMC-a i monolitne keramike koristeći plinski pištolj pri visokoj brzini kako bi se usporedila preostala čvrstoća. [13]

Testiranjem ispitnih uzoraka zaključeno je da je trenutni lom turbinskog rotora uzrokovan udarom stranog tijela doveo do značajnog oštećenja više keramičkih komponenti. [13]

Kao što je prikazano na slici 3.8, vrste keramičkih kompozita ojačanih dugim vlaknima održavaju čvrstoću čak i nakon testa sudara pri maksimalnoj brzini čestica. [13]

Šteta na keramičkim kompozitima ojačanim dugim vlaknima ograničena je na samo jedan dio ispitnog tijela, za razliku od potpunog loma materijala kod monolitne keramike.

Kao što je već pojašnjeno, CMC ojačan dugim vlaknima potvrđen je kao iznimno otporan materijal na oštećenja uzrokovana stranim česticama. [13]

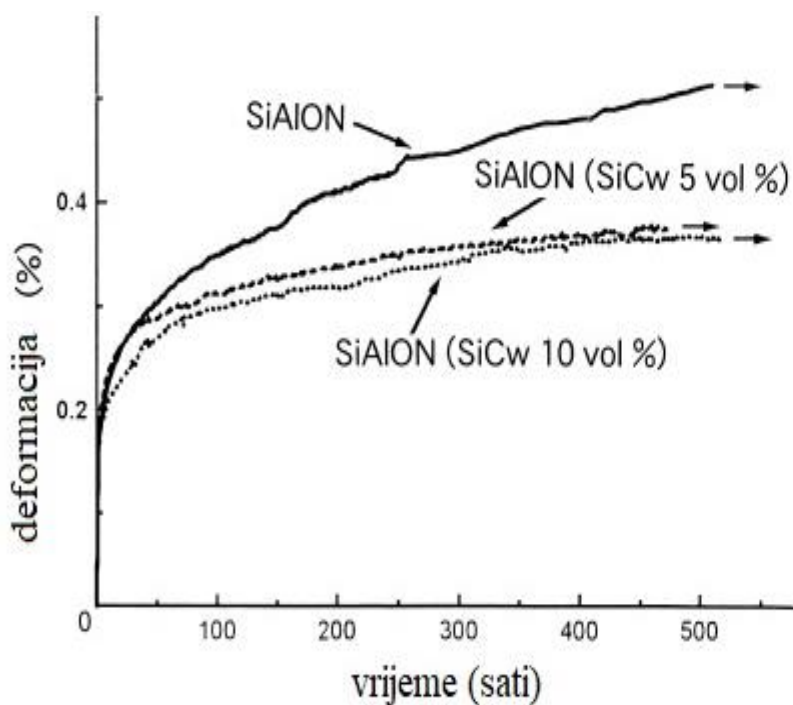


Slika 3.8 Čvrstoća u ovisnosti o brzini udara čestica [13]

Keramički kompoziti se mogu koristiti i u svrhu njihovih karakteristika otpornosti puzanju. Kompozit silicij karbida ojačan ugljičnim vlaknima imaju niske stope puzanja od  $10^{-9} \text{ s}^{-1}$  pri  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$  i pod opterećenjem od 200 MPa ili više (slika 3.9.). [13]

Potvrđeno je da SiAlON kompoziti ojačani silicij karbidnim whiskerima imaju znatno manje karakteristične deformacije pri  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  i opterećenju od 200 MPa u usporedbi s monolitnom keramikom čak kada je količina viskera 10 vol. % ili manje. [13]

Ovakav kompozit moguće je sinterirati bez pritiska, kompozit postiže visoku savojnu čvrstoću i visoku žilavost.

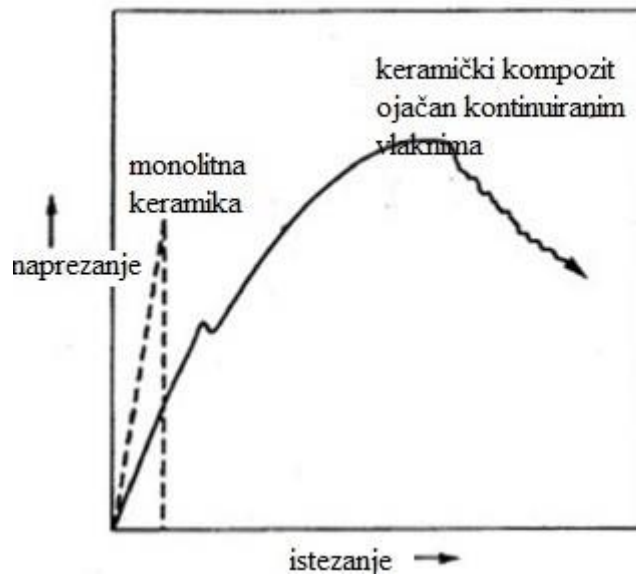


Slika 3.9 Dijagram puzanja monolitne keramike i keramičkog kompozita [13]

Nakon provedenog ispitivanja utvrđeno je da keramički kompoziti ojačani česticama/mljevenim vlaknima imaju ista ili bolja svojstva od monolitne keramike.

Smatra se da će keramički kompoziti biti korišteni kao iznimno pouzdan materijal s toplinskom otpornošću i otpornošću na trošenje nakon usvajanja osnovnih tehnologija obrade i mogućnosti oblikovanja kompleksnih oblika pri niskoj cijeni.

Općenito, keramički kompozit ojačan dugim vlaknima ima prednost u raznim svojstvima naspram monolitne keramike, te npr. pokazuje veću vlačnu čvrstoću i duktilnost (slika 3.10).



**Slika 3.10** Dijagram naprezanje-istezanje monolitika keramike i CMC-a. [7]

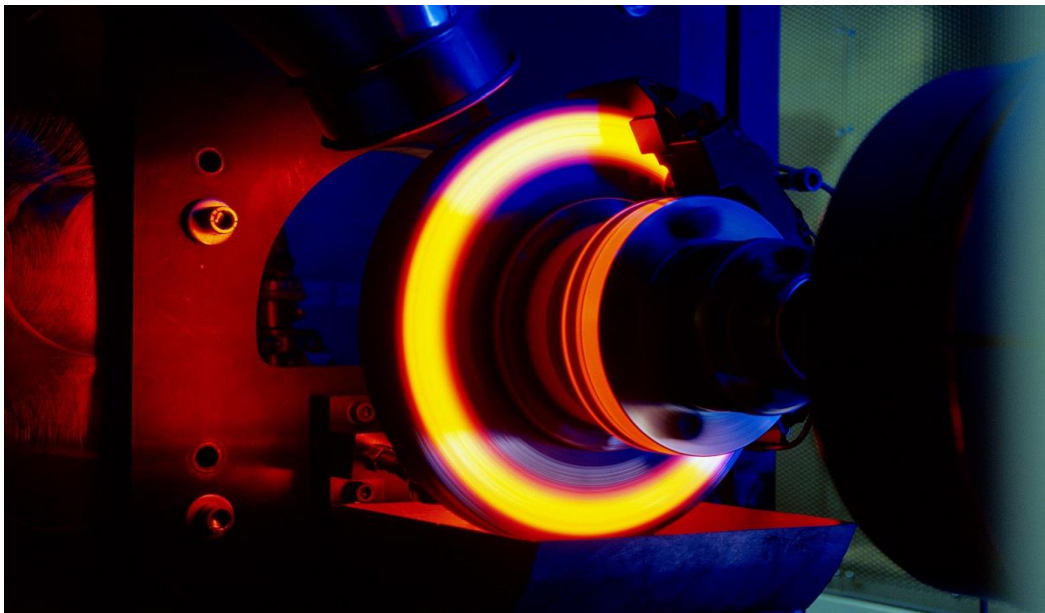
Izborom orijentacije i udjela ojačala mogu se modelirati potrebna svojstva potrebna za određeni proizvod. Očekuje se da će nova svojstva koja konvencionalni materijali ne posjeduju biti preuzeta od strane ovih vrsta keramičkih kompozitnih materijala zbog gore navedenih značajki.

Unaprjeđenje tehnologije proširilo je upotrebu keramičkih kompozita, pa se oni danas koriste i u proizvodnji kočnih diskova.

Osim što je keramika iznimno otporna i tvrda, istodobno je i vrlo krhka.

Stoga se za potrebe kočnih diskova sportskih automobila najčešće koristi u obliku kompozitnih materijala, gdje je matrica od silicij karbida ojačana ugljičnim vlaknima. [5]

Zahvaljujući izdržljivosti na visokim temperaturama, velikoj tvrdoći, odnosno otpornosti na trošenje i znatno manjoj specifičnoj težini (gustoći) od čelika i aluminija keramički kompoziti polako, ali sigurno zamjenjuju dijelove napravljene od konvencionalnih materijala. [5]



**Slika 3.11 Ispitivanje kočionih diskova [5]**

Prilikom kočenja pločice velikom silom pritišću diskove kako bi ih usporile, odnosno zaustavile.

Budući da je nužno potrošiti kinetičku energiju vozila u gibanju, ista se količina energije na kočnicama treba potrošiti na trenje. [5]

Time se diskovi zagrijavaju, a zagrijavanje je to veće što su veće brzina i masa vozila, te učestalost kočenja te to nerijetko dovodi do usijanja i otkazivanja rada kočnica, slika 3.11. [5]

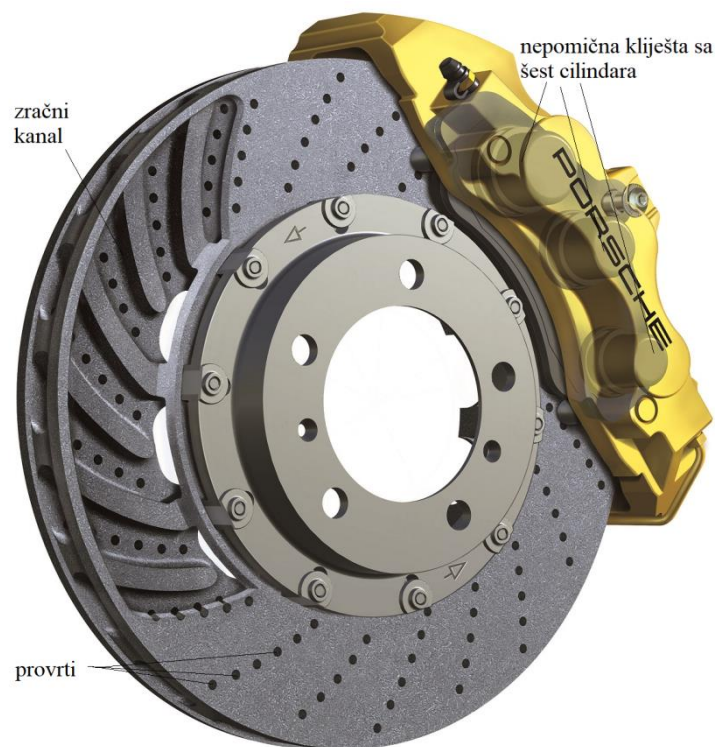


Zagrijavanje uzrokuje dilataciju materijala diskova, a zbog nejednolike raspodjele topline kroz materijal, dilatacija je također nejednolika.

Površina diska s vremenom postaje neravna, što vozač osjeća kao vibracije pri kočenju. Diskovi izrađeni od keramičkog kompozita pokazuju iznimnu otpornost prema toplinskim dilatacijama i trošenju pa su i nakon 300.000 km u dobrom stanju. [5]

Značajna primjena keramičkih kompozita je u teškim vozilima, koja zahvaljujući ovakvim diskovima mogu sigurno kočiti i pri najvećim opterećenjima.[5]

Samoventilirajući diskovi se primjenjuju za osobito visoka opterećenja. Pri vrtnji disk djeluje kao centrifugalni ventilator, čime je postignuto učinkovitije hlađenje, slika 3.12.[5]



**Slika 3.12 Samoventilirajući keramičko kompozitni disk (PCCB  
engl. *Porsche Ceramic Composite Brake*) [8]**

Osim što bolje podnose visoke temperature, pa omogućavaju kasnije i intenzivnije kočenje, keramički kompozitni diskovi su i značajno lakši, što smanjuje moment inercije.[5]

Keramički kompozitni diskovi su približno 60 puta otporniji od klasičnih diskova i vrlo su skupi. [5]

Komplet keramičkih diskova košta i više od 3000 eura, što limitira njihovu ugradnju na skupe automobile.

*Porsche Ceramic Composite Brake* (PCCB) najnaprednija je tržišna izvedba kompozitnih keramičkih diskova.



**Slika 3.13** Odnos mase keramičkog kompozitnog kočionog diska i mase diska od sivog lijeva [5]

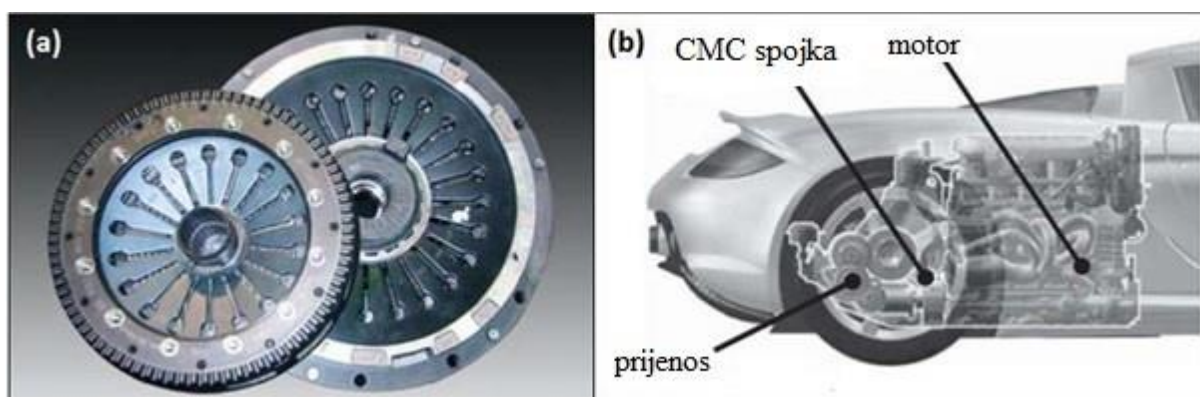
Neke od prednosti kompozitnih keramičkih diskova [5]:

1. jedna od estetskih prednosti kompozitnih keramičkih diskova je manje crnila na naplaticima („felgama“), što se posebno uočava na aluminijskim, a što ukazuje i na znatno manje trošenje diska i pločice
2. usijanje pri intenzivnom kočenju posljedica je temperatura koje mogu porasti i iznad 1000 °C, bez rizika otkazivanja (engl. *brake fade*)
3. uzastopno intenzivno kočenje pokazuje najviše prednosti keramičkih diskova u usporedbi sa sivim lijevom, jer su višestruko izdržljiviji, slika 3.13
4. zaustavni put kočenja pri 100 km/h može se, u idealnim okolnostima, smanjiti na manje od 30 m, a pri 200 km/h ispod 115 m
5. učinkovitost kočenja kompozitnih keramičkih diskova znatno se manje mijenja ovisno o temperaturi, pa takve kočnice izvrsno koče i sasvim hladne.

Dobro iskustvo s Porsche keramičkom kompozitnom kočnicom (PCCB) dovela je do razvoja Porsche keramičke kompozitne spojke (PCCC).

Moderna varijanta ovog materijala nadilazi materijale na bazi željeza u tri glavna svojstva: kompozitna keramika je lakša, tvrđa i toplinski otpornija od metala.

Vrhunski materijal također odlikuje smanjenje mase preko 7,6 kg u odnosu na konvencionalne spojke - npr. kod automobila Porsche 911 Turbo uštedeno je više od pedeset posto mase za spojku. Kod Porsche Carrera GT masa spojke promjera 169 mm iznosi 3,5 kg, slika 3.14. [10]



Slika 3.14 Porsche keramička kompozitna spojka (PCCC) [10]

## 4. POSTUPCI PROIZVODNJE KOMPOZITA S KERAMIČKOM MATRICOM

- CVD (engl. Chemical Vapour Deposition)
- USMJERENA OKSIDACIJA METALA
- PROIZVODNJA SIC/SIC KOMPOZITA IMPREGNACIJOM POLIMERA I PIROLIZOM
- CVI (engl. Chemical Vapour Infiltration)

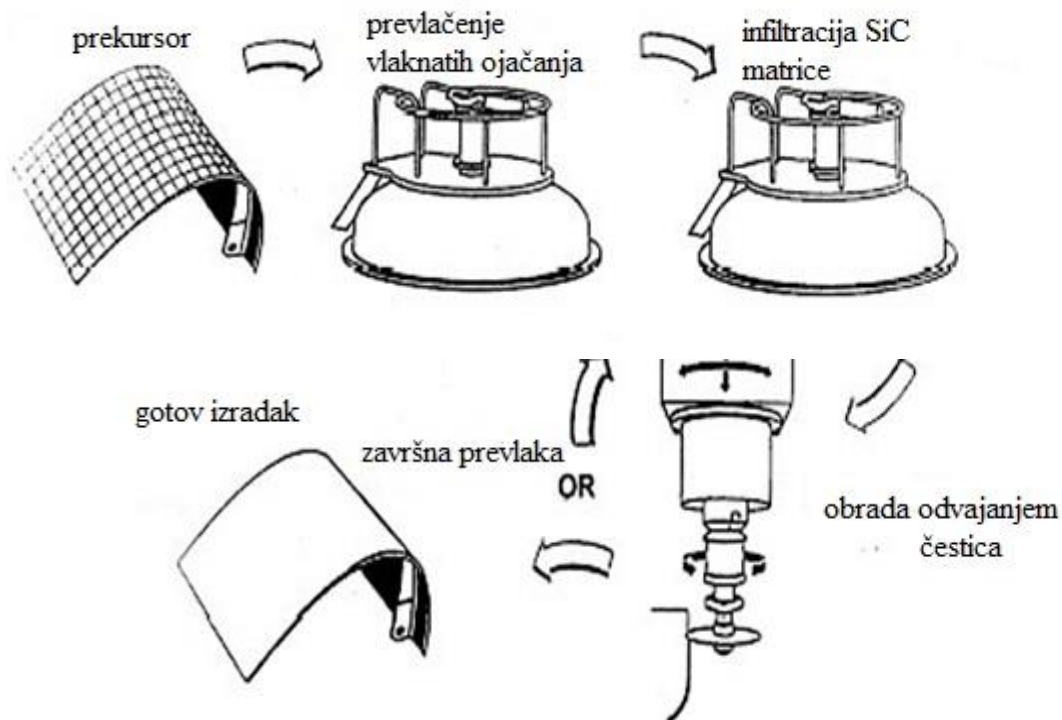
### 4.1. CVD (Chemical Vapour Deposition)

#### Ojačanje kontinuiranim SiC vlaknima

Vezni sloj između vlakana i matrice, kao i sama matrica, nastaju taloženjem iz plinovitog prekursora pri povišenim temperaturama, slika 4.1.[7]

Za postignuće što veće gustoće obično je potrebno 2 do 5 ciklusa.[7]

Prva faza je prevlačenje vlaknastih ojačala, nakon čega slijedi infiltracija matrice, završna prevlaka ili obrada odvajanjem čestica. [7]



Slika 4.1 CVD postupak [7]

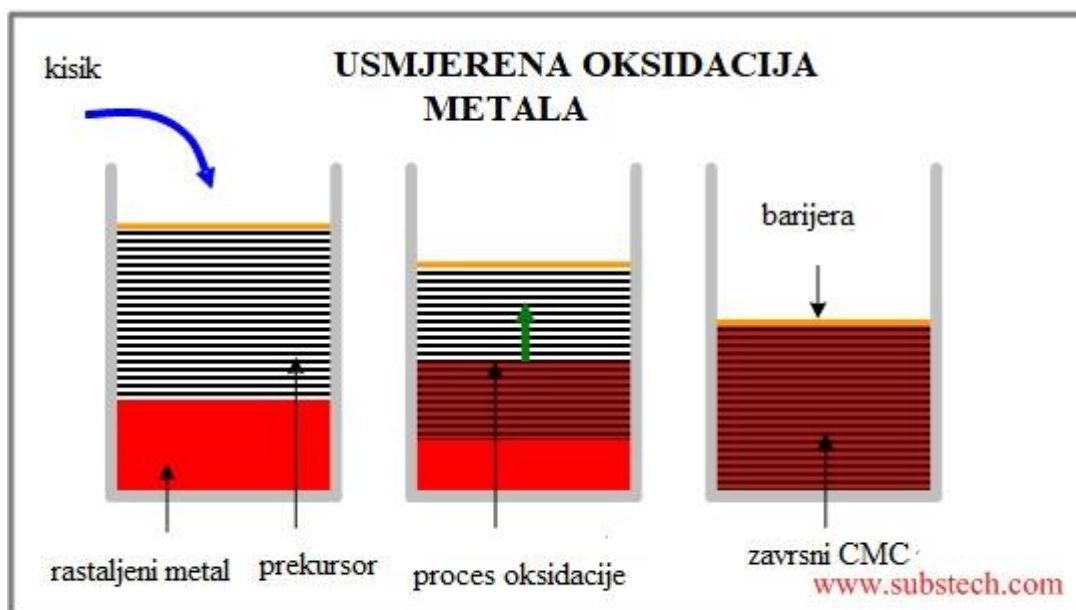
## 4.2. USMJERENA OKSIDACIJA METALA

Proizvodnja keramičkih kompozita izravnim metalnim oksidacijskim procesom (engl. *Direct Metal Oxidation Process*, Dimox) je vrsta reaktivne infiltracije taljevine (RMI), koja uključuje formiranje matrice kompozita u reakciji rastaljenog metala s oksidirajućim plinom. Prekursor dispergirane faze (vlakna ili čestice) stavlja se na površinu rastaljenog metala u atmosferi oksidirajućeg sredstva (kisik).[15]

Dva su uvjeta potrebna za provođenje izravnog procesa oksidacije: dispergirana faza (vlakna ili čestice) je navlažena taljevinom, te da dispergirana faza ne oksidira u atmosferi kisika.

Tekući metal oksidira kada je u dodiru s kisikom, stvarajući tanak sloj keramike, slika 4.2.

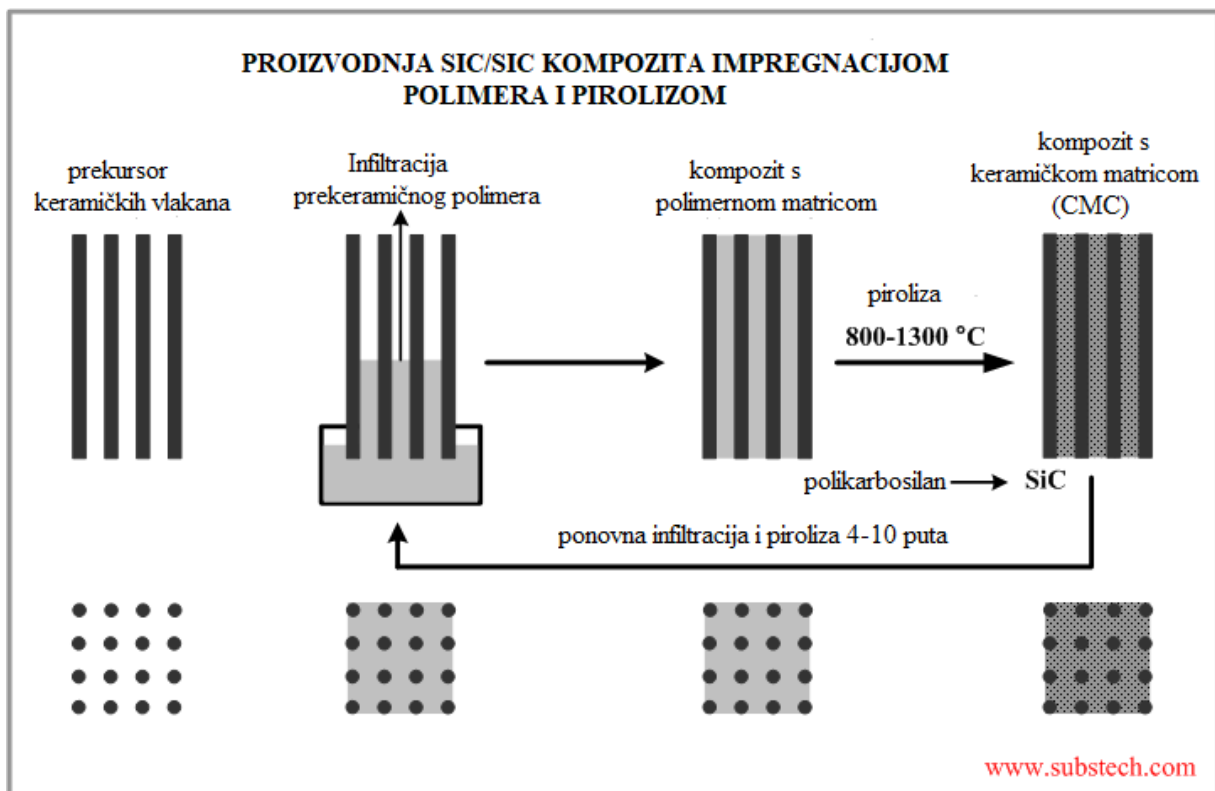
Kapilarni učinak prisiljava taljevinu da prodiere kroz porozni keramički sloj na reakcijsku prednju stranu gdje metal reagira s plinom, što rezultira rastom keramičkog matričnog sloja. [15]



Slika 4.2 Postupak usmjerene oksidacije metala [15]

### 4.3. PROIZVODNJA SiC/SiC KOMPOZITA IMPREGNACIJOM POLIMERA I PIROLIZOM

Infiltracija polimera i piroliza (PIP) je metoda izrade keramičkih kompozita koja obuhvaća infiltriranje polimera niske viskoznosti u armaturnu keramičku strukturu, nakon čega slijedi piroliza, tj. zagrijavanje polimernog prekursora u odsutnosti kisika, pri čemu se polimer raspada i pretvara u keramiku, slika 4.3. [15]



Slika 4.3 Postupak impregnacije polimera i pirolize [15]

#### Izrada predimpregniranog materijala (prepreg):

- vlakna za ojačanje impregnirana su smolom i zatim sušena
- u takvom stanju povećava se viskoznost polimera i prepreg se može oblikovati.

#### Skupljanje:

pripremak je oblikovan alatom (kalupom).

**Prešanje:**

U kalupu kruti donji kalup se kombinira s fleksibilnim gornjim kalupom (vrećom), koji se utisne prema prepregu bilo atmosferskim tlakom (vakuumske vrećice) ili povećanim tlakom zraka te se prešani izradak prenosi u autoklav.

**Infiltracija predkeramičnog polimera:**

Porozne strukture za ojačanje napunjene su niskoviskoznom otopinom predkeramičkog polimera. Kada je predoblik uronjen u otopinu, proces infiltracije pokreću kapilarne sile pa se obično provodi pri normalnom tlaku, ali može biti i vakuumski ili tlačni.

**Piroliza:**

Pirolitička dekompozicija predkeramičnog polimera provodi se u atmosferi argona pri temperaturi u rasponu od 800-1300 °C. Matrice od nitrida (npr. silicijev nitrid) proizvedene su u atmosferi dušika (N<sub>2</sub>) ili amonijaka (NH<sub>3</sub>), a hlapljivi produkti kao što su CO, vodik (H<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub>, CH<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O se otpuštaju kao posljedica pirolize koja stvara poroznu strukturu dobivene keramičke matrice.

**Višestruka ponovna infiltracija i piroliza:**

Ciklus infiltracijsko-pirolize ponavlja se 4-10 puta kako bi se smanjila preostala poroznost keramičke matrice.

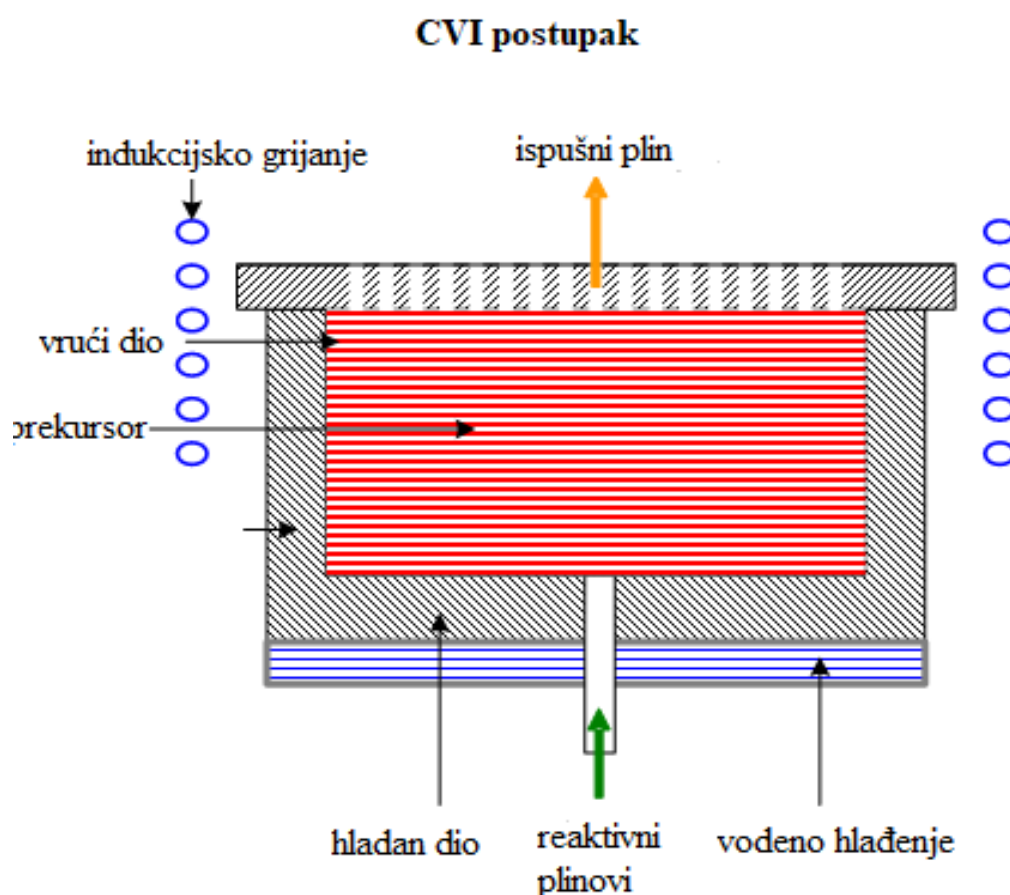
#### 4.4. CVI (Chemical Vapour Infiltration)

Kemijska infiltracija iz parne faze je postupak dobivanja keramičkih matričnih kompozita u kojem se reaktantni plinovi raspršuju u izotermalnu poroznu preformu od dugih kontinuiranih vlakana i talože se. [15]

Infiltracija plinovitog prekursora u armiranu keramičku kontinuiranu konstrukciju vlakana (predoblik) provodi se procesom difuzije ili nametnutim vanjskim tlakom, slika 4.4.

Taloženjem se ispunjava prostor između vlakana, stvarajući kompozitni materijal u kojem je matrica infiltrirani, nataloženi materijal, a dispergirana faza su vlakna prekursora. [15]

CVI postupak je sličan depoziciji CVD postupku, pri čemu se taloženje formira kada reaktantni plinovi reagiraju na vanjskoj površini supstrata. [15]



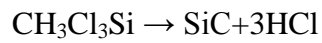
Slika 4.4 Postupak CVI (Chemical Vapour Infiltration) [15]

CVI se naširoko koristi za izradu kompozita s matricama od silicijevog karbida ojačane dugim (kontinuiranim) vlaknima silicijevog karbida.



Matrica silicijevog karbida (SiC) formirana je iz smjese metiltriklorosilana (MTS) kao prekursora i vodika kao nosećeg plina. [15]

Metiltriklorosilan se raspada u skladu s reakcijom:



Plinoviti klorovodik (HCl) se uklanja iz predsklopa difuzijom. [15]

Poroznost materijala postupno se smanjuje formiranom krutom keramikom.

Međutim, tijekom CVI postupka dostupnost unutarnjih prostora predsklopa postaje sve teža tijekom infiltracije parnih faza i formiranjem keramičke matrice. [15]

Konačna poroznost keramičkih kompozita proizvedenih CVI postupkom može doseći 10-15 %.[15]

## 5. ZAKLJUČAK

Keramički kompozitni materijali se pojavljuju kao materijali s brojnim prednostima u odnosu na konvencionalne materijale, nastaju spajanjem dva različita materijala i omogućavaju dobivanje svojstava koja su potrebna pri izloženosti materijala ekstremnim radnim uvjetima.

Ovim radom iznesen je kratak pregled kompozitnih keramičkih materijala te istaknuta njihova izvrsna postojanost na vrlo visokim temperaturama, mala masa, otpornost naglim promjenama temperatura, otpornost puzanju, izvrsna otpornost na trošenje i udarima čestica o površinu materijala.

Današnjih trendovi razvoja u automobilskoj industriji zasnivaju se na sve većoj upotrebi novijih vrsta materijala gdje posebno mjesto zauzimaju keramički kompoziti koji svojim karakteristikama pridonose smanjenju mase i dimenzija motora s ciljem smanjenja potrošnje goriva i smanjenju emisije štetnih plinova, a da se pritom ne smanjuje snaga motora te samim time performanse automobila u cijelosti.

Potvrđeno je da strojni dijelovi u automobilskoj industriji izrađeni od kompozitnih keramičkih materijala daju značajno bolja svojstva pri zahtijevanim radnim uvjetima u odnosu na dijelove izrađene od konvencionalnih materijala te isto tako da svojstva keramičkih kompozitnih materijala ovise o vrsti matrice i ojačanja te njihovom međusobnom rasporedu.

Nedostatak keramičkih kompozitnih materijala pronalazimo u njihovoj kompliciranoj proizvodnji te samim time i većim troškovima proizvodnje.

Keramički kompozitni materijali u automobilskoj industriji su još uvijek na početku svojeg razvoja te se njihova šira primjena očekuje u skoroj budućnosti.

## LITERATURA

- [1] Plastični kompoziti u automobilima, <https://hrcak.srce.hr/161324>, (1.2.2018.)
- [2] Kompoziti u automobilskoj industriji, <https://hrcak.srce.hr/78497>, (1.2.2018.)
- [3] Podloge za predavanje iz kolegija kolegija „Materijali 2“, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1496055312-0-materijaliiikompoziti2017.ppt](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1496055312-0-materijaliiikompoziti2017.ppt), (2.2.2018.)
- [4] Filetin, T.: Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala, Zagreb 2000.
- [5] Keramika u autoindustriji; spas za najveća naprezanja pri visokim temperaturama, [http://autoportal.hr/clanak/keramika\\_u\\_autoindustriji\\_spas\\_za\\_najveca\\_naprezanja\\_pri\\_visokim\\_temperaturama](http://autoportal.hr/clanak/keramika_u_autoindustriji_spas_za_najveca_naprezanja_pri_visokim_temperaturama), (2.2.2018)
- [6] Kovačiček, F., Žmak, I.: Metalni kompoziti, Suvremeni materijali i postupci, Zagreb, 2005.
- [7] Filetin, T., Marić, G.: Postupci proizvodnje metalnih i keramičkih kompozita, podloge za predavanja iz kolegija „Napredne tehnologije materijala“ [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1426605056-0-pred7.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426605056-0-pred7.pdf), (3.2.2018.)
- [8] Vadjon, V.: Tehnika motornih vozila, Zagreb, 2006.
- [9] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, Zagreb, 2012.
- [10] Becker, C.: Little, Strong, Black, <http://files.porsche.com/filestore/download/uk/none/christophorus-februarymarch2004-technology-PDF/default/90a6a8ab-3e9f-4325-83b7-229e642e25f8/porsche-Technology-Little,-Strong,-Black.PDF>, (5.2.2018.)
- [11] Hoffman, M. J.: Ceramic Applications in Automotive Industry, <http://ceramics.org/wp-content/uploads/2011/08/applications-ceramic-apps-auto-hoffmann.pdf>, (5.2.2018.)
- [12] Okada, A.: Ceramic technologies for automotive industry: Current status and perspectives, *Nissan Research Center, Nissan Motor Co., Yokosuka 237-8523, Japan, Materials Science and Engineering B 161 (2009) 182–187*
- [13] Hiroshi, K.: The application of ceramic-matrix composites to the automotive ceramic gas turbine, Petroleum Energy Center, Technology Research and Development, 3-9 Toranom 4-Chome, Mintao-ku, Tokyo 105, Japan, *Composites Science and Technology 59 (1999) 861-872*

- [14] Turbopunjači 2011, <http://autoportal.hr/clanak/turbopunjachi>, (6.2.2018.)
- [15] Fabrication of Ceramic Matrix Composites,  
[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=ceramic\\_matrix\\_composites](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=ceramic_matrix_composites)  
(8.2.2018.)
- [16] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Zagreb 2011.
- [17] FirestoneTires, [http://wwwcourses.sens.buffalo.edu/ce435/2001/Firestone\\_Tire/FirestoneTires\\_files/image006.png](http://wwwcourses.sens.buffalo.edu/ce435/2001/Firestone_Tire/FirestoneTires_files/image006.png) (5.2.2018.)
- [18] Brusne ploče, [http://www.brusnicentar.com/hr/smolno\\_i\\_keramicki\\_vezani\\_brusni\\_alati/brusne\\_ploce\\_keramika/kruzno\\_brusenje\\_ravnim\\_brusnim\\_plocama\\_med\\_u\\_siljcima/default.aspx](http://www.brusnicentar.com/hr/smolno_i_keramicki_vezani_brusni_alati/brusne_ploce_keramika/kruzno_brusenje_ravnim_brusnim_plocama_med_u_siljcima/default.aspx), (5.2.2018.)
- [19] Trabant, <https://en.wikipedia.org/wiki/Trabant>, (2.2.2018.)

## **PRILOZI**

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