

Kompoziti s metalnom matricom

Vuković, Danijel

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:759997>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ
STROJARSTVA

PROIZVODNO STROJARSTVO

DANIJEL VUKOVIĆ

KOMPOZITI S METALNOM MATRICOM

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2017

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ
STROJARSTVA

PROIZVODNO STROJARSTVO

DANIJEL VUKOVIĆ

KOMPOZITI S METALNOM MATRICOM

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Tihana Kostadin, mag.ing.stroj.

Karlovac, 2017

Izjava

Izjavljujem pod punom moralnom odgovornošću da sam završni rad izradio samostalno, isključivo znanjem stečenim na Veleučilištu u Karlovcu – Strojarski odjel, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentorice Tihana Kostadin, mag.ing.str., kojoj se još jednom srdačno zahvaljujem.

U Karlovcu, studeni 2017

Danijel Vuković

Zahvale

Zahvaljujem svom mentoru, Tihana Kostadin mag.ing.str. na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći tijekom izrade završnog rada.

Od srca zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj potpori tijekom studija.

SAŽETAK:

Kompozitni materijali sastoje se od dva ili više različitih materijala, koji su čvrsto međusobno povezani. Ovakvi materijali imaju svojstva materijala drugačija od njihovih pojedinih komponenti. Oni omogućavaju fleksibilnost u dizajnu, laku izradu dijelova složene geometrije, laki su, otporni na udar, otporni na zamor uslijed korištenja i imaju dobru kemijsku otpornost. Zbog ovih osobina četiri glavna sektora u kojima se slijedećih godina očekuje rast upotrebe su građevinska, automobilska, avio-industrija i industrija korištenja energije vjetra.

Automobilska industrija konstantno traži nove načine da smanji težinu vozila kako bi dodatno smanjili potrošnju goriva koja utječe, kako na isplativost vožnje, tako i na očuvanje životne sredine. Kompozitni materijali su rješenje jer mogu zamjeniti čelik i smanjiti težinu vozila i do 35%. Također, kompozitni materijali se mogu iskoristiti i kao zamjena dijelova od aluminija i inženjerske plastike. Zahvaljujući svojim karakteristikama očekuje se značajno povećanje udjela kompozitnih materijala u auto industriji u toku narednih pet do šest godina.

Europa je lider u korištenju naprednih ugljen-epoksi kompozita visokih performansi koji se već primjenjuju u trkačim i luksuznim automobilima, a poseban potencijal za rast primjene u auto industriji imaju kompoziti polipropilena.

U narednim godinama kompozit koji kao matricu ima polipropilen, bit će glavni materijal sa najvećim rastom upotrebe u europskoj auto i avio industriji. Kritični faktor uspjeha proizvođača ovih materijala će biti ne samo razvoj novih proizvoda, već i razvoj specifičnih proizvoda kojima će svojim klijentima pomoći u ostvarenju dugoročnih ciljeva kao što su poboljšanje performansi uz smanjenje troškova.

Kako globalna ekonomija nastavlja izlaziti iz krize, očekuje se sve brži razvoj i primjena ovih materijala, jer se njihovom upotrebom dobivaju proizvodi koji su lakši, jači, kvalitetniji i čišći.

U metalnoj osnovi nalazi se sitno dispergirana nemetalna faza u obliku čestica, ili vlakna. Za više radne temperature ojačala su: SiC, Al₂O₃, B ili W, C, Ta, Mo u obliku vlakana ili viskera.

Najnoviji korak naprijed, predstavlja obitelj matrica kompozita napravljenih od titanove legure, sa uključenim TiC česticama, čime se povećava čvrstoća pri visokim temperaturama, povisuje tvrdoća i modul elastičnosti.

Razvijene su superlegure od brzo skrućenog legiranog praha koji je HIP postupkom ili ekstruzijom kompaktan i superplastično valjan u trakasti oblik. Također, valja istaknuti razvoj Fe-Ni-Co ODS superlegura niske toplinske rastezljivosti, te Ni i Ni-Cr legura s dispergiranim česticama ThO₂.

Mehaničko legiranje je noviji postupak koji će vjerojatno omogućiti napredak u stvaranju materijala za primjenu na visokim temperaturama, npr. za uporabu u mlaznim motorima. Ovaj proces uključuje mljevenje mješavine metalnih prahova i vatrostalnog materijala kroz duže vrijeme tijekom kojeg se vatrostalne čestice lome i uključuju u metal. Legirani se prah zatim kompaktira, sinterira, i obično ekstrudira ili toplo valja.

Jedan od primjera primjene MMC je Al-SiC-Ni-grafit za dijelove automobilskih kočnica, kao zamjena za sivi lijev. Za olakšavanje uključivanja grafita u matricu dodaje se niklom prevučeni grafitni prah u rastaljenu aluminijsku leguru. Tijekom skrućivanja nikal reagira s aluminijem i stvara homogenu raspodjelu intermetalnih spojeva Ni-aluminida. Takav kompozit ima dobru toplinsku vodljivost i visoku otpornost prema trošenju.

KLJUČNE RIJEČI: Kompozitni materijali, Kompoziti s metalnom matricom, MIM - Injekcijsko prešanje metala.

SUMMARY:

COMPOSITE WITH METAL MATRIX

Composite materials consist of two or more different materials, which are firmly connected to each other. These materials have different material properties than its individual components. They allow flexibility in design, easy to create parts with complex geometry, they are easy, shock resistant, resistant to fatigue caused by the use and have good chemical resistance. Because of these four main sectors in which the coming years are expected to increase the use of the building, automotive, airline industry and the use of wind energy.

The automotive industry is constantly seeking new ways to reduce vehicle weight in order to further reduce fuel consumption, how to drive profitability, as well as the preservation of the environment. Composite materials are the solution because they can replace steel and reduce the weight of vehicles and up to 35%. Also, composite materials can be used as replacement parts from aluminum and engineering plastics. Thanks to its characteristics is expected to significantly increase the proportion of composite materials in the auto industry over the next five to six years.

Europe is a leader in the use of advanced carbon-epoxy composites, high performance that are already in use in racing and luxury cars, a special growth potential application in the auto industry have polypropylene composites. In the coming years as a matrix composite that has a polypropylene, will be the main material with the highest increase in the use of European automotive and aircraft industry. The critical success factor manufacturers of these materials will be not only the development of new products, but also the development of specific products which will help their clients in achieving long-term goals such as improving performance while reducing costs. As the global economy continues to emerge from the crisis, is expected to faster development and application of these materials, because of their use to obtain products that are lighter, stronger, better and cleaner.

The metal base is located dispersed non-metallic phase in the form of particles or fibers. For higher operating temperatures are strengthened: SiC, Al₂O₃, B or W, C, Ta, Mo in the form of fibers or viscera.

The latest step forward, the family of matrix composites made of titanium alloys, included TiC particles, thus increasing the strength at high temperatures, increases hardness and modulus of elasticity. Developed superalloys of rapidly solidified alloy powder is HIP process or by extrusion compacted and superplastic valid in ribbon form. Also, it should be noted the development of Fe-Ni-Co ODS superalloys low thermal expansion, and Ni and Ni-Cr alloys with dispersed particles ThO₂. The mechanical alloying is a new procedure that is likely to bring a breakthrough in the creation of materials for use at high temperatures, eg. for use in jet engines. This process involves grinding a mixture of metal powders and refractory material for a long time during which the refractory particles are broken and include the metal. Alloy powder is then compacted, sintered, and usually extruded or hot roller.

One example of the application of MMC's Al-SiC-Ni-graphite parts for automotive brakes, as a replacement for cast iron. To facilitate the inclusion of graphite in the matrix is added to the nickel coated graphite powder into the molten aluminum alloy. During solidification of nickel reacts with aluminum and creates a homogeneous distribution of intermetallic compounds Ni-aluminide. Such a composition has a good thermal conductivity and high wear resistance.

KEY WORDS : Composite materials, Composite with metal matrix, Metal Injection Moulding.

SADRŽAJ:

POPIS SLIKA
POPIS TABLICA
POPIS OZNAKA

1.	UVOD.....	1
2.	OPĆENITO O KOMPOZITIMA.....	2
3.	GRAĐA KOMPOZITA.....	3
4.	PRIMJENA KOMPOZITA.....	6
5.	KOMPOZITI S ČESTICAMA.....	9
	5.1. Uvodno o kompozitu s česticama.....	9
	5.2. Kompoziti s disperzijom (male čestice).....	9
	5.3. Primjena kompozita s malim česticama.....	10
	5.4. Kompoziti s velikim česticama.....	11
	5.5. Primjena kompozita s velikim česticama.....	12
6.	KOMPOZITI S VLAKNIMA.....	14
	6.1. Uvodno o vlaknima ojačani kompoziti.....	14
	6.2. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita.....	14
	6.3. Materijali komponenata kompozita.....	16
	6.4. Proizvodnja i prerada vlaknima ojačanih kompozita.....	18
7.	SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA.....	21
	7.1. Kompoziti s polimernom matricom.....	21
	7.2. Kompoziti s metalnom matricom.....	22
	7.3. Kompoziti s keramičkom matricom.....	22
	7.4. Ugljik – ugljik kompoziti (C – C).....	22
	7.5. Hibridni kompoziti.....	22
8.	STRUKTURNI KOMPOZITI.....	24
	8.1. Uvodno o strukturnim kompozitima.....	24
	8.2. Slojeviti kompoziti.....	24
	8.3. Sendvič konstrukcije.....	25
	8.4. Stanični kompoziti.....	25
9.	GRAĐA METALNIH KOMPOZITA.....	27
	9.1. Sastavni dijelovi metalnih kompozita.....	27
	9.2. Označavanje metalnih kompozita.....	27
10.	PREDNOSTI I NEDOSTACI METALNIH KOMPOZITA.....	28
11.	POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH KOMPOZITA.....	29
	11.1. Uvodno o postupcima proizvodnje metalnih kompozita.....	29
	11.2. Postupci u čvrstom stanju.....	29
	11.3. Visokotemperaturna sinteza.....	30
	11.4. Metalurgija praha.....	30
	11.5. Postupci u tekućem stanju.....	30
	11.5.1. Lijevanje u kalup.....	31
	11.5.2. Lijevanje miješanjem.....	31
	11.5.3. Lijevanje tiskanjem.....	31

11.5.4.	Lijevanje u poluskrućenom stanju.....	31
11.5.5.	Bestlačna infiltracija metala.....	31
11.6.	Nanošenje naštrcavanjem.....	34
11.7.	Brzo skrućivanje.....	35
11.8.	Fizikalno prevlačenje iz parne faze.....	36
12.	PODJELA KOMPOZITA S METALNOM MATRICOM.....	37
12.1.	Kompoziti s aluminijskom matricom.....	37
12.1.1.	Primjena kompozita s aluminijskom matricom.....	39
12.1.2.	Porast čvrstoće porastom udjela SiC.....	42
12.1.3.	Razlike u ljevaoničkoj praksi u lijevanju SiC _p /Al u odnosu na Al –legure.....	43
12.1.4.	Kompoziti ojačani viskerima.....	45
12.2.	Kompoziti s magnezijevom matricom.....	46
12.2.1.	Primjena metalnih kompozita s magnezijevom matricom.....	46
12.3.	Kompoziti s titanovom matricom.....	47
12.4.	Kompoziti s bakrovom matricom.....	47
12.5.	Kompoziti s matricom superlegura.....	48
12.5.1.	Primjena kompozita s matricom superlegura.....	48
13.	MIM – INJEKCIJSKO PREŠANJE METALA (e. Metal Injection Moulding).....	49
13.1.	Uvod.....	49
13.2.	Materijali koji se koriste u MIM tehnologiji i njihova svojstva.....	50
13.3.	Karakteristike MIM materijala.....	51
13.3.1.	Viskoznost materijala.....	51
13.3.2.	PVT i termalna svojstva feedstock-a.....	53
13.4.	MIM proces.....	54
13.4.1.	Načelo rada MIM postupka.....	55
13.5.	Primjena MIM-a.....	58
13.6.	Proizvodi MIM-a.....	58
14.	ZAKLJUČAK.....	61
	LITERATURA.....	63

Popis slika:

Slika 1. Podjela građe kompozita.....	3
Slika 2. Prikaz dobovanja kompozita.....	4
Slika 3. Prikaz podjele kompozita prema matrici.....	4
Slika 4. Prikaz podjele kompozita prema dodatku (ojačalu).....	4
Slika 5. Prikaz primjene kompozita u građevinarstvu.....	6
Slika 6. Prikaz primjene kompozita u građevinarstvu.....	6
Slika 7. Prikaz primjene kompozita u građevinarstvu.....	7
Slika 8. Prikaz primjene kompozita u građevinarstvu.....	7
Slika 9. Prikaz primjene kompozita u autoindustriji.....	7
Slika 10. Prikaz primjene kompozita u brodogradnji.....	7
Slika 11. Prikaz primjene kompozita u zrakoplovstvu.....	8
Slika 12. Prikaz primjene kompozita u sportu.....	8
Slika 13. Prikaz učinaka za ojačanja male čestice.....	9
Slika 14. Prikaz primjene metalnih matričnih kompozita s česticama.....	11
Slika 15. Prikaz tvrde i žilave pločice.....	12
Slika 16. Prikaz orijentacije vlakana u matrici.....	14
Slika 17. Prikaz orijentacije vlakana u matrici.....	15
Slika 18. Prikaz omjera „čvrstoće/duljine“.....	17
Slika 19. Prikaz omjera „čvrstoće/kuta“ između vlakana i opterećenja.....	17
Slika 20. Prikaz metode tkanje vlakana radi boljeg postizanja svojstava kompozita.....	18
Slika 21. Prikaz postupka proizvodnje vlakana – ugljičnih.....	18
Slika 22. Prikaz postupka oblikovanja naštrcavanjem.....	19
Slika 23. Prikaz postupka izrade proizvoda od vlakana ojačanih polimerom.....	19
Slika 24. Prikaz postupka izrade proizvoda nepromjenjivog p.p. – poltrudiranjem.....	20
Slika 25. Prikaz podjele strukturnih kompozita.....	24
Slika 26. Shematski prikaz konstrukcije (strukture) za primjer slojevitih kompliciranih kompozita (skije za snijeg).....	24
Slika 27. Shematski prikaz sendvič konstrukcije.....	25
Slika 28. Označivanje metalnih kompozita.....	27
Slika 29. Shema proizvodnje MMC-a PRIMEX bestlačnom infiltracijom.....	32
Slika 30. Shema proizvodnje elektroničkog elementa bestlačne infiltracije.....	33
Slika 31. Shema postupka naštrcavanjem.....	34
Slika 32. Postupak brzog skrućivanja.....	35
Slika 33. Klipnjača od Al-legure.....	39
Slika 34. Profil od Al-legure.....	40
Slika 35. Ventil automobilskog motora.....	40
Slika 36. Space shuttle.....	40
Slika 37. Hubble teleskop.....	41
Slika 38. Hodnin blok.....	41
Slika 39. Zamašnjak.....	41
Slika 40. Klip od kompozita Al- legure.....	41
Slika 41. Umeci mjenjačke kutije.....	46
Slika 42. Primjena superlegura u turbinskim motorima.....	48
Slika 43. Shematski dijagram MIM procesa.....	49

Slika 44. <i>Dijagram viskoznosti u funkciji temperature i brzine smicanja</i>	51
Slika 45. <i>Dijagram zavisnosti specifične zapremnine u funkciji pritiska i temperature(PVT)</i>	53
Slika 46. <i>Redoslijed operacije MIM tehnologije</i>	54
Slika 47. <i>Prikaz miješanja sirovine te granuliranje</i>	55
Slika 48. <i>Prikaz oblikovanja sirovine</i>	55
Slika 49. <i>Prikaz odstranjivanja veziva</i>	56
Slika 50. <i>Prikaz procesa sinteriranja</i>	57
Slika 51. <i>Klizni zatvarač</i>	58
Slika 52. <i>Brave automobila</i>	59
Slika 53. <i>Rebalans ručna kočnica</i>	59
Slika 54. <i>Troakar za postavljanje katetera za peritonealnu dijalizu</i>	60

Popis tablica:

Tablica 1. <i>Prednosti i mane kompozita s malim česticama kod primjene betona</i>	10
Tablica 2. <i>Prikaz usporedbe karakteristika polimernih kompozita s ostalim vrstama materijala</i>	16
Tablica 3. <i>Karakteristike nekih materijala primjenjivih za ojačanje vlaknima</i>	17
Tablica 4. <i>Prikaz udjela matrice i vlakana u metalnim kompozitima</i>	27
Tablica 5. <i>Prikaz koeficijenta viskoznosti materijala</i>	51
Tablica 6. <i>Prikaz Catamold standardnih materijala</i>	52

Popis oznaka:

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
m	kg	masa
m_i	kg	masa i-te komponente
K	-	kompozitni materijal
V_k	m^3	volumen kompozita
V_i	m^3	volumen konstituenata
V_p	%	volumni udio
ρ_k	kg/m^3	gustoća kompozita
ρ_i	kg/m^3	gustoća konstituenata
ρ_c	kg/m^3	gustoća kompozita
d	nm	promjer
D_p	nm	razmak između disperziranih čestica
D	mm	promjer šipki armature
σ_m	N/mm^2	naprezanje matrice
σ_c	N/mm^2	naprezanje čestice
χ	mm	istezanje
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća vlakana
E	N/mm^2	modul elastičnosti
t	h, min, sec	vrijeme
l	m	duljina
$\tilde{\eta}$	Pa·s	viskoznost
$\dot{\gamma}$	1/s	brzina smicanja
T	°C	temperatura

1. UVOD

U prirodi svuda oko nas se nalaze materijali. Da bi napravili neki od oblika u suvremenoj proizvodnji, ne možemo ništa napraviti bez materijala u nekom obliku. To su materijali sa određenim osobinama koji se upotrebljavaju u raznim konstrukcijama, strojevima, uređajima i ostalim proizvodima.

Važan aspekt u konceptu primjene materijala je da on otkriva mnogo jakih utjecaja između materijala, energije i okoline i da se sva tri faktora moraju razmotriti prilikom planiranja i tehnoloških procjenjivanja.

Znanost i tehnologija materijala je naziv, kojem je osnovni cilj razvoj materijala s poboljšanim svojstvima i razvoj novih materijala.

Kompoziti su rješenje za otklanjanje više poznatih nedostataka materijala (metala, legura, superlegura). Danas se primjenjuju kompjuterske tehnike u istraživanju i proizvodnji kompozita.

Najčešće se istražuje ponašanje kompozita sa lomljivom matricom (BMC) na visokoj temperaturi. Cilj ovih istraživanja je da se omogući proizvodnja složenih materijala sa kombinacijom mehaničkog ponašanja, stabilnosti, otpornosti, i mogućnosti obrade.

Model treba potvrditi ponašanje kompozita koje se odnosi na elastičnost i lom, uključujući i snagu, krtost i otpornost na lom. Prvo treba analitički opisati što se stvarno događa kod pojave loma u kompozitu. Analize se vrše na model sistemu, ali i na samim kompozitima.

Od tri osnovne grupe kompozita s obzirom na matricu (kompoziti s polimernom, keramičkom i metalnom matricom), biti će govora samo o **kompozitima s metalnom matricom (MMC – Metal Matrix Composites)**.

2. OPĆENITO O KOMPOZITIMA

2.1. Značenje riječi „kompozit“:

Composite – (latinski Compositum) – sastavljeno.

Composite - composed of separate parts; compound - sastoji od odvojenih dijelova, spoj.

Composite - made up of distinct components; compound - sastavljen od različitih komponenti; spoj.

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti su smjese dvaju ili više materijala različitih sastava (*metali, keramike, polimeri*) i/ili oblika (*vlakna, lamele, zrna*) formirane u cilju postizanja potrebne neuobičajene kombinacije svojstava (*čvrstoća, gustoća, krutost, tvrdoća, toplinska i električna vodljivost, ponašanje pri visokim temperaturama, težina, antikoroziivnost*).

Kompozitni materijali mogu biti: **metalno – metalni, metalno – keramički, metalno – polimerni, keramičko – polimerni, keramičko – keramički, polimerno – polimerni, polimerno – metalni.**

Sve to navedeno nas vodi do temeljne podjele kompozita na **metalne, keramičke i polimerne kompozite.**

Metali, keramika, odnosno polimeri su matrica kojoj se pridodaju najrazličitiji dodaci u cilju modificiranja svojstava matrice, odnosno postizanja cilja koji je naveden u definiciji da se dobije materijal svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponentna sama za sebe.

Za izradu niza dijelova/sustava (*industrije vozila, zrakoplova, sportske opreme, opreme za kućanstva, brodogradnja, vodoopskrba, sanacija otpadnih voda*) kompoziti mogu zamijeniti najčešće korištene metale – željezo i aluminij, pri čemu se često postižu bolje performanse dijelova/sustava. Na primjer, s kompozitima se postiže manja masa, u slučaju zamjene čelika za 60 - 80 %, u slučaju zamjene aluminijske 20 - 50 %.

2.2 Prednosti i svojstva kompozita

Neke od općih prednosti kompozitnih materijala pred konvencionalnim materijalima jesu slijedeće:

- 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.

Svojstva kompozita ovise o:

- Svojstvima konstituenata tj. matrice i ojačala,
- Veličini i raspodijeli konstituenata,
- Volumnom udjelu konstituenata,
- Obliku konstituenata,
- Prirodi i jakosti veza između konstituenata.

Osnovna svojstva skupina materijala koji se koriste kao matrica u kompozitima:

- metali – čvrsti, duktilni, u pravilu teški;
 - polimeri – slabi, jako duktilni, laki;
 - keramike – tvrde, krhke, stabilne pri visokim temperaturama, lake.
- Kompoziti mogu istovremeno postići:
 - visoku čvrstoću, visoku krutost i malu masu, otpornost, na različite medije i druge kombinacije svojstava.

3. GRAĐA KOMPOZITA

U građi kompozita se razlikuju:

- matrica – osnovni materijal određenih svojstava,
- dodatak (ojačala) – materijal čijim se dodavanjem postižu potrebne kombinacije svojstava kompozita.

Na slici (1) je prikazan grafički prikaz podjele građe kompozita gdje jasno možemo vidjeti da se dijeli na matricu i dodatak:



Slika 1: Podjela građe kompozita [1]

Zadaće matrica je da:

- 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, itd.

Zadaća ojačala je da budu nosivi element kompozita, tj da osiguraju:

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

Na slici (2) je prikazan grafički prikaz dobivanja kompozita, gdje možemo vidjeti da pojedina matrica (osnovni materijal) može biti u kombinaciji sa nekim dodatkom koji može biti vlakno ili čestica, a daje produkt - kompozit.

MATRICA + OJAČANJE (vlakna, čestice) = KOMPOZIT



Slika 2. : Prikaz dobivanja kompozita [3]

Kompoziti se mogu sistematizirati na više načina:

PREMA MATERIJALU MATRICE:

- Metalna – Oznaka je MMC za metalnu matricu,
- Keramička – Oznaka je CMC za keramičku matricu,
- Polimerna – Oznaka PMC za polimernu matricu.

Na slici (3) je prikazan grafički prikaz podjele kompozita prema matrici, gdje jasno možemo vidjeti da se kompoziti dijele na 3 podvrste matrice, a to su:



Slika 3: Prikaz podjele kompozita prema matrici [1]

PREMA DODATKU:

- Čestice,
- Vlakna,
- Strukturni kompoziti:
 - Slojeviti kompoziti – laminati
 - Sendvič konstrukcije.

Na slici (4) je prikazan grafički prikaz podjele kompozita prema dodatku, gdje jasno možemo vidjeti da se kompoziti dijele na 3 podvrste dodataka, a to su:



Slika 4.: Prikaz podjele kompozita prema dodatku (ojačalu) [1]

Kompoziti ojačani velikim česticama i disperzijom pripadaju skupini kompozita s česticama. Kod kompozita s disperzijom, povećana čvrstoća postiže se ekstremno malim česticama disperzirane faze, koje usporavaju gibanje dislokacija. Kod kompozita s velikim česticama mehanička svojstva su poboljšana djelovanjem samih čestica.

Efikasnost ojačanja najveća je kod kompozita s vlaknima (vlaknima ojačani kompoziti). Kod ovih kompozita opterećenje se prenosi i distribuira među vlaknima i to putem matrice koja je u većini slučajeva osrednje duktilna. Znatno ojačavanje ovih kompozita moguće je jedino ako je veza vlakno – matrica jaka. Prema njihovom promjeru vlaknasta ojačala dijelimo na viskere, vlakna i žice. Viskeri su vrlo tanke niti keramičkih monokristala, visoke čistoće koji imaju ekstremno velik omjer „duljina/promjer“.

Raspored vlakana bitno utječe na svojstva vlaknastih kompozita. Mehanička svojstva kompozita ojačanih kontinuiranim usmjerenim vlaknima su vrlo anizotropna. U smjeru vlakna čvrstoća je maksimalna dok je u smjeru okomitom na vlakna čvrstoća minimalna.

Kod kompozita ojačanih kratkim vlaknima vlakna mogu biti usmjerena ili slučajno raspoređena. Značajne vrijednosti čvrstoće i krutosti moguće je postići u uzdužnom smjeru kod spomenutih kompozita. Kod kompozita ojačanih slučajnim usmjerenim kratkim vlaknima svojstva su izotropna.

Vlaknima ojačani kompoziti se prema vrsti matrice mogu podijeliti na **polimerne, metalne i keramičke kompozite**.

U pravilu se kod kompozita s metalnom matricom s dodacima smanjuju trajne deformacije pri višim temperaturama, kod kompozita s keramičkom matricom povećava žilavost, a kod kompozita s polimernom matricom povećava čvrstoća i krutost. Najviše se koriste kompoziti s duromernom (polimernom) matricom, a još širu primjenu im ograničavaju poteškoće uz automatizaciju proizvodnje dijelova. Razvoj tehnologije oblikovanja prahova potiče šire korištenje kompozita s metalnom matricom. Primjena kompozita s keramičkom matricom najmanje je raširena.

Sljedeća skupina suvremenih kompozita su „ugljik-ugljik“ kompoziti. Riječ je o kompozitima koji su načinjeni ulaganjem ugljičnih vlakana u piroliziranu ugljičnu matricu.

Značajni su hibridni kompoziti kod kojih se susreće ojačanje s barem dva različita tipa vlakana.

Uobičajeno je da se vlaknima ojačani kompoziti dizajniraju s ciljem postizanja neobičnih kombinacija čvrstoće, krutosti, temperaturne postojanosti te male mase. **Zakon miješanja** prikladan je za određivanje ponašanja brojnih jednostavnih vlaknima ojačanih materijala.

Strukturne kompozite možemo podijeliti na dvije osnovne vrste. Riječ je o slojevitim kompozitima (tzv. laminatima) i sendvič konstrukcijama. Svojstva laminata su prividno izotropna u dvjema dimenzijama (površinski gledano). To je omogućeno slaganjem više slojeva visoko anizotropnog kompozita. Čvrstoća u svakom pojedinom smjeru postiže se orijentiranjem svakog sloja posebno. Sendvič konstrukcije se sastoje od dva čvrsta i kruta sloja laminata između kojih se u pravilu nalazi porozna (šuplja) jezgra. Na taj način se postiže relativno visoka čvrstoća i krutost uz relativnu nisku gustoću.

4. PRIMJENA KOMPOZITA

Kao primjeri kompozita mogu se navesti beton, smjesa cementa i šljunka kompozit je s česticama; polimer ojačan staklenim vlaknima koji se sastoji od staklenih vlakana ugrađenih u neki polimer, kompozit je s vlaknima (vlaknima ojačan kompozit); ukočeno drvo (tzv. "šperploča"), koja se sastoji od naizmjeničnih slojeva furnira drveta je slojeviti kompozit.

Ukoliko su dodaci raspoređeni ravnomjerno, kompoziti imaju izotropna svojstva; kompoziti s vlaknima mogu biti izotropni, ortotropni ili anizotropni; slojeviti kompoziti uvijek su anizotropnih svojstava.

Za primjenu u strojarstvu, brodogradnji i zrakoplovstvu prikladno je navesti također i neke druge kompozite koje možemo svrstati u navedene podjele (prema materijalu matrice, odnosno prema obliku dodataka). Značajne su tzv. sendvič konstrukcije pri gradnji kojih se između ostalog rabe odabrani slojeviti kompoziti ili samo listovi materijala (folije, limovi) kombinirani s odgovarajućim poroznim materijalima (pjenama) različitog porijekla, te papira, aluminijska ili nekog drugog materijala oblikovanog kao pčelinje saće.

Primjena u elektrotehnici:

električna izolacija dijelova, izolacija od utjecaja elektromagnetskih valova, podloge sklopki, kućišta, poklopci, satelitske antene, radarske antene, kupole, vrhovi TV tornjeva, kanali za kablove, vjetrenjače.

Primjena u građevinarstvu:

stambene jedinice, dimnjaci, betonske konstrukcije, različiti pokrovi (kupole, prozori), bazeni za plivanje, pročelja zgrada, profili, unutarnji zidovi, vrata, namještaj, kupaone, telefonske kabine

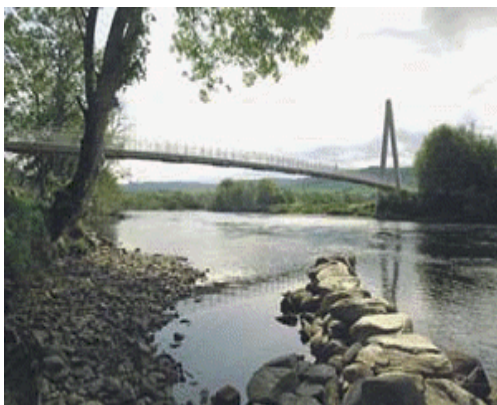
Na slikama (5,6,7,8,) se vidi u koje se sve vrste građevine može primjeniti kompozitne materijale, gdje također pokazuje veliku raznolikost primjene od visokogradnje do niskogradnje:



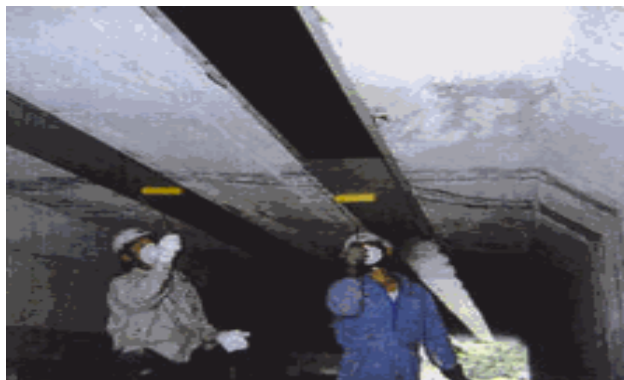
Slika 5.: Prikaz primjene kompozita u građevinarstvu [4]



Slika 6.: Prikaz primjene kompozita u građevinarstvu [4]



Slika 7.: Prikaz primjene kompozita u građevinarstvu [4]



Slika 8.: Prikaz primjene kompozita u građevinarstvu [4]

U transportu cestama:

dijelovi karoserije, kompletne karoserije, volani, branici, rešetke hladnjaka, vratila transmisije, opruge ogibljenja, spremnici za plin, šasijske, zglobovi ogibljenja, navlake, kabine, sjedišta, autocisterne, hladnjače, prikolice

Na slici (9) su prikazane slike primjene kompozita u automobilskoj industriji, gdje također imaju široku primjenu u raznim dijelovima automobila:



Slika 9: Prikaz primjene kompozita u autoindustriji [4]

U transportu željeznicom:

čeonni dijelovi lokomotiva, konstrukcijski dijelovi vagoni, vrata, sjedišta i unutarnje pregrade putničkih vagona, kućišta ventilatora, kabine žičara

U transportu morem:

brodovi lebdjelice (hoverkrafti), brodovi za spašavanje, patrolni brodovi, male ribarice, ribarski brodovi, oprema za iskrcaj, minolovci, regatne brodice, brodice za zabavu, kanui

Na slici (10) su prikazane slike primjene kompozita u brodogradnji, gdje također imaju široku primjenu u raznim dijelovima samog broda:



Slika 10.: Prikaz primjene kompozita u brodogradnji [4]

U zračnom transportu:

konstrukcijski dijelovi putničkih zrakoplova, jedrilice, kupole, usmjerivači zraka, krilca, vertikalni stabilizatori, krakovi elise helikoptera, propeleri, vratila transmisije, diskovi kočnica zrakoplova, svemirske letjelice

Na slici (11) su prikazane slike primjene kompozita u zrakoplovstvu, gdje također imaju široku primjenu u raznim dijelovima samog aviona:



Slika 11.: Prikaz primjene kompozita u zrakoplovstvu [4]

Opće strojarstvo:

zupčanci, ležajevi, zaštitni pokrovi, tijela dizalica, ruke robota, naplatci, letve za tkanje, cijevi, dijelovi ploče za crtanje, boce za komprimirani plin, cijevi za morske platforme, radijalni pneumaci

U sportu i rekreaciji:

reketi za tenis i skvoš, štapovi za pecanje, skije, štapovi za skok preko motke, jedrilice, daske za jedrenje, daske za surfanje, daske za koturanje, lukovi i strijele, atletska koplja, zaštitne kacige, okvir bicikla, oprema za golf, oprema za sportsko veslanje

Na slici (12) su prikazane slike primjene kompozita u sportu, gdje također imaju široku primjenu u raznim sportovima poput tenisa, jedrednja, atletike, golfa, te primjerenu sportsku opremu uz određeni sport.:



Slika 12.: Prikaz primjene kompozita u sportu [4]

5. KOMPOZITI S ČESTICAMA

5.1. Uvodno o kompozitu s česticama

Kod kompozita s česticama diskretne jednolične raspoređene čestice – tvrd i krhak materijal, obavijene su mekanijom i duktilnijom matricom.

Obzirom na veličinu čestice i način na koji čestice utječu na svojstva kompozita, kompozite s česticama možemo podijeliti na dvije velike skupine:

- Kompozite s disperzijom
- Kompozite s velikim česticama

U vezi s time potrebno je definirati kriterij za ovu podjelu. Orijehtacijski to može biti promjer čestica:

- male čestice (za disperzije) $< 0,1 \mu\text{m} \dots 1 \mu\text{m} <$ velike čestice

Neka se svojstava kompozita s česticama mogu predvidjeti na temelju zakona o očuvanju mase. Na primjer, gustoća je kompozita:

$$m_K = \sum m_i \rightarrow V_K \cdot \rho_K = \sum V_i \cdot \rho_i$$

gdje je: K – kompozit

i – i-ta komponenta

5.2. Kompoziti s disperzijom (s malim česticama)

Male čestice dispergirane su u matrici, a promjeri su im 10 - 250 nm. Svojom prisutnošću male čestice ometaju gibanje dislokacija matrice, te je na taj način ojačavaju. Potrebna je samo mala količina dispreziranog materijala – do 15%

Glavne varijable u određivanju učinkovitosti disperzije jesu:

- veličina čestice, d
- volumni udio, V_p
- razmak između dispreziranih čestica, D_p

Odnos između tih varijabli je:

$$D_p = (1 - V_p)2d^2 / V_p$$

Kompoziti s dodanim malim česticama se zbog toga nazivaju disperzijski ojačanim kompozitima. Za učinkovito ometanje gibanja dislokacija matrice moraju dispergirane male čestice biti tvrde (oksidi metala), a učinak ojačanja osim o tvrdoći ovisi i o:

Na slici (13) je prikazana podjela karakteristika za bolji učinak ojačanja malih čestica, gdje možemo vidjeti da osim tvrdoće, učinak ojačanja ovisi i o:

veličinama oblicima količinama raspodjelama

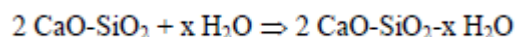
Slika 13. : Prikaz učinaka za ojačanja male čestice [7]

U materijalu matrice se dispergirane čestice ne smiju otapati niti s njom kemijski reagirati. S druge strane male čestice moraju biti čvrsto povezane s materijalom matrice. Dodane velike čestice ne mogu učinkovito spriječiti gibanje dislokacija matrice, te na taj način ne ojačavaju matricu. Pri opterećivanju kompozita se jednako deformiraju matrica i dodane čestice, ali se u matrici i dodanim česticama javljaju različita naprezanja ($G_m = G_c$).

5.3. Primjena kompozita s malim česticama

BETON

Beton formiraju keramička matrica (*relativno skupa*) i dodane krupne keramičke čestice (*relativno jeftine*). Matrica koja povezuje čestice naziva se **cementom** (*portland-cement*), a kao dodatak se koriste pijesak i šljunak. Za postizanje optimalne čvrstoće i oblikovanja smjesa mora sadržati odgovarajuće udjele dodatka, u pravilu, 60 - 80 %. Gusto pakirana struktura i dobri uzajamni kontakti postižu se s dvije dimenzije dodatka – sitnije čestice pijeska popunjavaju prostore između krupnijih čestica šljunka. Formiranoj smjesi se dodaje odgovarajuća količina vode. Vezivanje je nepotpuno ako je količina dodane vode premala, a ako je prevelika, formira se prekomjerno porozan beton. Tijekom skrućivanja betona odvija se kemijska reakcija:



Tablica 1.: Prednosti i mane kompozita s malim česticama kod primjene betona [5]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none"> • niska cijena • formiranje iz komponenata i lijevanje na gradilištu • skrućivanje pri atmosferskim uvjetima, a i pod vodom 	<ul style="list-style-type: none"> • mala R_m (10 -15 puta manja od $R_{m,v}$) • krhkost • velike ρ, i λ • pucanje površinskih slojeva pri vlaženje i smrzavanju

Čvrstoća betona se povećava:

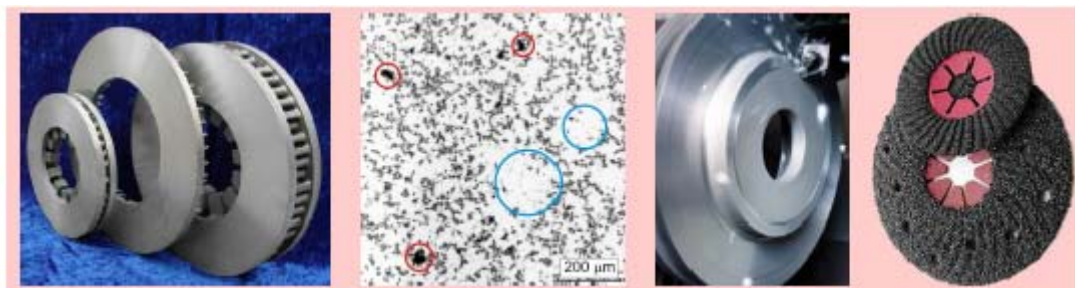
- ojačanjem čeličnom "armaturom" – žicama ($D < 12 \text{ mm}$), šipkama ($D > 12 \text{ mm}$), mrežama i profilima.
Armature se postavljaju u beton prije njegovog skrućivanja;
- uvođenjem prednapetosti – postavljena se čelična armatura prije skrućivanja optereti na vlak (*ispod granice elastičnosti čelika*). Nakon skrućivanja betona armatura se rastereti ona pri svom skupljanju povlači za sobom skrućeni beton uspostavljajući u njemu trajnu tlačnu napetost.

Metalni kompoziti s česticama

Metalnoj se matrici (*mala ρ , velika χ*) za postizanje potrebnih svojstava dodaju čestice keramike (*velika R_m, t , HV , E i otpornost na trošenje, a ta svojstva zadržavaju i na povišenim temperaturama*).

Najčešće se kao matrice koriste Al legure za lijevanje s dodatkom 10 - 30 % volumnih SiC ili Al_2O_3 čestica veličina 10 - 20 μm . Formirani su kompoziti jeftini, mogu se lijevati i zavarivati, a relativno su im dobre obradivosti plastičnom deformacijom i rezanjem. Koriste se za izradu dijelova kočnica, motora i mjenjača motokotača i automobila.

Na slici (14) su prikazane slike primjene metalnih kompozita s česticama, gdje možemo vidjeti da imaju široku primjenu metalnih dijelova u autoindustriji, tj. kod transporta cestovnim prometom.



Slika 14.: Prikaz primjene metalnih kompozita s česticama [7]

5.4. Kompoziti s velikim česticama

Ovi kompoziti sadrže veće udjele velikih čestica koje izravno ne djeluju na sprečavanje gibanja dislokacija. Takvi kompoziti proizvode se u cilju postizanja takvih kombinacija svojstava kojima nije prvenstvena svrha osiguranja čvrstoće.

ZAKON MIJEŠANJA

Prema ovom zakonu svojstva kompozita s česticama ovise o relativnim udjelima pojedinih konstituenata. Npr. gustoća takvog kompozita može se izračunati s pomoću izraza:

$$\rho_c = \sum V_i \rho_i$$

gdje su:

- ρ_c - *gustoća kompozita,*
- ρ_i - *gustoća konstituenata,*
- V_i - *volumni udio konstituenata.*

Neka svojstva, kao npr. tvrdoća i čvrstoća ne mogu se predvidjeti primjenom zakona miješanja.

5.5. Primjena kompozita s velikim česticama

Abrazivi

Brusne i rezne ploče proizvode se iz dodatih, manje ili više sitnih, vrlo tvrdih i krhkih reznih čestica aluminijevog oksida (Al_2O_3), silicij karbida (SiC) i kubičnog bor nitrida (BN), povezanih staklenom ili polimernom matricom u krutu ploču. Dijamantne se čestice povezuju metalnom matricom. Kod brusnih i reznih ploča moraju čestice i matrica biti dobro uzajamno povezane (*kako se čestice opterećene silama rezanja ne bi otkidale od matrice*), a njihovi udjeli takvi da istrošene čestice mogu zamijeniti nove čestice iz dubljih slojeva ploča.

Tvrđi metal

Tvrde metale formiraju čestice tvrde keramike, na primjer WC, raspršene u metalnoj matrici, na primjer Co. Sam WC je vrlo tvrd, ali krhak, te se od njega ne mogu izrađivati pločice za obradu metala rezanjem. Pri proizvodnji volfram-karbidnih/kobaltnih pločica za rezanje metala:

- mješaju se prahovi WC i Co,
- formirana smjesa se preša u kompaktne pločice i
- pločice se griju iznad tališta Co.

Nakon hlađenja se dobiva konačni proizvod – tvrda i žilava pločica.

Na slici (15) je prikazana slika konačnog proizvoda koji se dobiva hlađenjem nakon procesa obrade koji je ranije opisan, gdje možemo vidjeti svojstvo tvrdoće i žilavosti pločice.



Slika 15.: Prikaz tvrde i žilave pločice [7]

Električni kontakti

Nedovoljno kvalitetni električni kontakti dijelovi (*sklopke, releji*) ostvaruju slabe električne kontakte, griju se, troše i iskre. Kako za izradu dovoljno kvalitetnih električnih kontaktnih dijelova nema homogenog materijala pogodnih svojstava, potrebno je formirati kompozit. Kompozit pogodnih svojstava se formira s metalnom matricom od Ag koja povezuje metalni dodatak – čestice W. Ag ima oko 4 puta manju e_0 i oko 3 puta veću χ od W, a W oko 30 puta veću $R_{m,t}$, oko 15 puta veću HV , te oko 3 puta višu t od Ag. U proizvodnji električnih kontaktnih dijelova, prvo se pod tlakom, pri visokoj temperaturi, izrađuju pločice od praha W. Formirane se pločice uranjaju u talinu Ag koja popunjava raspoložive pore.

Polimerni kompoziti s česticama

Dodatkom se mogu poboljšati različita svojstva polimernih matrica, najčešće smanjiti cijenu, dodatkom jeftinijih čestica $CaCO_3$, SiO_2 , gline ili staklenih kuglica.

Ljevački kalupi i jezgre

Kalupi i jezgre koji se rabe pri lijevanju metala izrađuju se od kremenog pijeska čija zrna su povezana organskim i anorganskim smolama kao vezivom. Pijesak je vatrostalan materijal koji slabo provodi toplinu te ne reagira s rastaljenim metalom. Kao uobičajena veziva rabe se fenolne, uretanske i furanske smole, te natrijev silikat (tzv. "vodeno staklo").

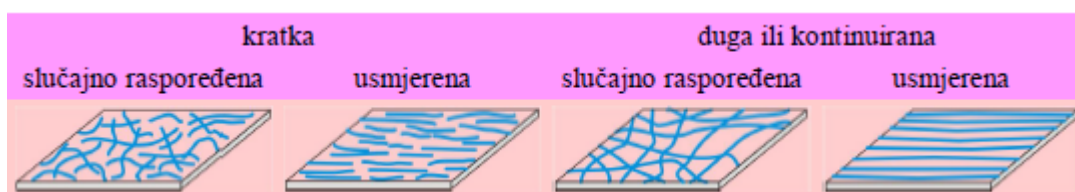
6. KOMPOZITI S VLAKNIMA

6.1. Uvodno o vlaknima ojačanim kompozitima

U matricu kompozita s vlaknima se dodaju jednodimenzionalna vlakna različitih duljina i orijentacija. Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do izražaja poboljšanje 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.

Kratka, slučajno orijentirana staklena vlakna obično su prisutna kod tzv. „fiberglass“. Jednosmjerno raspoređivanje konstituiranih vlakana može se primijeniti za izradu proizvoda promišljenih anizotropnih svojstava.

Na slici (16) je prikazano nekoliko slika orijentacije vlakana, gdje je glavna podjela na kratka i duga(kontinuirana) vlakana u matrici, te kratka i duga vlakana možemo podijeliti na još nekoliko podvrsta, također i na slici (17) možemo vidjeti raznovrsne orijentacije vlakana.



Slika 16. : Prikaz orijentacije vlakana u matrici [8]

6.2. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita

Pri konstruiranju vlaknima ojačanim kompozitima potrebno je uzeti u obzir brojne faktore:

Omjer „duljina/promjer“

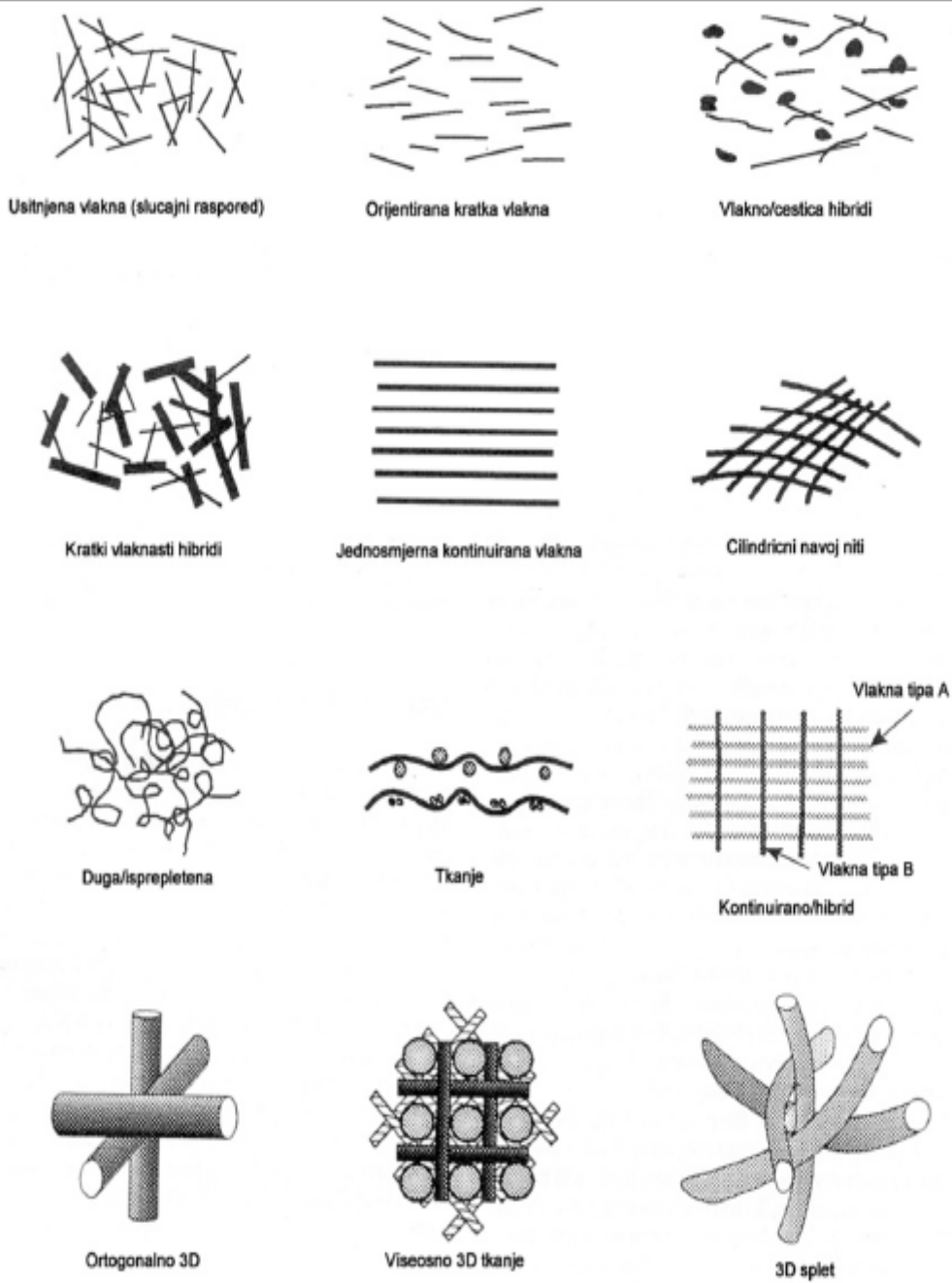
Kontinuirana vlakna koja vode do najboljih svojstava, često se teško proizvode te također teško ugrađuju u matricu. Diskontinuirana vlakna s velikim omjerom „duljina/promjer“ znatno se lakše ugrađuju u matricu dovodeći tako do materijala visoke krutosti i čvrstoće.

Volumni udio vlakana

Veći volumni udio vodi do povećanja čvrstoće i krutosti kompozita. Gornja granica od oko 40 % određena je sposobnošću, odnosno mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice.

Usmjerenost vlakana

Jednosmjerna vlakna imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima. Svojstva kompozita mogu biti vrlo anizotropna. Umjesto u jednom smjeru vlakna možemo polagati ortogonalno ili pod nekim drugim kutom, time ćemo žrtvovati maksimalnu čvrstoću, ali ćemo postići jednoličnija svojstva kompozita.



Slika 17.: Prikaz orijentacije vlakana u matrici [8]

6.3. Materijali komponenata kompozita

Matrica i vlakna

Materijal matrice u pravilu mora ispuniti više funkcija, od kojih su neke ključne za postizanje zadovoljavajućih performansi dijela/sustava.

Matrica:

- objedinjava vlakna i na njih prenosi opterećenje, te osigurava oblik i krutost konstrukcije,
- izolira pojedinačna vlakna koja se ne mogu samostalno opterećivati, te se na taj način usporava širenje pukotine,
- osigurava dobru kvalitetu površine, te na taj način potiče proizvodnju dijelova u konačnom obliku ili blisko konačnom obliku,
- osigurava zaštitu ojačavajućih vlakana od kemijskih utjecaja i mehaničkih oštećivanja,
- svojom duktilnošću polimerna matrica (*plastomeri*) povećava žilavost kompozita,
- svojim svojstvima i kompatibilnošću s vlaknima u velikoj mjeri utječe na vid oštećenja.

Osnovni su zadaci vlakana:

- prihvata opterećenja – kod konstrukcijskih kompozita vlakna nose 70 ÷ 90 % opterećenja,
- osiguranje čvrstoće, krutosti, toplinske stabilnosti,
- osiguranje električne vodljivosti ili izolacije, ovisno o namjeni kompozita.

Najšire se koriste kompoziti s polimernom matricom i vlaknima te treba usporediti njihove karakteristike s karakteristikama tipičnih predstavnika drugih vrsta materijala.

Tablica 2.: Prikaz usporedbe karakteristika polimernih kompozita s ostalim vrstama materijala [6]

Materijal	$\rho/\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$	$E/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$R_m/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	$(E/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$(R_m/\rho)/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$t_{\text{raz}}/^\circ\text{C}$
Metali						
lijevano Fe	7,0	100	0,14	14,3	0,02	230÷300
uglični čelik	7,8	205	0,57	26,3	0,073	500÷650
legirani Al	2,7	73	0,45	27,0	0,17	150÷250
Polimeri						
poliamid 6	1,15	2,9	0,082	2,52	0,071	75÷100
polipropilen	0,9	1,4	0,033	1,55	0,037	50÷80
epoksid	1,25	3,5	0,069	2,8	0,055	80÷215
Keramike						
Al ₂ O ₃	3,8	350	0,17	92,1	0,045	1425÷1540
MgO	3,6	205	0,06	56,9	0,017	900÷1000
K , kratka vlakna						
epoksid / 35 % staklo	1,90	25	0,30	8,26	0,16	80÷200
poliester / 35 % staklo	2,00	15,7	0,13	7,25	0,065	80÷125
poliamid / 35 % staklo	1,62	14,5	0,20	8,95	0,12	75÷110
K , usmjerenjena vlakna						
epoksid / 45 % staklo	1,81	39,5	0,87	21,8	0,48	80÷215
epoksid / 61 % ugljik	1,59	142	1,73	89,3	1,08	80÷215
epoksid / 53 % aramid	1,36	63,6	1,1	47,1	0,81	80÷215

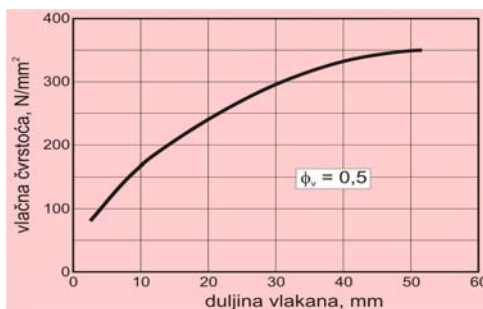
Tablica 3: Karakteristike nekih materijala primjenjivih za ojačanje vlaknima [6]

Materijal	$\rho/\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$	$E/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$R_m/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-2}$	$(E/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$(R_m/\rho)/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Viskeri					
grafit, C	2,2	700	20,7	318	9,41
silicij-nitrid, Si_3N_4	3,2	350÷380	5÷7	109÷118	1,56÷2,2
aluminij-oksidi, Al_2O_3	4,0	700÷1500	10÷20	175÷375	2,5÷5,0
silicij-karbid, SiC	3,2	480	20	150	6,25
Vlakna					
aluminij-oksidi	3,95	379	1,38	96	0,35
aramid (Kevlar 49)	1,44	131	3,6÷4,1	91	2,5÷2,85
ugljik	1,78÷2,15	228÷724	1,5÷4,8	106÷407	0,70÷2,70
E-staklo	2,58	72,5	3,45	28	1,34
bor	2,57	400	3,6	156	1,40
silicij-karbid	3,0	400	3,9	133	1,30
PE-UHMW (Spektra 900)	0,97	117	2,6	121	2,68
Metalna žica					
visoko-čvrsti čelik	7,9	210	2,39	26,6	0,30
molibden	10,2	324	2,2	31,8	0,22
volfram	19,3	407	2,89	21,1	0,15

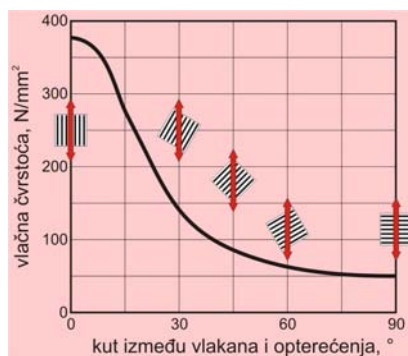
Najšire se koriste staklena vlakna – E-staklo ($w_i/\% = 52 - 56 \text{ SiO}_2, 16 - 25 \text{ CaO}, 12 - 16 \text{ Al}_2\text{O}_3, 5 - 10 \text{ B}_2\text{O}_3$). S-staklo ($w_i/\% = 64 - 66 \text{ SiO}_2, 24 - 26 \text{ Al}_2\text{O}_3, 9 - 11 \text{ MgO}$).

Uobičajeni su promjeri vlakana $10 \div 150 \mu\text{m}$. Karakteristike kompozita s vlaknima u velikoj mjeri ovise i o duljini vlakana i o kutu pravca pod kojim djeluje opterećenje u odnosu na pravac vlakana. Na primjer, kod epoksidne matrice s E staklenim vlaknima.

Na slici (18 i 19), možemo vidjeti grafički prikaz svojstava vlakana, gdje **slika (18)** prikazuje omjer između duljine vlakana i vlačne čvrstoće, a na **slici (19)** je prikazan omjer između vlačne čvrstoće i kuta između vlakana i opterećenja.



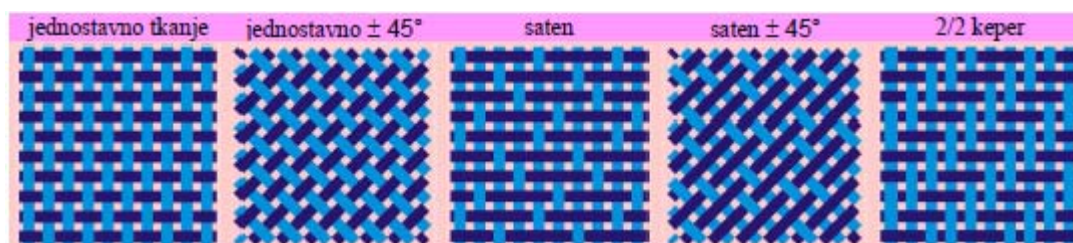
Slika 18.: Prikaz omjera „čvrstoće/duljina“ [6]



Slika 19.: Prikaz omjera „čvrstoće/kuta između vlakana i opterećenja“ [6]

Veća količina vlakana u pravilu povećava R_m i E formiranog kompozita – pravilo ne vrijedi za $\Phi_v > 80\%$, jer pri tako visokim postocima nisu sva vlakna okružena s matičnim materijalom. Poboljšanje svojstava kompozita postiže se s pogodnim tkanjima vlakana, na primjer:

Na slici (20) su prikazane neke od metoda tkanja vlakana, gdje se s pogodnim tkanjima vlakana dobiju bolja svojstva, jedne od metoda su i slijedeća:



Slika 20: Prikaz metoda tkanja vlakana radi boljeg postizanja svojstava kompozita [6]

6.4. Proizvodnja i prerada vlaknima ojačanih kompozita

Proizvodnja vlakana

Velika „vlakna“, kao npr. čelične šipke za armiranje, izrađuju se valjanjem. Finija „vlakna“, kao što su npr. žice, izrađuju se vučenjem. Tako se dolazi do očvrstnutog materijala zadovoljavajuće duktilnosti. Primjeri materijala od kojih se mogu izvlačiti žice (vlakna) malog promjera su: **volfram, berilij, nehrđajući čelik, poliamid.**

Na slici (21) je prikazana proizvodnja ugljičnih vlakana, gdje postupcima poput rafitiziranja, karboniziranja, te oksidiranja možemo dobiti razne čvrstoće i oblike ugljika.



Slika 21: Prikaz postupka proizvodnje vlakana – ugljičnih [9]

Proizvodnja kompozita

Kako bi se postigla optimalna svojstva, vlakna trebaju u matricu biti uložena na odgovarajući način (raspored, razmak). Diskontinuirana vlakna mogu se miješati s materijalom matrice kako bi se postiglo ili slučajno ili preferirano orijentiranje. Kontinuirana vlakna uobičajeno se raspoređuju jednosmjerno (npr. trake), ortogonalno (npr. tkanine) i namotavanje.

- **LIJEVANJE**

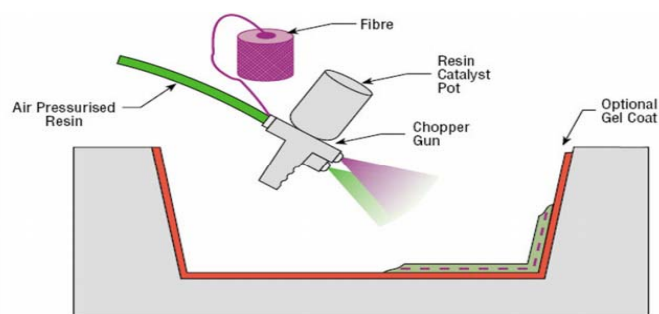
Postupci lijevanja prisiljavaju kapljevину da se raspoređuju oko vlakana. Grubi primjer je sipanje betona oko odgovarajuće raspoređenih čeličnih štapova za ojačanje.

- **OBLIKOVANJE NAŠTRCAVANJEM**

Vlakno ulazi u ručni pištolj u kojem se sječe na manje komadiće i dodaje u struju tekuće smole. Takva se mješavina naštrcava u kalup gdje se umrežava (skrućuje) u atmosferskim uvjetima.

Kao materijal matrice se uglavnom koriste poliesteri, dok se za ojačanje koristi isključivo stakleni roving.

Na slici (22) može se vidjeti slikoviti prikaz postupka dobivanja kompozita naštrcavanjem.

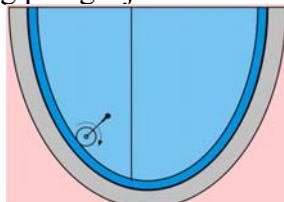


Slika 22.: Prikaz postupka oblikovanja naštrcavanjem [9]

- **RUČNO POLAGANJE**

Proizvodi od vlaknima ojačanih polimera prvobitno su izrađivani postupkom ručnog polaganja, a postupak se i danas koristi u izradi plovila i modela.

Na slici (23) može se vidjeti slikoviti prikaz postupka dobivanja kompozita od vlakana ojačanih polimerom, postupkom ručnog polaganja.



Slika 23: Prikaz postupka izrade proizvoda od vlakana ojačanih polimerom [9]

Kod ručnog polaganja se na površine izrađenog kalupa nanose:

- odvajač (olakšava vađenje proizvoda iz kalupa)
- materijal matrice.

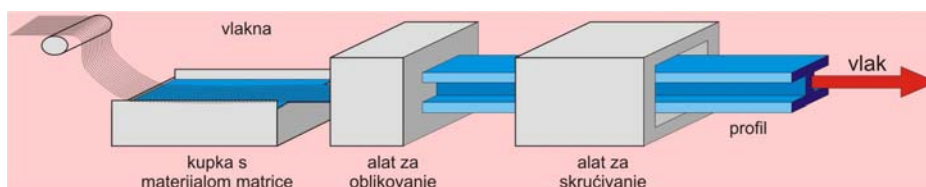
Potom se polaže sloj ojačanja – pogodno oblikovanih vlakana (*npr. saten tkanja staklenih vlakana*) i ponovo se valjkom nanosi sloj materijala matrice uz uklanjanje pora (*zrak*) valjanjem. Nadalje se izmjenično nanose slojevi ojačanja i matrice sve do postizanja zahtjevane debljine stijenke proizvoda.

Kod suvremenih se postupaka proizvodi od vlaknima ojačanih polimera oblikuju u dvostrukim kalupima ili u zatvorenim kalupima s uložnim pogodno formiranim zračnim jastucima.

- **POLTRUDIRANJE**

Dugi proizvodi nepromjenjivoga poprečnog presjeka (*štapovi, profili, cijevi*) izrađuju se poltrudiranjem.

Na slici (24) je prikazan postupak dobivanja kompozita kod matrice nepromjenjivog poprečnog presjeka poput štapova, cijevi i sl. postupkom poltrudiranja.



Slika 24.: Prikaz postupka izrade proizvoda nepromjenjivog p.p. – poltrudiranjem [9]

7. SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA

7.1. Kompoziti s polimernom matricom

Kompoziti s polimernom matricom sastavljeni su od polimerne smole kao matrice s vlaknima kao komponentom za ojačavanje. Pojam smola u ovom kontekstu koristi se za obilježavanje polimera- tvari velike molekularne mase koji treba ojačati.

Ovi materijali rabe se u najvećoj mogućoj raznolikosti primjene kompozita i to s obzirom na količinu, obzirom na svojstva pri sobnoj temperaturi, lakoću proizvodnje, te cijenu.

Najraširenije i najjeftinije polimerne smole su **poliesteri i vinil esteri**. Ovi materijali matrice prvenstveno se primjenjuju kod staklenim vlaknima ojačanih kompozita. Ove smole imaju bolja mehanička svojstva te veću postojanost prema vlazi (u usporedbi s nezaićenim poliesterskim i vinilesterskim smolama).

Obzirom na prevladavajuću ulogu vlakana kao dodataka (ojačala) kod polimernih kompozita dijelimo na:

- staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti;
- ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti;
- aramidnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti;
- ostali vlaknasti materijali za ojačanje;

• **STAKLENIM VLAKNIMA OJAČANI POLIMERNI KOMPOZITI**

Staklenim vlaknima ojačan polimerni kompozit sastoji se od staklenih vlakana, konstituiranih ili diskontinuiranih, koja se nalaze u polimernoj matrici.

Ovaj tip kompozita proizvodi se u najvećim količinama. Sastav stakla koje se može izvlačiti u vlakna (često nazvano E-staklo) promjera od 3 do 20 μm .

Postoji nekoliko ograničenja obzirom na ovu skupinu materijala. Usprkos visoke čvrstoće vlakna nisu kruta te ne mogu pružiti krutost koja je potrebna za neke primjene (npr. dijelovi konstrukcije zrakoplova i mostova). Većina staklenim vlaknima ojačanih polimernih kompozita imaju temperaturu primjene do 200° C, jer pri višoj temperaturi većina polimera počinje teći ili dolazi do pogoršanja njihovih svojstava.

Primjeri primjene staklenim vlaknima ojačanih polimernih kompozita:

- kabine vozila i trupovi plovila,
- cijevi, spremnici, te industrijski podovi.

• **UGLJIČNIM VLAKNIMA OJAČANI POLIMERNI KOMPOZITI**

Ugljik je visokoučinkovit vlaknasti materijal koji se najčešće primjenjuje za ojačanje suvremenih kompozita s polimernom matricom. Korištenje izraza „ugljično vlakno“ može djelovati zbunjujuće budući da je ugljik jedan od elemenata, kristalni oblik ugljika u ambijentalnim uvjetima nazivamo grafit. Ugljična vlakna nisu u cijelosti kristalna, već se sastoje od grafitnih i nekristalnih područja. Postupci proizvodnje ugljičnih vlakana relativno su kompleksni.

Ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti ekstezivno se primjenjuju za sportsko i rekreacijsku opremu (ribolovni i golf štapovi), namotavana kućišta raketnih motora, spremnike pod tlakom, konstrukcijski dijelovi letjelica (dijelovi krila, trupa).

- **ARAMIDNIM VLAKNIMA OJAČANI POLIMERNI KOMPOZITI**

Aramidna vlakna su visokočvrsti i visokomodulni materijali koji su u primjenu uvedeni ranih 1970-ih. Ona su posebno poželjna radi izuzetnog omjera „čvrstoća – gustoća“.

Kemijski, ova skupina materijala poznata je kao 2poli-parafenilen – tereftalamid“. Ovi materijali poznati su po svojoj krutosti i žilavosti, otpornosti na udar, otpornosti na puzanje te otpornosti umoru materijala. Raspon temperatura kod kojih zadržavaju visoka mehanička svojstva kreće se od -200 do 200° C.

Aramidna vlakna najčešće se koriste kod kompozita s polimernom mtricom, tipični primjeri ovih aramidnih kompozita su neprobojni prsluci, sportski artikli, gume, užad, projektili, tlačne posude te zamjena azbesta kod automobilskih kočnica i spojki, kao i brtve.

- **OSTALI VLAKNASTI MATERIJALI ZA OJAČANJE**

Drugi vlaknasti materijali, kao npr. borna vlakna te vlakna na osnovi silicij – karbida (SiC) i aluminij – oksida (Al_2O_3), primjenjuju se u daleko manjoj mjeri.

Polimerni kompoziti ojačani vlaknima bora rabe se za izradu komponenti vojnih letjelica, krila helikopterskih rotora, te neke sportske artikle.

Vlakna na osnovi SiC i Al_2O_3 primjenjuje se za izradu teniskih reketa, štampanih ploča i vrhova raketa.

7.2. Kompoziti s metalnom matricom

Radi se o kompozitima kod kojih je matrica metal. Metali se u ovim kompozitima mogu primjenjivati pri višim radnim temperaturama. Ojačalom se može povećati specifična krutost, specifična čvrstoća, otpornost na abraziju, otpornost na puzanje, toplinsku vodljivost, dimenzijsku postojanost. Neke od prednosti ovih materijala pred kompozitima s polimernom matricom uključuju primjenu pri povišenim temperaturama, negorivost te veću otpornost prema degradaciji uzrokovanoj djelovanjem organskih kapljevin. Kompoziti s metalnom matricom znatno su skuplji od onih s polimernom matricom pa je njihova uporaba prilično ograničena.

7.3. Kompoziti s keramičkom matricom

Keramički materijali, otporni su prema oksidaciji, te općenito prema slabljenju svojstava pri povišenim temperaturama. Da nisu skloni krhkom lomu, ovi materijali bili bi idealni za uporabu pri visokim temperaturama, kao i za primjenu tamo gdje do izražaja dolaze izuzetno visoka opterećenja, kao što su npr. dijelovi automobilskog motora, plinske turbine zrakoplovnih motora.

Keramički kompoziti proizvode se postupcima vrućeg prešanja (HP), vrućeg izostatičkog prešanja (HIP) i sinteriranjem tekuće faze.

Ovakvi materijali primjenjuju se za umetke reznih alata čiji je vijek trajanja puno dulji od većine materijala koji se primjenjuje za tu svrhu.

7.4. Ugljik – ugljik kompoziti (C – C)

Jedan od najnaprednijih i najperspektivnijih inženjerskih materijala je ugljik ojačan ugljičnim vlaknima ili kako se često naziva „ugljik-ugljik“ kompozit. Kako mu i samo ime govori, radi se o matrici i o ojačalu od ugljika. Ovi materijali su relativno novi i vrlo skupi što onemogućava njiovu široku primjenu. Njihova izrazita svojstva su prije svega visok vlačni modul elastičnosti i visoka vlačna čvrstoća, koji se ne mijenjaju niti na temperaturama iznad 2000 ° C, otpornost na puzanje te relativno visoka lomna žilavost.

Glavni razlog visoke cijene ovih kompozita je u vrlo složenom postupku dobivanja. Pripremni postupci pri proizvodnji slični su onima pri proizvodnji polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima.

7.5. Hibridni kompoziti

Relativno novija vrsta vlaknima ojačanih kompozita su tzv. hibridni kompoziti koji se dobivaju uporabom više vrsta vlakana u jedinstvenoj matrici. Velika prednost ovakvih kompozita je znatno bolja kombinacija svojstava, nego što je to kod kompozita ojačanih samo jednom vrstom vlakana. Visoka cijena često je faktor koji ograničava njihovu široku primjenu.

Tipična primjena hibridnih kompozita su razni dijelovi konstrukcija primjenjivih u kopnenom, zračnom i pomorskom prometu te sportski rekviziti i razna ortopedska pomagala.

8. Strukturni kompoziti

8.1. Uvodno o strukturnim kompozitima

Strukturni kompoziti, u pravilu, formirani su od homogenih materijala i kompozita, a svojstva im ne ovise samo od svojstava i količina komponenata nego i od geometrijskih oblika obuhvaćenih dijelova.

Na slici (25) je prikazana podjela strukturnih kompozita, gdje strukturne kompozite dijelimo na:

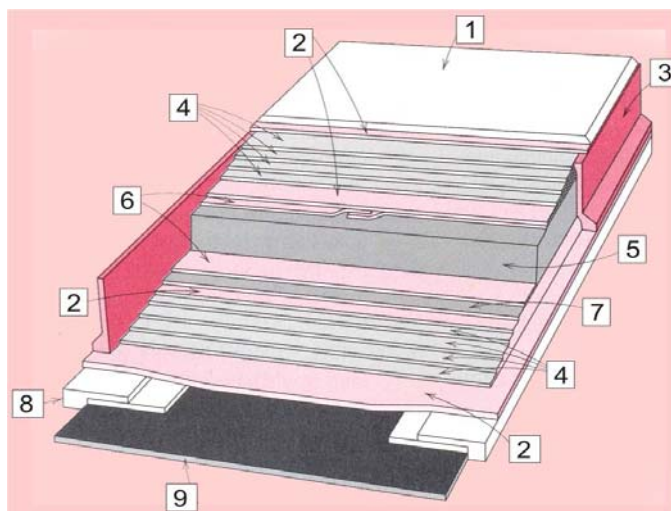


Slika 25.: Prikaz podjele strukturnih kompozita [1]

8.2. Slojeviti kompoziti

Slojeviti kompoziti su formirani od slojeva različitih vrsta, karakteristika i debljina. Proizvodi izrađeni od slojevitih kompozita mogu biti jednostavni, kao što je npr. kompaktni disk (CD), te vrlo komplicirani, kao što su npr. skije za snijeg.

Slika 26.: Shematski prikaz konstrukcije (strukture) za primjer slojevitih kompliciranih kompozita (skije za snijeg).[9]



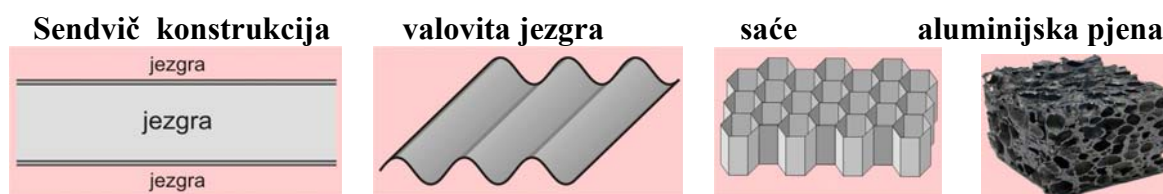
1. vrh skije – homogeni polimer, ABS, obloga, estetika
2. dvosmjerni sloj – UP sa staklenim vlaknima $\Phi 45^\circ$, torzijska krutost
3. strana – homogeni polimer, ABS, obloga, estetika
4. jednosmjerni sloj – UP sa staklenim vlaknima 0° (nešto malo 90°), uzdužna krutost
5. jezgra – homogeni polimer, PUR, punilo
6. obloga jezgre – dvosmjerni laminat, UP, torzijska krutost i povezivanje vanjskih slojeva
7. prigušni sloj – homogeni polimer, PUR, povećava otpornost titranju
8. rub – očvršnuti čelik, omogućava skretanje sječenjem snijega
9. osnova – stlačeni ugljik u polimernoj matrici, tvrdoća, otpornost na abraziju.

Najčešće se susreću **površinski slojevi** kojima se osiguravaju željena svojstva površina dijelova/sustava (*tvrdća, otpornost na trošenje i koroziju, poboljšanje izgleda*) koja nema osnovni materijal. Površinski se slojevi nanose postupcima prskanja, sol-gel postupcima i kemijskim naparavanjem (*CVD*).

8.3. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije uključuju složene trodimenzionalne dodatke – **jezgre** (*vlakna su jednodimenzionalna, slojevi dvodimenzionalni*), namijenjene prije svega povećanju čvrstoće i krutosti pri savojnom i smičnom poprečnom, te lokalnom tlačnom opterećenju. Jezgre su s obje strane vezane za oblogu. Poznat je primjer sendvič konstrukcije valoviti kartonski papir – s obje strane valovite jezgre zalijepljen je ravni papir veće debljine (*karton*).

Na slici (27) možemo vidjeti shematski prikaz sendvič konstrukcije. Primjer sendvič konstrukcije može biti valoviti karton (debeli papir+valoviti karton+debeli papir), te struktura u obliku pčelinjih saća koji se primjenjuje u zrakoplovstvu.



Slika 27.: Shematski prikaz sendvič konstrukcije [9]

Sendvič konstrukcije se koriste za izradu dijelova zgrada (*toplinska i zvučna izolacija – krovovi, zidovi, podovi, vrata*), dijelova vozila (*ukrućenje – pragovi, stupovi, branici*) i letjelica (*veliki R_m/ρ i E/ρ – krila, usmjerivači zraka, elise*).

8.4. Stanični kompoziti

Staničnu (*čelijastu*) strukturu formiraju sjedinjene **ćelije** s tankim krutim stjenkama (*matrica*), ispunjene plinom (*dodatak*). Ćelije mogu biti otvorene i zatvorene.

Keramičke pjene

Poroznost je keramičkih pjena 75 - 90 %, te su niske ρ i χ , velike specifične površine i specifične čvrstoće, te velike kemijske i toplinske otpornosti. Primjenjuju se za izradu konstrukcijskih dijelova letjelica, filtara izloženih djelovanju agresivnih kemikalija i/ili visokih temperatura, podloga za katalizatore.

Metalne pjene

Poroznost je metalnih pjena 40 - 90 %. Najviše se koriste alumijske pjene niskih ρ i χ , visoke krutosti. Dobro prigušuju vibracije i zvukove. Koriste se za izradu konstrukcijskih dijelova vozila i letjelica.

Polimerne pjene

Polimerne pjene s otvorenim ćelijama su fleksibilne, a pjene sa zatvorenim ćelijama krute. Karakteristično su im niske ρ i χ .

Za dobivanje pjena koriste se:

- plastomeri – PS, PE, PMMA i
- duromeri – PUR, UP.

Najčešće se koristi polimerna PS pjena – "stiropor", za toplinsku izolaciju građevina i pakiranje proizvoda osjetljivih na udare. Za poboljšanje svojstava se polimernoj matrici dodaju različiti aditivi, npr. za poboljšanje vatrootpornosti i čvrstoće.

9. GRAĐA METALNIH KOMPOZITA (MMC – METAL MATRIX COMPOSITE)

9.1. Sastavni dijelovi metalnih kompozita:

- **Matrice:** koji se sastoje od superlegura, legura aluminija, magnezija, titana i bakra.
- **Ojačala:**-čestice - kontinuirana vlakna (ugljik, silicijev karbid, bor, aluminij i tvrdi metali)
- diskontinuirana vlakana i viskeri (od silicijeva karbida, sjeckana vlakna od ugljika i aluminija i čestice aluminija i karbida, dijamanti).

9.2. Označavanje metalnog kompozita:

Na slici (28) možemo vidjeti oznaku metalnog kompozita gdje svako slovo označava određeni sastav koji je upotrijebljen za dobivanje metalnog kompozita.



Slika 28. Označivanje metalnog kompozita [11]

Ovo je primjer jedne oznake metalnog kompozita: **Al 6061 / Al₂O₃ / 20_p / T6**, gdje u tabličnom prikazu možemo vidjeti detaljnije udio matrice i ojačala u metalnim kompozitima.

Tablica 4. – Prikaz udjela matrice i vlakana u metalnom kompozitu [11]

Vlakno	Matrica	Volumni udio vlakna, %	Gustoća, kg/m ³	Uzdužni vlačni modul E, kN/mm ²	Uzdužna R _m , N/mm ²
Ugljično vlakno	Al-legura 6061	41	2440	320	620
Vlakno bora		48	-	207	1515
SiC		50	2930	230	1480
Al ₂ O ₃	Al-legura 380.0	24	-	120	340
Ugljično vlakno	Mg-legura AZ31	38	1830	300	510
“Borsic”	Titan	45	3680	220	1270

10. PREDNOSTI I NEDOSTACI METALNIH KOMPOZITA

Neke od prednosti metalnih kompozita mogu biti slijedeće:

- Vrlo visoka čvrstoća i krutost uz vrlo malu gustoću,
- Visoka toplinska i električna vodljivost i niska toplinska rastezljivost,
- Vrlo dobra otpornost na trošenje,
- Vrlo dobra svojstva na visokim temperaturama.

Nedostaci metalnih kompozita mogu biti slijedeći:

- Komplicirana proizvodnja,
- Vrlo visoka cijena – cijena će padati sa širenjem primjene,
- Nedovoljno podataka o svojstvima materijala,
- Još uvijek nema dovoljno smjernica za konstruiranje s ovom vrstom materijala,
- Loša recikličnost.

11. POSTUPCI PROIZVODNJE METALNIH KOMPOZITA

11.1. Uvodno o postupcima proizvodnje metalnih kompozita:

Procesi proizvodnje MMC-a dijele se u primarne i sekundarne grupe. Primarni proces je postupak kojim se sintetiziraju kompoziti od osnovnih materijala, matrice i ojačala. Pritom je uključena ugradnja ojačala u matricu u odgovarajućoj količini i na odgovarajuća mjesta i razvoj prikladnih veza između konstituenata. Sekundarni proces se sastoji od svih dodatnih stupnjeva potrebnih za preradu primarnog kompozita u konačni dio. U nekim slučajevima oba stupnja odvijaju se istodobno, ovisno o željenom konačnom proizvodu i postupcima proizvodnje korištenim u procesu.

Izbor postupka za proizvodnju kompozitnog materijala ovisi o mehaničkim i kemijskim svojstvima ojačala i matrice; dužini i veličini vlakana, slaganju vlakana i željenom razmještanju vlakana; veličini, obliku i raspodjeli čestica. Nadalje, potrebno je poznavanje termodinamike i kinetike mogućih reakcija matrica-ojačala i radne temperature kojoj će kompoziti biti podvrgnuti.

Mnoga ojačala i materijali matrice nisu kompatibilni u smislu prijanjanja i takvi se materijali ne mogu preraditi u kompozite bez prilagodbe svojstava međupovršine među njima. Kod nekih kompozita povezanost ojačala i metala je slaba i mora se pojačati. Kod kompozita proizvedenih od reaktivnih konstituenata treba izbjeći prekomjernu aktivnost na međugranici, koja može oslabiti svojstva materijala. Taj problem obično se rješava ili površinskom obradom ili prevlakom ojačala ili prilagodbom sastava legure matrice.

11.2. Postupci u čvrstom stanju

Ovi se postupci odvijaju kod niže temperature s mogućnošću bolje kontrole termodinamike i kinetike graničnih površina. Dvije glavne grupe postupaka u čvrstom stanju su difuzijsko spajanje materijala u obliku tankih slojeva i sinteriranje. Procesi nanošenja matrice, u kojima se materijal matrice nanosi na vlakno, uključuju elektrokemijsko prevlačenje, plazmatsko naštrcavanje i fizikalno nanošenje iz parne faze. Nakon procesa nanošenja, često je potreban sljedeći korak sjedinjavanja, kao npr. difuzijsko spajanje.

Difuzijsko spajanje odvija se na povišenoj temperaturi pri visokom tlaku. Međutim, stupanj difuzije mora biti ograničen ili će na međupovršini doći do porasta neželjenih krhkih faza. Jedan od načina ograničavanja vremena difuzije je istiskivanje sloja vlakana i matrice kroz alat. Toplo valjanje može se također primijeniti, ali u tom slučaju deformacija se mora ograničiti da se smanji pomak vlakana ojačala i izbjegne oštećenje. Povišene temperature se koriste da se olakša tečenje matrice, ali se mora izbjeći i prekomjerno zagrijavanje koje bi moglo potaknuti kemijski napad na vlakna. Nedostatak ovih postupaka je što zahtijevaju vrlo čiste površine prije pokušaja spajanja. To obično traži prethodno čišćenje sastavnih materijala i postupak u vakuumu. Ovim postupkom se sjedinjuju B/Al i Borsic/Al kompoziti [2, 3, 4].

11.3. Visokotemperaturna sinteza

Toplo prešanje je proces kojim se mogu proizvoditi kompoziti s malom poroznošću i trodimenzionalne strukture između intermetalnih spojeva i metalnih matrica s konkurentnom cijenom i jednostavnošću. Na taj se način mogu proizvesti npr. metalni kompoziti Al_3Ti/Al . Kao polazna sirovina koriste se prah aluminija i titanova oksida (TiO_2). Nazočnost aluminija u tekućoj fazi je najbolji način za popunjavanje pora. U toj reakciji višak Al služi za kontrolu poroznosti kompozita i olakšanje procesa sinteze.

Dio metala se potroši u reakciji za stvaranje intermetalnog spoja, a ostatak, koji je tekuć, popunjava pore u matrici za vrijeme sinteriranja i povećava gustoću kompozita. Istovremena uporaba tlaka i reakcije sinteze omogućuje smanjenje poroznosti proizvedenog materijala reakcijama sinteze i kontrolu geometrije pora kao i ravnomjernu raspodjelu čestica $AlTi_3$ u metalnoj matrici[5, 7].

11.4. Metalurgija praha

Metalurgijom praha se ostvaruje povezivanje praha s česticama, pločicama ili viskerima ojačala nizom koraka. Dva ili više odijeljena praha se miješaju, katkada uz pomoć veziva. Keramičke čestice koje trebaju osigurati visoku čvrstoću kompozita su reda veličine $5\ \mu m$ u promjeru, dok je veličina praha legure matrice (aluminij ili magnezij) od 20 do $40\ \mu m$ u promjeru. Razlika u veličini čestica praha omogućuje stvaranje neprekinute mreže malih keramičkih čestica oko većih zrna matrice. Tako nastaju mikrostrukturno nehomogena područja. Nadalje, stvaranjem mreže nastala poroznost mora se popuniti rastaljenom legurom matrice tijekom sjedinjenja (toplo prešanje). Ako se polazni prah lako oksidira, vrlo fini submikronski oksidi mogu se koncentrirati na granicama zrna značajno smanjujući lomnu žilavost izvornog materijala.

Dijelovi postupka uključuju:

- prosijavanje brzo skrućenih čestica,
- spajanje čestica s fazom ili fazama za ojačavanje sa ili bez veziva,
- zguščavanje smjese ojačala i matrice na oko 75 % gustoće,
- otplinjavanje i završno sjedinjenje istiskivanjem, kovanjem, valjanjem ili nekom drugom toplom obradom.

MMC-i proizvedeni PM tehnologijom obilježeni su visokom cijenom i značajnim svojstvima kao što su čvrstoća i krutost[4].

11.5. Postupci u tekućem stanju

Za što bolje povezivanje matrice i vlakana poželjno je da taljevina iz matrice teče u međuprostore nerazvrstanog vlakna da bi se osiguralo potpuno pokrivanje vlakna. Za takav postupak koriste se duboke kupke koje značajno olakšavaju proizvodnju, a koje se upotrebljavaju u industriji za pripremu predoblika. Različitost između potrebe ovlaživanja vlakana i izbjegavanja prevelike kemijske reakcije između vlakana i matrice uvjetuje predobradu istih, i to prevlačenjem kao npr. sa spojem titanovog diborida u slučaju aluminijevih MMC-a. Vlakna s prevlakom provlače se zatim kroz kupku rastaljenog aluminija u kontinuiranom postupku. Prodiranje rastaljenog aluminija između vlakana osigurava razdvajanje vlakana jednako dobro kao i veznu međupovršinu između vlakana i matrice. Prevlaka na vlaknu, kao što je titanov diborid, pomaže ovlaživanje i zaštitu vlakana od kemijske reakcije pri povišenim temperaturama.

Aluminijevi kompoziti u velikoj mjeri proizvode se s česticama kao ojačalom. Istražuju se i već primjenjuju različiti postupci.

11.5.1. Lijevanje u kalup

Lijevanje u kalup najčešći je od svih ljevačkih postupaka za proizvodnju velike količine dijelova uz najnižu cijenu. Pritom se koriste različiti načini pripreve taljevine i tehnike lijevanja [19].

11.5.2. Lijevanje miješanjem

Lijevanje miješanjem slično je klasičnom postupku kod aluminijskih legura, ali uz blago miješanje taljevine radi osiguranja ravnomjerne raspodjele npr. SiC čestica. Stalna kontrola temperature taljevine potrebna je radi izbjegavanja pregrijanja i naknadnog stvaranja karbida.

11.5.3. Lijevanje tiskanjem

Lijevanje tiskanjem uključuje ulaganje poroznog keramičkog predoblika u predgrijani kalup, koji će se kasnije ispuniti tekućim metalom. Pomoću tlaka rastaljeni metal ulazi u keramički predoblik i nastaje čvrst kompozit. Postupak smanjuje utrošak materijala i energije, proizvodeći dijelove na konačnu mjeru i nudi sposobnost selektivnog ojačavanja.

11.5.4. Lijevanje u poluskrućenom stanju

Lijevanje u poluskrućenom stanju je postupak sličan lijevanju miješanjem, s razlikom što se čestice dodatka miješaju u metal koji je u poluskrućenom stanju. Poluskrućeni metal mora se snažno miješati, a ne blago kao kod lijevanja miješanjem [20].

11.5.5. Bestlačna infiltracija metala

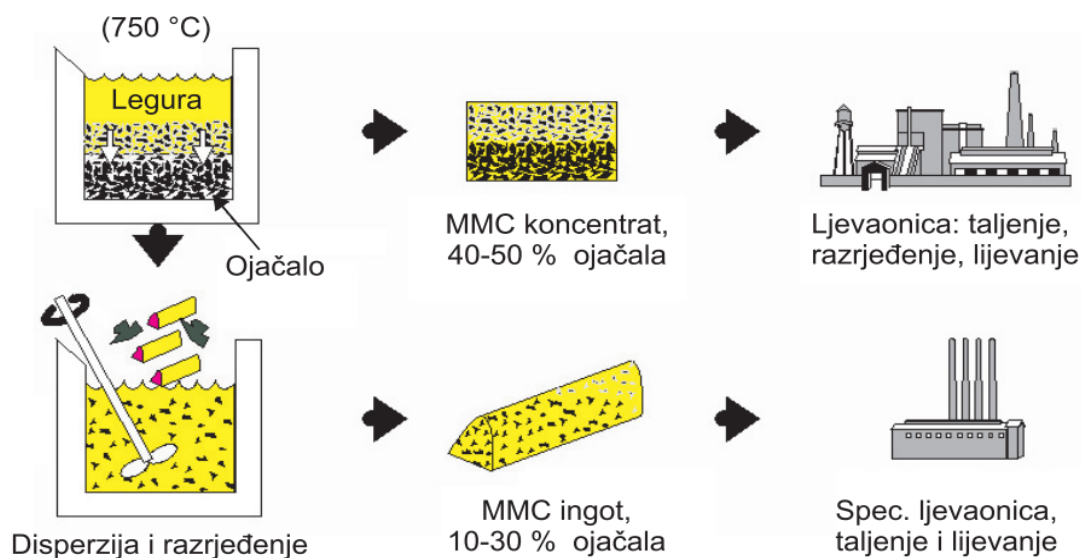
Bestlačna infiltracija metala je postupak, vlasništvo AM LANXIDE-a, poznat pod različitim zaštićenim imenima. Prvim razvijenim postupkom kompoziti se proizvode infiltracijom sloja čestica Al_2O_3 rastaljenim metalom koji je izložen oksidacijskoj atmosferi.

Materijal matrice nastalog kompozita je sastavljen od smjese produkata oksidacijske reakcije i neizreagirane aluminijske legure (LANXIDETM). Ovaj postupak omogućuje dobivanje gotovih oblika i svojstava kompozita koja mogu zadovoljiti primjerene specifične namjene. Novijim postupkom PRIMEX CONCENTRATETM proizvodi se materijal koji se kasnije može pretaljavati i koristiti u ljevaonicama za proizvodnju dijelova od aluminijske MMC-a. Postupak uključuje bestlačnu infiltraciju aluminijske matrice u masu keramičkih čestica za ojačanje (slika 29). Ta infiltracija je praćena *in situ* stvaranjem jedinstvene površinske prevlake na česticama ojačala. Prevlaka omogućuje potpuno vlaženje čestica i povoljne značajke za tečenje taljevine, važna obilježja za daljnju ljevaoničku uporabu. Izostanak ovlaživanja može inače uzrokovati podebljanje i nestabilnost u taljevini koja sadrži čestice bez prevlake. Kod taljevina s PRIMEX CONCENTRATETM materijalom stabilna viskoznost ostaje i tjednima kod normalne temperature lijevanja. Na stabilnost ne utječu neočekivani toplinske promjene koje se mogu dogoditi tijekom uporabe.

Recikliranje uljevnog sustava i pojila u taljevinu, ako je vješto obavljeno, nema štetan utjecaj na dinamičku izdržljivost i kvalitetu proizvoda. Tipičan udio ojačala u koncentratu je 40-50 % po volumenu, a ostatak je aluminijska legura matrice. Koncentrat je pripremljen za masovnu

ljevaoničku uporabu. Ljevaonice koje koriste ovakav koncentrat mogu ga same razrijediti jeftinijim aluminijem. Razrijeđen kompozit pripremljen za lijevanje obično sadrži 10-30 % keramičkih čestica po volumenu, ovisno o zahtijevanim svojstvima i primijenjenom postupku lijevanja. Tako dobivena taljevina je jednolika i stabilna. Objema tehnologijama ojačalo, legura matrice i mikrostruktura kompozita se mogu varirati i potpuno kontrolirati, što omogućuje pripremu dijelova za određenu primjenu. Mogu se ekonomično proizvoditi dijelovi završnog ili gotovo završnog oblika, svih veličina i složenih oblika. Npr. vrlo kvalitetni kočioni diskovi za automobile proizvode se sa do 75 % recikliranog materijala dobivenog ovim postupkom [6, 7].

Ove tehnologije zajedno s tehnologijama za proizvodnju dijelova od kompozita s keramičkom matricom su zaštićene nizom patenata. U svijetu postoji više od 2 700 patenata s tog područja.



Slika 29. Shema proizvodnje MMC-a PRIMEX bestlačnom infiltracijom [13]

Značajna primjena postupka bestlačne infiltracije metala je u proizvodnji dijelova za pakiranje, podloge i pomoćne strukture za elektroničke komponente od SiC_p/Al kompozita (slika 30).

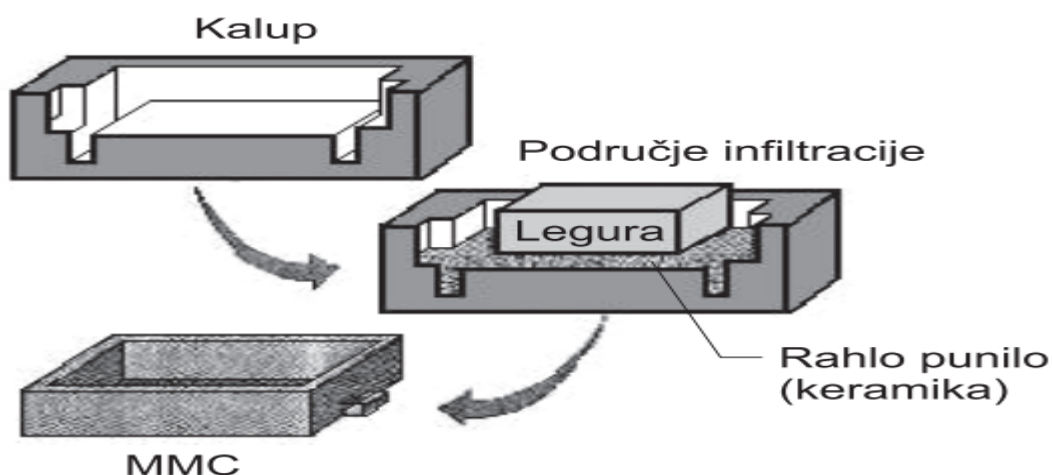
Pritom su tipični zahtjevi:

- mali koeficijent toplinskog rastezanja (α) da bi se smanjila mehanička naprezanja usmjerena na elektronički uređaj tijekom sklapanja ili rada,
- visoka toplinska vodljivost,
- mala gustoća za minimalnu težinu.

U usporedbi s klasičnim aluminijevim legurama, kompoziti imaju, zbog oblika i udjela čestica SiC , znatno smanjen koeficijent toplinskog rastezanja (α) i veći modul elastičnosti, s malo ili bez utjecaja na toplinsku vodljivost i gustoću. Zbog mogućnosti projektiranja fizikalnih i toplinskih svojstava, postupak bestlačne infiltracije metala pruža i više drugih prednosti u smanjenju cijene i/ili povećanju pouzdanosti u odnosu na klasične metode izrade elektroničkih komponenti:

- sposobnost izrade složenih dijelova na završni ili gotovo završni oblik,
- oblikovanje rubova kućišta za zatvaranje laserskim snopom,
- kompatibilnost sa prevlakama zlata, kositra ili nikla,
- mogućnost *in situ* povezivanja električnih kanala, čime se izbjegavaju pogreške zbog lemljenih spojeva [8].

Specifična krutost (modul elastičnosti podijeljen s gustoćom) SiC_p/Al -kompozita može biti više od 3,2 puta veća od one neočvrstutog čelika, aluminijevih legura i titanovih legura. Ta svojstva, povezana s kontroliranom toplinskom vodljivošću i malim α , čine MMC-e atraktivnim za komponente koje zahtijevaju izvanrednu krutost i dimenzijsku stabilnost, kao što su prostorne strukture, automobilske kočnice i komponente optičkih sustava. Aluminijevi metalni kompoziti ojačani krupnijim česticama SiC pokazuju izvanrednu otpornost na eroziju suspenzijama, a oni s česticama Al_2O_3 su potencijalni materijal za primjenu u proizvodima gdje se traži veća čvrstoća i žilavost. Kompoziti $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ su krući i čvršći od neočvrstute izvorne legure i zadržavaju dobru lomnu žilavost unatoč manjoj duktilnosti.



Slika 30. Shema proizvodnje elektroničkog elementa bestlačnom infiltracijom [14]

11.6. Nanošenje naštrecavanjem

Nanošenje naštrecavanjem uključuje atomizaciju taljevine (stvaranje zasebnih kapljica), naštrecavanje kapljica rastaljenog metala kroz sapnice i skupljanje i zgušnjavanje poluskrućenih kapljica na podlozi. U postupku naštrecavanja metalna legura se tali indukcijskim grijanjem i izliva u zagrijanu posudu. Taljevina teče kroz izlaz na dnu prema plinskom raspršivaču. Plinski mlaz velike brzine rastavlja metal u sitne kapljice koje se snažno ubrzavaju prema podlozi. Na podlozi kapljice se zgušnjavaju i stvaraju talog formirajući tako izravno približno konačne oblike, za razliku od postupka metalurgije praša gdje se postupak odvija u međustupnjevima.

Brzina skrućivanja nije tako velika kao kod brzog skrućivanja i ima dvije prednosti:

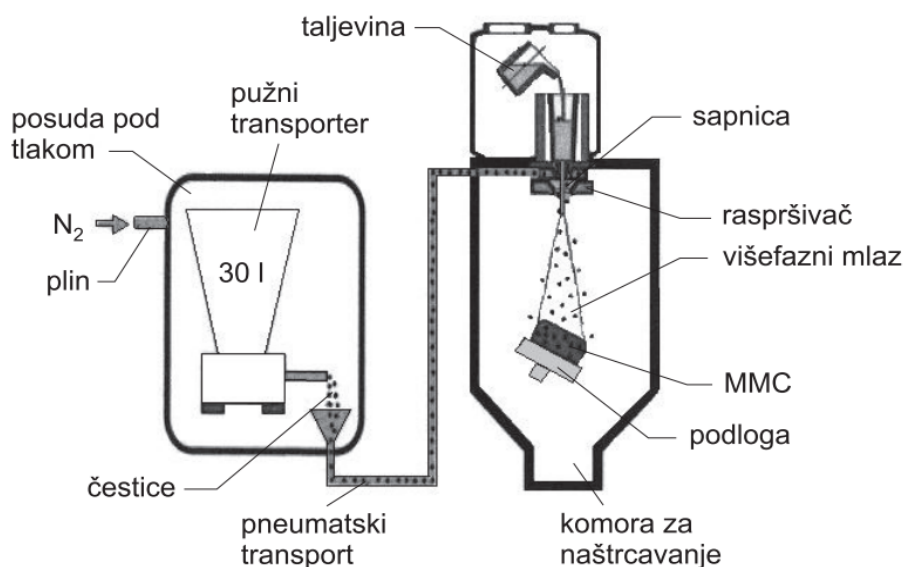
- izravna proizvodnja prethodnih oblika,
- izravno uključivanje ojačala u pripadnu matricu.

MMC ingoti se lijevaju uvođenjem čestica za očvršćenje (ugljik, Al_2O_3 , SiC) u metalni mlaz. Potrebna je pažljiva kontrola uvjeta doziranja da bi se osigurala ravnomjerna raspodjela čestica.

Miješanje i zgušnjavanje dviju komponenata ovim načinom naziva se oblikovanje naštrecavanjem kompozita s metalnom matricom. Materijal ima metalnu matricu u kojoj su disperzirane druge komponente u obliku čestica. Kvaliteta materijala se može prilagoditi potrebama primjene, kao npr. od krhkog do žilavog, vrstom, udjelom, oblikom i raspodjelom čestica ojačala.

Glavna namjena proizvodnje MMC-a je poboljšanje otpornosti na trošenje, osobito abrazijsko, otpornosti na povišene temperature i poboljšanje modula elastičnosti, posebno aluminijevih i bakrenih legura, a u posljednje vrijeme i superlegura. Jedan od takvih komercijalnih postupaka je Ospery postupak.

Na slici (31). shematski je prikazan uređaj za naštrecavanje.



Slika 31. Shema postupka naštrecavanja [17]

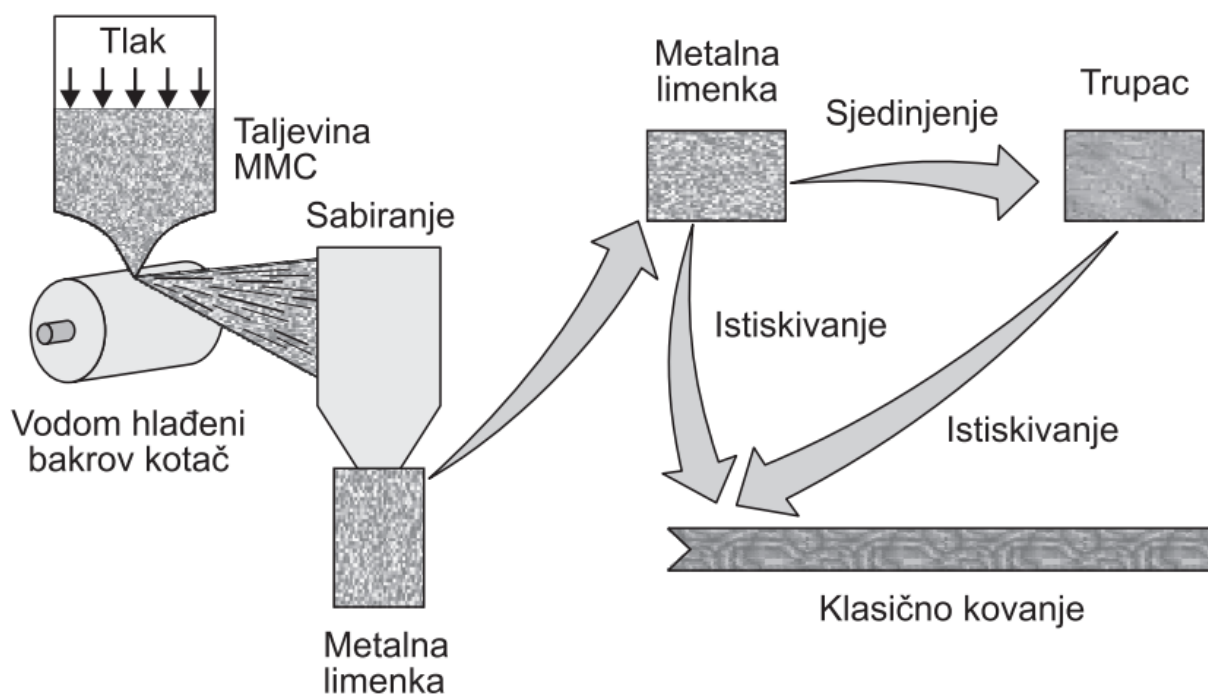
11.7. Brzo skrućivanje

Na veličinu zrna kompozita dobivenih ingot tehnologijom može utjecati udaljenost između čestica, ako je porast zrna sputavan sudaranjem čestica. Kod metala osjetljivih na porast zrna kao što je magnezij, konačna veličina zrna katkada je prevelika, što pogoršava mehanička svojstva. Zbog toga se pri razvoju niza inženjerskih legura koristio postupak brzog skrućivanja za postizanje mikrostrukture koja poboljšava visokotemperaturna svojstva kao npr. čvrstoću i otpornost na koroziju. Mikrostruktura ovih legura odlikuje se ujednačenijim sastavom, usitnjenim mikrokonstituentima, visokim stupnjem prezasićenosti i zadržanim metastabilnim fazama. Snažno usitnjenje lijevane dendritne strukture postignuto je povećanjem brzine hlađenja ili brzine rasta dendrita tijekom skrućivanja. Povećana ujednačenost sastava postignuta je kraćim difuzijskim putem između područja mikrosegregacija. Nadalje, precipitati nastali u tim područjima teže smanjenju veličine i jednoličnijoj raspodjeli.

Primjena postupka brzog skrućivanja kod proizvodnje metalnih kompozita s keramičkim ojačalima dopušta uporabu visokočvrstih, visokotemperaturnih legura kao materijala matrice. To omogućuje optimiranje svojstava matrične faze i uporabu velikih čestica ojačala za povećanje lomne žilavosti bez gubitka na čvrstoći.

Tri su načina korištenja brzog skrućivanja u proizvodnji kompozita:

- atomizacija,
- dobivanje traka,
- dobivanje listića.



Slika 32. Postupak brzog skrućivanja [17]

Ovaj posljednji način je najperspektivniji jer dovoljno velika brzina skrućivanja omogućuje dobivanje listića debljine oko 40 do 60 μm . Listići dobiveni ovim načinom široki su i dugački 6 do 8 mm i imaju mali omjer površina/volumen. Listići se mogu direktno sjediniti u kompozitni proizvod bez daljnje promjene veličine. Trake, nasuprot tom, zahtijevaju daljnju obradu radi smanjenja njihove veličine, što može dovesti do onečišćenja i oksidacije. Pri atomizaciji velika brzina skrućivanja se može postići ako su atomizirane čestice vrlo male. Nažalost, velika površina malih čestica rezultira velikim udjelom površinskih oksida, koji su štetni za duktilnost i lomnu žilavost sjedinjenog materijala.

Potencijalna prednost proizvodnje listića je smanjenje cijene u odnosu na uobičajeni postupak metalurgije praha, PM. Npr. potrebno miješanje prahova kod PM postupka izostaje pri proizvodnji listića i za završno stapanje mogu se koristiti uobičajeni postupci oblikovanja metala kao što je istiskivanje.

Nadalje, izostaje za PM postupak potrebno dulje vrijeme i zahtjevna oprema kao što je oprema za toplo prešanje u vakuumu. Dobivanje visokokvalitetnog metalnog praha postupkom atomizacije zamijenjeno je predlegiranim MMC materijalom uz znatnu uštedu u cijeni polaznog materijala.

Dva su kritična parametra postupka za dobivanje listića:

- brzina kola za gašenje,
- količina rastaljenog metala koji pada na kolo.

Brzina kola, određena prianjanjem rastaljenog metala na bakreno kolo, utječe na brzinu skrućivanja. Ako se kolo okreće prebrzo, rastaljeni metal neće dovoljno dugo biti u dodiru s kolom da se dobiju listići. Ako je okretanje presporo, listići će biti neprihvatljivo debeli.

Količina materijala koja udara u kolo je određena promjerom otvora i tlakom primijenjenim na posudu unutar komore za taljenje. Optimalni tlak je onaj koji osigurava ravnomjernu struju metala na kolo. Npr. za SiC/Mg-kompozitnu taljevinu optimalan je tlak otprilike 27 kPa uz uporabu promjera otvora od 1,3 mm. Uz te parametre keramičke čestice SiC su ravnomjerno raspoređene unutar gašenih listica [10].

11.8. Fizikalno prevlačenje iz parne faze

Fizikalno prevlačenje iz parne faze obuhvaća niz postupaka uključujući isparavanje elektronskim snopom.

Magnetron taloženje i elektro-prevlačenje su postupci kojima se proizvode kompoziti uzastopnim nanošenjem slojeva matrice na vlakna ojačala. PVD tehnike zahtijevaju puno manje zagrijavanja vlakna od infiltracije rastaljenim metalom. Temperature površine su obično ispod 200 °C.

Ta se tehnika uvelike koristi za proizvodnju C/Al-kompozita [14].

12. PODJELA KOMPOZITA S METALNOM MATRICOM

12.1. KOMPOZITI S ALUMINIJSKOM MATRICOM

Najveći dio istraživanja i razvoja MMC-a usmjeren je na aluminij kao metal matrice. Aluminij je najatraktivniji neželjezni metal matrice, posebno za uporabu u zrakoplovnoj industriji, gdje je težina strukturnih komponenata bitan čimbenik. Značajna su toplinska svojstva aluminijevih kompozita, s vodljivošću poput metala i s koeficijentom toplinskog rastezanja koji se može sniziti gotovo do nule. Talište aluminija je dovoljno visoko da zadovolji mnoge zahtjeve u primjeni, a dovoljno nisko da proizvodnju kompozita učini prihvatljivom. Razvijeno je više vrsta MMC-a na osnovi aluminija za primjenu u zrakoplovstvu. Glavni razlog dodavanja ojačala aluminiju i aluminijevim legurama je radi povećanja čvrstoće, krutosti ili otpornosti na umor, ali obično se to postiže uz cijenu sniženja drugih svojstava kao što je istežljivost.

Aluminij može prihvatiti raznolika ojačala, kao npr. neprekinuta vlakna (npr. ugljična) i raznolike čestice, kratka vlakna i viskere. Ova posljednja tri su obično anorganski materijali (keramika) kao što su aluminijev oksid, silicijev karbid ili silicijev nitrid.

Silicijev karbid kao ojačalo u aluminijevim kompozitima prvenstveno se bira zbog izvrsne kombinacije njegovih fizikalnih svojstava, raspoloživosti i cijene.

Bor/aluminij je tehnologijski razvijen kompozit s neprekinutim vlaknima. Ova vrsta kompozita sjedinjuje izvanrednu čvrstoću, krutost i nisku gustoću bornih vlakana s proizvodnom i inženjerskom pouzdanošću aluminijevih legura.

Ukupni porast specifične krutosti (omjer modula elastičnosti i gustoće) bornih vlakana je gotovo šest puta veći u odnosu prema bilo kojem standardnom inženjerskom materijalu, uključujući čelik, aluminij, molibden i magnezij. To je prednost u sprječavanju mikrosavijanja vlakana u matrici pod tlačnim opterećenjem. Druga važna fizikalna i mehanička svojstva B/Al-kompozita su visoka električna i toplinska vodljivost, duktilnost i žilavost, negorljivost, kao i mogućnost prevlačenja, oblikovanja, spajanja i toplinske obrade.

Primjena ovih kompozita uključuje cijevne vezne dijelove strukture srednjeg trupa svemirskog broda i hladne ploče u višeslojnim nosačima elektroničkih mikročipova. Proizvodni postupci B/Al-kompozita temelje se na metodama difuzijskog spajanja vrućim prešanjem ili plazmatskim naštrcavanjem [11, 12].

Silicijev karbid/aluminij (SiC_f/Al)-kompoziti imaju povećanu čvrstoću i krutost, veću otpornost na trošenje i bolju temperaturnu stabilnost u usporedbi s neočvrstnutim aluminijem, a bez posljedica na težinu. Nadalje, imaju manji koeficijent toplinskog rastezanja čija se vrijednost može kontrolirati promjenom udjela SiC. U usporedbi s osnovnim metalom, kompozit zadržava vlačnu čvrstoću, koju ima na sobnoj temperaturi, na temperaturama do 260 °C.

Ugljik/aluminij: razvoj ovih kompozita bio je potaknut šezdesetih godina prošlog stoljeća iz komercijalnih pobuda zbog čvrstih i krutih ugljičnih vlakana. Ugljična vlakna posjeduju niz svojstava uključujući modul elastičnosti do 966 GPa i negativni koeficijent toplinskog rastezanja od $-1,62 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Međutim, ugljik i aluminij su nepodobni metali za proizvodnju kompozita. Štetne reakcije između ugljika i aluminijskih, loše kvašenje ugljika rastaljenim aluminijem i oksidacija ugljika, su značajne tehničke zapreke za proizvodnju ovih kompozita.

Komercijalni ugljik/aluminij MMC-i se općenito proizvode trima glavnim postupcima:

1. infiltracijom tekućim metalom kućine vlakana (kratko likovo vlakno koje ostaje nakon češljanja pri preradbi lana, konoplje i jute. U vlaknatom obliku koristi se kao punilo i izolacijski materijal u građevinarstvu, a može se preraditi u grubu pređu i konopce), nanošenjem matrice u parnom stanju u vakuumu na razastrta vlakna,
2. vrućim spajanjem pod tlakom sendviča raznovrsnih vlakana između aluminijskih limova.

S tako pripremljenim i metalom prekrivenim vlaknima potrebni su sekundarni postupci, kao difuzijsko spajanje ili pultrudiranje, za dobivanje konstrukcijskih elemenata. Ove kompozite moguće je proizvoditi i lijevanjem tlačenjem.

Precizni dijelovi za zrakoplovstvo s točno određenim dozvoljenim odstupanjem dimenzija zahtijevaju krute, lagane materijale s malim toplinskim iskrivljenjem. Jednosmjerna P100 C/6061 Al pultrudirana cijev ima modul elastičnosti u smjeru vlakana značajno veći od čelika, i ima gustoću otprilike trećine gustoće čelika. Teorijski C/Al-laminati, složeni pod određenim kutovima, mogu se formirati, s ciljem da se postigne koeficijent toplinskog rastezanja (KTR) upravo nula, prikladnim redoslijedom slaganja i udjelom vlakana. U praksi, može se postići vrijednost KTR blizu nuli, ali deformacijsko ponašanje je složeno zbog histereze koja se pripisuje plastičnoj deformaciji u matrici tijekom toplinskog djelovanja [12, 14].

Aluminijev oksid/aluminij-kompoziti mogu se proizvoditi različitim postupcima, ali tipični su postupci u tekućem ili u poluskrućenom stanju.

Neka od keramičkih oksidnih vlakana nisu skupa i omogućuju svojstva bolja od svojstava neojačanih aluminijskih legura. Npr. kompozit ima povećanu otpornost na trošenje i na deformacije zbog toplinskog umora, kao i smanjeni koeficijent toplinskog rastezanja. Dugačko vlakno $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ proizvodi se slaganjem Al_2O_3 -traka s usmjerenom orijentacijom stvarajući tako predoblik koji se stavlja u kalup i natapa rastaljenim aluminijem uz pomoć vakuuma. Veza ojačalo-matrica postiže se malim dodatkom litija u rastaljeni metal [12, 13].

Diskontinuirani silicijev karbid/aluminij (SiC_d/Al)-kompoziti uključuju materijale s SiC-česticama, viskerima, nodulama, listićima, pločicama ili kratkim vlaknima u aluminijskoj matrici.

Dostupni su u velikim količinama na tržištu po povoljnim cijenama za razliku od većine ostalih kompozita s metalnom matricom. Više proizvođača razvija tehnologiju dobivanja SiC_d/Al -kompozita metalurgijom praha s česticama ili viskerima kao ojačalima. Tehnologija lijevanja razvijena je za ovu vrstu MMC-a i lijevanjem proizvedeni ingoti mogu se pripremiti u bilo kojem potrebnom obliku – istisnute šipke, ingoti ili valjani pripremljeni – za daljnju preradu.

Neka od važnijih svojstava čestičnih SiC_d/Al-kompozita su:

- koeficijent toplinske rastezljivosti povezanih komponenata može se predvidjeti prilagodbom udjela ojačala;
- kompozit ima visoku dimenzijsku stabilnost ili otpornost na deformaciju pod opterećenjem. Što su sitnije čestice ojačala, to je veća čvrstoća i otpornost na puzanje.

Čvrstoća i granica razvlačenja SiC_d/Al-kompozita su do 60 % veće od onih neočvrsnute aluminijske matrice. Istraživanja mehaničkih svojstava SiC_d/Al s 20 % viskera ili 25 % čestičnog ojačala pri povišenim temperaturama pokazuju da kompozit može biti učinkovit u komponentama projektiranim za dugotrajno izlaganje temperaturama do 200 °C i kratkotrajno izdržava i temperaturu od 260 °C.

Odljevci se mogu uspješno proizvoditi posebno preciznim lijevanjem koristeći neznatno prilagođene uobičajene postupke zbog prisutnosti diskontinuiranog keramičkog ojačala. Te prednosti i relativno niska cijena uz malu težinu čini dijelove od ovih kompozita konkurentnim određenim otkovcima i odljevcima od aluminija i raznim dijelovima koji se danas izrađuju od željeznih lijevova, čelika, magnezija ili titana.

Primjeri primjene odljevaka preciznog lijeva osim u zrakoplovstvu su npr. u tlačnim posudama za medicinske proteze i glave palica za golf.

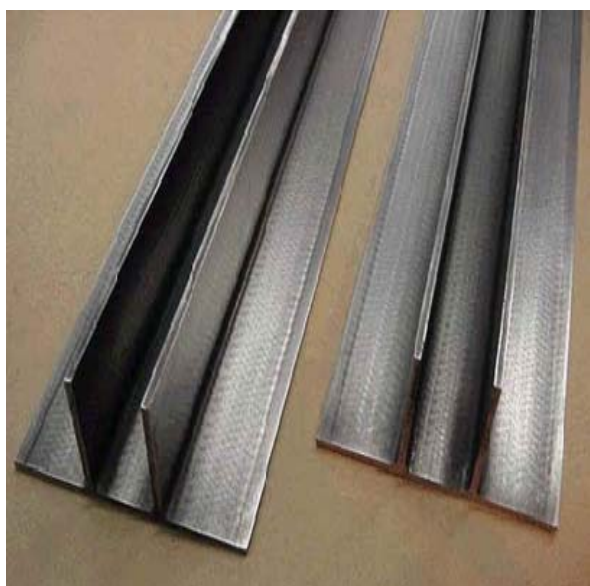
12.1.1. Primjena kompozita s aluminijskom matricom

Na slici (33) možemo vidjeti klipnjaču napravljenu od Al-legure ojačane s Al₂O₃ česticama. Ona ima puno bolja mehanička svojstva i otpornost na umor od čelične klipnjače, a uz to sve ima i 42% manju masu.



Slika 33. Klipnjača od Al-legure ojačane s Al₂O₃ česticama [19]

Na slici (34) je prikazan profil od Al-legure ojačane s grafitnim vlaknima. Imaju jednaku krutost kao i čelik, a masu manju od aluminija



Slika 34. Profil od Al- legure [19]

Na slici (35) je prikazan ventil automobilskog motora napravljeni od kompozita s Ti – matricom koja je ojačana SiC česticama



Slika 35. Ventil automobilskog motora[19]

Na slici (36) je prikazan Space Shuttle. Ukupno nosača (cijevi) u prostoru za teret je 243 cijevi, promjera $d=25-92$ mm, dužine $l=0.6-2.3$ m. Oznaka je Al 6061/B/50f – 145 kg, manja masa po letjelici u usporedbi sa Al.



Slika 36. Space shuttle [19]

Na slici (37) su prikazane dvije slike Hubble teleskopa dimenzija (4.3 cm x 8.6 cm x 2 m), Oznake Al 6061/C/40f – 40% manja masa u odnosu na Al.



Slika 37. Hubble teleskop [19]

Na slici (38) je prikazan Hondin blok motora napravljen od kompozita s Al – matricom i Saffil kratkih Al_2O_3 vlakana.



Slika 38. Hondin blok [19]

Na slici (39) je prikazan Zmašnjak koji je napravljen od kompozita s Al-matricom i vlaknastih Al_2O_3 ojačanja



Slika 39. Zmašnjak [19]

Na slici (40) je prikazan klip od kompozita Al-legure + Soffil vlakna



Slika 40. Klip od kompozita Al-legure [19]

12.1.2. Porast čvrstoće porastom udjela SiC

Svojstva lijevanih MMC-a ovise o leguri matrice, udjelu SiC-ojačala, toplinskoj obradi i postupku lijevanja. Kao i kod bilo koje lijevane aluminijske legure, mikrostruktura odljevka od MMC-a ovisi o brzini hlađenja pri skrućivanju. Kad je hlađenje sporo, kao kod odljevaka preciznog lijeva, čestice SiC su potiskivane napredujućom međupovršinom tekuće/kruto u međudendritične prostore.

Granica razvlačenja i vlačna čvrstoća kao i modul elastičnosti ispitnih uzoraka preciznog lijeva su viši od vrijednosti za neočvrstnute aluminijske uzorke i rastu porastom udjela SiC. Unatoč padu istezljivosti povezane s porastom čvrstoće, otpornost kompozita na naglo širenje napuklina (lomna žilavost u stanju ravninskog naprežanja) se ne smanjuje i kritična veličina napukline ne raste. Kad se uzme u obzir i gustoća, vlačna svojstva lijevanih MMC-a (posebno specifična čvrstoća i krutost) su bolja od svojstava sivog lijeva i čelika kao i neočvrstnutog aluminijska. Prisutnost tvrdih čestica SiC također pridonosi značajnom porastu otpornosti na trošenje i abrazijom i umorom.

Lijevani kompoziti zahtijevaju toplinsku obradu radi povećanja mehaničkih svojstava.

Općenito, preporučljiv je ciklus sličan onom koji se koristi za neočvrstljive legure:

- rastvorno žarenje i gašenje u vodi, iza kojeg slijedi prirodno i umjetno dozrijevanje.

Ojačalo od SiC utječe i na fizikalna svojstva odljevaka. Gustoća se malo povećava (npr. oko 3 % uz 20 vol %SiC), a opadaju električna vodljivost i koeficijent toplinskog rastezanja. Toplinska vodljivost, međutim, raste. To se objašnjava time da se sitne čestice SiC veličinom približavaju monokristalu, a toplinska vodljivost monokristala SiC nadilazi onu čistog aluminijska.

Osnovni ključ livljivosti je ovlaživanje keramike.

Do 1986. godine praktički su se aluminijski MMC-i proizvodili energijski ili laboratorijski intenzivnim postupcima kao što su metalurgija praha, toplinsko naštrcavanje, difuzijsko spajanje i lijevanje tlačenjem (tzv. squeeze casting). Nijedan od tih materijala se nije mogao pretaljavati i lijevati uobičajenim postupcima i svi su bili preskupi za većinu primjena, uključujući zrakoplovstvo. Unatoč tehnološkom napretku i poboljšanoj ekonomičnosti, šanse su male da će ti proizvodi ikada moći postići konkurentnu cijenu u komercijalnoj primjeni.

Da bi se mogli lijevati ekonomično i u praktičnom smislu, a ne samo laboratorijski, aluminijski MMC-i moraju zadovoljiti tri osnovna uvjeta:

- Ingot se mora moći pretaljavati bez pogoršanja njegovih svojstava;
- Taljevina mora biti prilagođena standardnim postupcima u lijevanju aluminijska;
- Odljevci moraju stvarno biti bez pogrešaka s pogodnim i izvrsnim mehaničkim svojstvima.

Te uvjete zadovoljavaju kompoziti razvijeni u tvrtki Duralcan. Na raspolaganju su ingoti namijenjeni za lijevanje ili istiskivanje proizvedeni patentnim postupkom koji osigurava potpuno vlaženje keramičkih čestica rastaljenim aluminijskim. Niska cijena je najvažnija prednost ingot metalurškog procesa. Davne 1988. godine kg kompozita se prodavao po cijeni višoj od 25 \$/kg. Sredinom 1990. godine, kada je započela poluindustrijska proizvodnja, cijena je pala na 8-9 \$/kg. Daljni pad cijene očekuje se otkad je Alcan Aluminium Ltd. pustio u rad 11 000 t/god. Duralcan postrojenje u Quebecu [14].

12.1.3. Razlike u ljevaoničkoj praksi u lijevanju SiC_p/Al u odnosu na Al-legure

Uvjeti pri lijevanju MMC-a općenito su slični kao i pri lijevanju standardnih aluminijskih legura. Ipak postoji nekoliko bitnih razlika:

- taljenje pod inertnim pokrivnim plinom provodi se prema nahodanju ljevača. Uobičajena tehnika otplinjavanja, kao što je uranjanje tableta ili ubrizgavanje plina, može uzrokovati stvaranje mjehurića plina na česticama SiC i potom rošenje keramike. Zaštitne soli uklanjaju SiC. Na drugoj strani, okretni sustav za ubrizgavanje je koristan jer može uspješno očistiti i otpliniti taljevinu. On koristi plinovitu smjesu argona i SF₆;
- potrebno je održavati temperaturu taljenja u uskim granicama da se izbjegne pregrijavanje i potom stvaranje aluminijskih karbida;
- taljevina se mora lagano miješati da se postigne ravnomjerna raspodjela SiC čestica. Keramičke čestice se ne tale i ne otapaju u leguri matrice i kako su teže od nje i teže će se slegnuti na dno peći ili lonca;
- turbulencija za vrijeme lijevanja mora se minimirati da se izbjegnu uključci plina.

Ako se uzima u obzir ove razlike, MMC ingoti se mogu uspješno pretaljavati i lijevati uobičajenim postupcima, uključujući pješčani, kokilni, precizni i tlačni lijev, lijevanje tlačnjem i postupak s pjenom.

Taljenje:

MMC-i se tale vrlo slično postupcima za taljenje neočvršćenih aluminijskih legura. Prikladne su indukcijske, elektrootporne i plinom ili naftom grijane lončane peći. Ako se koristi inertni plin, lonac se mora napuniti plinom prije unošenja suhih vrućih ingota. Ingoti se suše iznad 200 °C, radi uklanjanja nepoželjne vlage koja može onečistiti taljevinu. Svi potrebni alati kojima se ulazi u taljevinu trebaju također biti suhi i predgrijani prije uporabe.

Kontrola temperature taljevine je standardna, slična onoj kod neočvršćenih legura. Međutim, mora se izbjeći pregrijavanje koje može pogodovati stvaranju aluminijskih karbida reakcijom $4Al + 3SiC \Rightarrow Al_4C_3 + 3Si$.

Ta se reakcija odvija sporo pri temperaturi do oko 750 °C da bi se ubrzala s povećanjem temperature na 780-800 °C za matrice koje sadrže nominalno 7 %Si. Al₄C₃ precipitira u obliku kristala i nepovoljno utječe na žitkost taljevine, oslabljuje lijevani materijal i smanjuje otpornost odljevaka na koroziju.

Taljevina se ne može analizirati uobičajenom spektroskopijom. Čestice SiC uzrokuju nepravilna očitavanja uz uporabu normalnih aluminijskih etalona. Na sreću su razvijene posebne metode za spektrografsku analizu aluminijskih legura matrice, kao i za određivanje udjela SiC u taljevini.

Vakuumska spektrometrijska metoda, npr, koristi ugljikovu liniju za mjerenje volumnog udjela SiC i određivanje osnovnih konstituenata matrice. Tehnika koja se bazira na mjerenju električnog otpora može se upotrijebiti za određivanje udjela SiC u kompozitu u oba stanja, tekućem i krutom. Te metode niti su složene, niti traže puno vremena.

Miješanje:

Budući da su čestice SiC potpuno ovlažene tekućim aluminijem, one se neće stopiti u čvrstu masu, ali će se umjesto toga skupljati na dnu peći. Uporabom mješača sličnog velikoj žlici-cjedilu vrlo brzo se postiže ravnomjerna raspodjela čestica u taljevini (bilo koji čelični pribor koji se uranja u taljevinu mora biti obložen kako bi se spriječilo onečišćenje taljevine željezom, mora biti suh i predgrijan da se izbjegne stvaranje vodika).

Miješanje treba biti polagano da se izbjegne stvaranje vrtloga na površini taljevine i ne smije prečesto dolaziti do kidanja površine, zbog čega može doći do onečišćenja kupke troskom.

Grabljenje lopaticom, čime se manji dio tekućine lagano ali stalno uzdiže, je najbolji postupak ručnog miješanja. Laganom okretanju uz pomoć vijaka kao mehaničkog mješača, neke od ljevaonica daju prednost. U stvari, rezultati laboratorijskih istraživanja pokazuju da su mehanička svojstva odljevaka maksimalna pri kontinuiranom miješanju u odnosu na isprekidano ručno miješanje. Pokretanje taljevine prirodnim vrtložnim strujama u peći kod indukcijskog taljenja obično je dovoljno da se rasprše čestice. Međutim, ipak se preporučuje dodatno ručno miješanje kad je pogon isključen, da se izbjegne okupljanje čestica u tzv. "mrtvim" zonama.

Nakon miješanja brzina taloženja SiC-čestica je prilično spora djelomično zbog toplinskih strujanja u taljevini i prirodne pojave "ometanog slijeganja". Poslije 10 do 15 min otprilike 30 mm vrha nemiješane kupke ostaje bez SiC-čestica, premda raspodjela ostaje ujednačena u ostatku taljevine. Zbog toga je važno promiješati taljevinu neposredno prije ulijevanja, unatoč tome je li miješana za vrijeme taljenja i stajanja.

Pročišćivanje i otplinjavanje:

Razvijen je patentirani postupak za pročišćivanje i otplinjavanje kompozitne taljevine koji koristi uređaj sličan mješalici s lopaticama za oboje, miješanje kupke i ubrizgavanje smjese plinova argona i SF₆. Taj se uređaj koristi i za održavanje čestica SiC u suspenziji. Mješalica ima šest ugljičnih lopatica vezanih za ugljičnu pogonsku osovinu. Lonac promjera 610 mm zahtijeva mješalicu promjera 205 mm. Deset minuta rada pri brzini vrtnje od 200 o/min obično je dovoljno da se mjehurići smjese argon-SF₆ svedu na djelotvornu veličinu. Pri tome nastaje debela pjenasta troska koja se uklanja nakon što je ciklus završen.

Pretakanje

Pri transportu tekućeg metala od peći do mjesta ulijevanja nije potrebno niti miješanje niti zaštita inertnim plinom. Preporučeni niz postupaka je temeljito miješanje kupke, uklanjanje troske dok je metal u peći i potom transport taljevine u lonac za ulijevanje. Ukoliko prijenos metala uključuje pretakanje iz nagibne peći u lonac, važno je smanjiti turbulencije na minimum kako ne bi došlo do zarobljavanja plina. Nagibne peći, međutim, općenito se ne preporučuju za kompozitne taljevine.

Postupak lijevanja je isti kao i kod neočvršćenih aluminijevih legura. Kalupi za točan lijev trebaju biti dobro predgrijani, ispust iz lonca treba držati nisko i što je moguće bliže uljevnoj čaški ili uljevnom kanalu, ulijevanje treba biti brzo, držeći cijelo vrijeme uljevni kanal punim.

Uljevni sustav

Osnovna pravila pri ulijevanju i dolijevanju primjenjiva su i na livljive MMC-e, uključujući uporabu filtera koji propuštaju čestice SiC, a zadržavaju okside. Viskozna se taljevina ponaša kao djelomično skrućena te keramičke čestice otežavaju slobodan protok plinova. Kompozitni materijali su puno manje osjetljivi na turbulenciju od aluminija. Tako loše izvedeni uljevni sustavi mogu uzrokovati stvaranje i zadržavanje mjehurića plina u taljevini koji ne mogu istjecati. Razvijeni su optimalni sustavi za ulijevanje i dolijevanje, iako se mnogi pješćani odljevci proizvode na poznati način.

Dosljedan pristup ulijevanju i pojenju također je potreban radi povećanja vjerojatnosti besturbulentnog punjenja kalupa. Ljevaonice trebaju nastojati da punjenje uljernih kanala bude mirno, koristeći prigušivanje i hvatanje mjehura (otvoreno pojilo) filterom iza zaustavljivača, omogućujući ulaz metala u šupljine i na najnižoj točki.

Mada je viskoznost kompozitnih taljevina oko 50 puta veća od viskoznosti neočvrstnutih aluminijskih legura, njegova žitkost je samo malo manja u usporedbi s uobičajenim legurama. Zbog toga mnoge ljevaonice neće primijetiti razliku u sposobnosti popunjavanja kalupa.

Završna obrada

Standardni rezni alati izradeni od brzoreznog čelika se troše vrlo brzo pri obradi lijevanih MMC-a zbog tvrdih abrazivnih čestica SiC. Alati od tvrdih metala zadovoljavaju za male količine obrađenog materijala, dok su za normalne proizvodne količine cijenom najpovoljniji dijamantni alati. Standardne abrazivne rezne ploče mogu se uspješno koristiti za uklanjanje uljevaka i pojila [14].

12.1.4. Kompoziti ojačani viskerima (SiC_w/Al)

Kompoziti ojačani viskerima su mnogo skuplji od onih ojačanih česticama, zbog sljedećih prednosti.:

- monokristalni viskeri imaju veću čvrstoću od ostalih diskontinuiranih ojačala kao što su čestice, polikristalni listići i nasjeckana vlakna;
- uobičajeni postupci prerade metala mogu usmjeriti viskere u metalnoj matrici;
- valjanjem, istiskivanjem, kovanjem i superplastičnim oblikovanjem može se ostvariti usmjerenost čvrstoće.

Čvrstoća u uzdužnom smjeru se povećava kod istiskivanih aluminijskih kompozita, jer se viskeri nastoje poredati uzduž osi alata pri prolazu materijala kroz alat.

Jednosmjerno valjanje može prouzročiti usmjeravanje čvrstoće, a križno valjanje daje jednolika svojstva [4].

12.2 KOMPOZITI S MAGNEZIJEVOM MATRICOM

Magnezijevi kompoziti razvijeni su u biti da se iskoriste ista svojstva kao ona značajna za aluminij:

- visoka krutost,
- mala težina,
- nizak koeficijent toplinskog rastezanja.

U stvari, izbor između aluminija i magnezija kao matrice je obično temeljen na težini odnosno korozivnoj otpornosti. Gustoća magnezija iznosi otprilike dvije trećine gustoće aluminija, ali je aktivniji u korozivnoj sredini. Magnezij ima manju toplinsku vodljivost koja je često presudna u njegovu izboru.

Sada su u razvoju tri vrste magnezijevih kompozita:

- kontinuirana vlakna C/Mg za svemirske konstrukcije,
- kratka vlakna Al_2O_3 /Mg za dijelove automobilskih motora,
- diskontinuirana vlakna SiC ili B_4C /Mg za dijelove motora i materijale u niskonaponskoj elektronici.

Proizvodne metode za sve tri vrste jednake su onima za istovrsne aluminijske kompozite. Proizvodnja Mg-kompozita s kontinuiranim vlaknima uključuje nanošenje prevlake titan-bor za dobivanje kompozitnih žica, nanošenje matrice na vlakna PVD postupkom ili difuzijskim spajanjem vlakno/sendvič tankih listova za dobivanje ploča. Tehnologija lijevanja razvijena za C/Mg-kompozite uključuje nanošenje prevlake na zraku stabilnog silicijeva dioksida na vlakna iz prethodne organsko-metalne otopine. Magnezij ovlažuje prevlaku osiguravajući spajanje matrice na gotovo konačni oblik ljevakim postupkom [2, 16].

12.2.1. Primjena metalnih kompozita sa magnezijevom matricom

Na slici (41) je prikazan umetak mjenjačke kutije koji služi za lokalno ojačanje, a napravljeni su od Mg – legure ojačane ugljičnim vlaknima.



Slika (41). Umetci mjenjačke kutije [22]

12.3 KOMPOZITI S TITANOVOM MATRICOM

Titan je izabran kao metal matrice zbog njegove dobre specifične čvrstoće kod sobne i srednjih temperatura i izvanredne otpornosti na koroziju. U usporedbi s aluminijem titan zadržava čvrstoću na višim temperaturama. Povećana uporaba titana, kao zamjena za aluminij u gradnji zrakoplova i raketa, nastupila je kada se prešlo s podzvučnih u nadzvučne brzine. Nastojanja u razvoju titanovih kompozita otežavali su procesni problemi uzrokovani velikom reaktivnošću titana s mnogim materijalima za ojačanje.

Premda je procjenjivano nekoliko proizvodnih tehnika, samo visoko temperaturno/kratkotrajno spajanje valjanjem, vruće izostatičko prešanje i vakuumsko vruće prešanje su prihvaćeni sa znatnijom važnošću. Druga je metoda plazmatsko naštrcavanje titanove matrice na SiC-vlakna. Čvrstoća pri povišenim temperaturama SiC/Ti-kompozita značajno je veća od one neojačanog titana. Potencijalna primjena za kontinuirano vlakno/titan-kompozite leži ponajprije u zrakoplovnoj industriji. To uključuje veći broj strukturnih komponenata zrakoplova i ventilatorske i kompresorske lopatice za moderne turbinske motore [2].

Titanovi kompoziti s diskontinuiranim ojačalima imaju prednost u umjerenoj krutosti i čvrstoći pri povišenoj temperaturi u odnosu na neojačane titanove legure. Oni također pružaju mogućnost NNS proizvodnje tehnikom metalurgije praha i mogu biti ekonomičniji za proizvodnju od titanovih MMC-a s kontinuiranim vlaknima [2, 7, 15, 17].

12.4 KOMPOZITI S BAKROVOM MATRICOM

Bakar ima potencijalne mogućnosti kao materijal matrice za kompozite od kojih se zahtijeva toplinska vodljivost i čvrstoća na visokoj temperaturi, svojstva koja nadmašuju ona aluminijevih kompozita. Procjenjuju se bakrovi MMC-i s kontinuiranim i diskontinuiranim ojačalima.

W/Cu - kompoziti ojačani kontinuiranim volframovim vlaknima prvi put su proizvedeni u kasnim 1950. godinama kao istraživački model za proučavanje ponašanja pri deformaciji, pojavi loma, žilavosti i vodljivosti u MMC-ima. Kompozit je načinjen infiltracijom tekuće faze. Na osnovi svoje visoke čvrstoće na temperaturama nižim od 950 °C, W/Cu-kompoziti smatraju se danas temeljnim materijalima za stijene komora za izgaranje modernih raketnih motora.

C/Cu - kompoziti s kontinuiranim vlaknima dobili su poticaj razvojem ugljičnih vlakana. Bakar dobro provodi toplinu, ali ima veliku gustoću i loša mehanička svojstva pri povišenim temperaturama. Razvijena su ugljična vlakna s aksijalnom toplinskom vodljivošću, pri sobnoj temperaturi, boljom od bakra. Dodatak tih vlakana bakru snizuje gustoću, povećava krutost, povišuje radnu temperaturu i osigurava mehanizam za oblikovanje koeficijenta toplinskog rastezanja.

Napredak u proizvodnji C/Cu-kompozita uključuje galvanski proces pokrivanja svakog ugljičnog vlakna prevlakom čistog bakra, postižući tako gipkost dovoljnu za izradu tkanine.

Bakrom prevučena vlakna mogu se vruće prešati radi proizvodnje čvrstih komponenata [2].

12.5 KOMPOZITI S MATRICOM SUPERLEGURA

Superlegure se većinom koriste u turbinskim motorima, međutim, kompoziti s matricom od superlegura su među prvim materijalima uzetim u obzir za poboljšanu izvedbu turbina u cilju povećanja radne temperature dijelova. Kompoziti na bazi superlegura razvijani su do današnjeg stanja tijekom niza godina počevši u ranim 60-ima prošlog stoljeća.

Čvrstoća pri visokim temperaturama MMC superlegura postignuta je samo ojačavanjem teškotaljivim metalima. Pod tim se podrazumijevaju vlakna volframa, molibdena, tantala i niobija sa sastavom posebno prilagođenim toj namjeni. Najjača razvijena vlakna, volframove legure, imaju čvrstoću veću od 2070 MPa pri 1095 °C ili više nego šest puta već u od čvrstoće sada upotrebljivanih superlegura u glavnom motoru Space Shuttle-a.

Većina ranijih radova na MMC superlegurama usmjerena je na proučavanje kompatibilnosti matrica – vlakno, koji su konačno doveli do legura matrice koje pokazuju ograničenu reakciju s vlaknima. Npr. Volframova vlakna su najmanje reaktivna u matricama na osnovi željeza i mogu izdržati kratkotrajno izlaganje temperaturama i višim od 1195 °C bez primijećene reakcije.

Kompoziti superlegura proizvode se procesima s čvrstom fazom, tekućom fazom ili naštrcavanjem. Metoda uključuje precizno lijevanje, spajanje metala matrice u obliku tankih ploča, metala matrice u obliku ploča dobivenih valjanjem praha s organskim vezivom, ostale tehnike metalurgije praha, "slip casting" praha metalnih legura i naštrcavanje električnim lukom.

Proizvedeni su MMC-i na osnovi željeza, nikla i kobalta i postignuta je široka lepeza svojstava, uključujući vlačnu čvrstoću pri povišenim temperaturama, lomnu čvrstoću, otpornost na puzanje, otpornost na niskociklični i visokociklični umor, žilavost, oksidacijsku otpornost i toplinsku vodljivost. Provedivost izrade dijelova složena oblika dokazana je turbinskom lopaticom prvog stupnja konvekcijskog hlađenja. Ta komponenta postala je model prema kojem je konstruirana i izradena šuplja lopatica od W/FeCrAlY-kompozita.

Kao što primjeri pokazuju, kompoziti s metalnom matricom su materijali čiji razvoj traje nekoliko desetljeća, a još preostaje da istraživanja prenijeta u proizvodnju, kao i dobivena svojstva provjerena u primjeni, potpunije ispune očekivanja.

12.5.1. Primjena kompozita s matricom superlegura

Na slici (42) su prikazane slike primjene metalnih matrica superlegura u turbinskim motorima koje su potrebne za avioindustriju



Slika 42. Primjena superlegura u turbinskim motorima [25]

13. MIM – INJEKCIJSKO PREŠANJE METALA (e.Metal Injection Moulding)

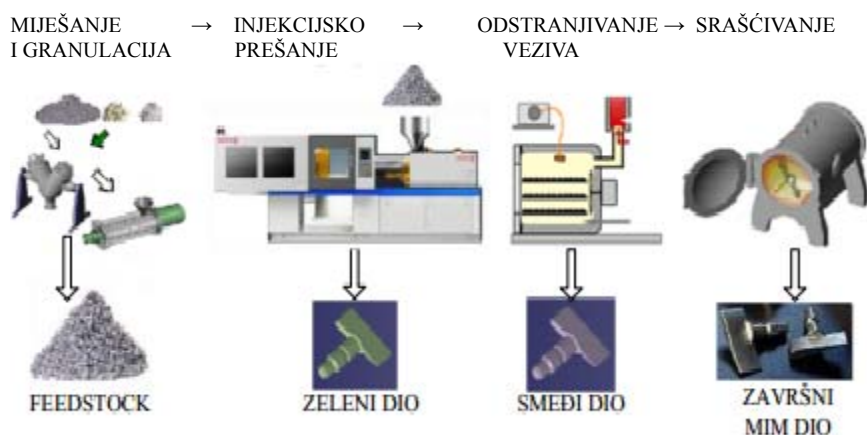
13.1. Uvod

Danas se injekcijsko prešanje metalnog praha (MIM) koristi za proizvodnju dijelova kompleksnijih oblika koji u većini slučajeva ne zahtijevaju naknadnu obradu. MIM tehnologija je spoj klasične metalurgije praškastih materijala i tehnologije injekcijskog prešanja plastike. Princip tehnologije injekcijskog prešanja plastike omogućava oblikovanje komponente i ostvarivanje kompleksnosti oblika, dok sinteriranje omogućava postizanje mehaničkih svojstava komponente.

MIM proces se sastoji od četiri osnovne faze:

- Miješanje i granulacija (priprema granulata),
- Injekcijsko prešanje (ubrizgavanje),
- Izdvajanje veziva,
- Sinteriranje (sraščivanje).

Na slici (43). je prikazan shematski dijagram MIM procesa



Slika.43. Shematski prikaz MIM procesa [33]

MIM proces počinje sa miješanjem metalnog praha u homogenu smjesu koja se u MIM tehnologiji naziva sirovina (zvana još „feedstock“). Tipična veličina čestica metalnog praha je u rangu od 0,1 – 20 μm [1], a volumenski udio metalnog praha se obično kreće od 60 do 65% [1-3]. Nakon što se u fazi miješanja i granulacije postigne feedstock u obliku peleta sa homogenim svojstvima slijedi faza injektiranja. U ovoj fazi granulirani feedstock se zagrijava do temperature topljenja veziva, a potom se injektira u zatvoreni alat. Kada se alatna šupljina ispunji do određenog postotka, najčešće 95 – 99% slijedi faza djelovanja naknadnog pritiska. Nakon što komponenta dovoljno očvrstne vrši se otvaranje alata i izbacivanje. Profilirana komponenta koja se dobija u MIM tehnologiji naziva se „zeleni dio“. Nakon izbacivanja zelenog dijela iz alata slijedi faza izdvajanja veziva. Vezivo je potrebno izdvojiti kao fluid, tekućinu ili paru, bez da komponenta izgubi oblik. [34]

Nakon što se vezivo potpuno izdvoji dobiva se porozna komponenta, koja se u MIM tehnologiji naziva „smeđi dio“. Poslije izdvajanja veziva slijedi sinteriranje kao završni korak.

Tokom postupka sinteriranja komponente su izložene visokim temperaturama, što dovodi do zguščivanja. Komponente se tokom faze sinteriranja volumenski skupljaju za oko 15% [1-3], gdje

je moguće postići tolerancije u rangu 0,3% - 0,5% [2]. Gustoća komponente je blizu teoretske obično veća od 95% [1-2], a iskorištenost materijala je gotovo 100% [1-2] jer postoji regranulacija materijala od neuspjelo izrađenih komponenti, uljevka i razdjelnih kanala. Osnovna faza u MIM tehnologiji je faza injektiranja. Najčešće greške javljaju se zbog pogrešno postavljenih parametara u ovoj fazi. Greške koje se pojave ne mogu se otkloniti u narednim fazama procesa koje slijede. [32][34]

13.2. Materijali koji se koriste u MIM tehnologiji i njihova svojstva

Najčešće korišteni elementi u MIM tehnologiji su željezo, nikal, krom i molibden. Željezo i nikal su najjednostavniji elementi za obradu zbog svoje kompatibilne temperature taljenja i jednostavnosti sinteriranja. Željezne legure nikla čine više od 50% od ukupne tonaže koja se koristi u MIM industriji.

Mnogo proizvoda je nastalo MIM materijalima – željezo je kao osnova, nikal i ugljik kao legirajući elementi.

Neki od materijala su:

- brzorezni čelici
- nehrđajući čelici
- nikal
- željezo
- bakar
- magnetske legure
- keramika.

Nadalje, mogu se koristiti materijali sa karakteristikama koje su superiornije u odnosu na standardne materijale ili one koje ne mogu biti obrađene korištenjem standardne tehnologije.

To su posebno :

- materijali postojani na habanje,
- materijali postojani pri visokim temperaturama,
- magnetski meki materijali.

Nudeći široku paletu materijala ovi proizvodi se razlikuju prema geometrijskoj slobodi konstruiranja, vrlo visokoj preciznosti i podobnosti na proizvodnju velikih količina. Inženjeri svojim znanjem i iskustvom razvijaju nove materijale dokle god postoji izvor materijala (prahova), te vode laboratorijska ispitivanja. Također uspoređuju gustoću i svojstva MIM dijelova sa svojstvima i gustoćom kovanih i lijevanih komponenata. Na temelju njih inženjeri vode računa o isplativosti ulaganja u procese izrade proizvoda MIM postupkom u odnosu na ostale postupke lijevanja i kovanja. Tim postupkom nakon srašćivanja, u proizvodu zaostaje dio poroznosti. Međutim, ono što je ostalo poroznosti bit će fino i izolirano. Čak i obrada odljevaka neće dati 100% gustoću dijelova, jer će često biti uključaka, uglavnom u lijevanoj komponenti.

13.3. Karakteristike MIM materijala

13.3.1. Viskoznost materijala

Osnovna karakteristika MIM materijala je njegova viskoznost. Potrebno je viskoznost opisati jednim od matematičkih modela. Za opisivanje viskoznosti u zavisnosti od temperature i brzine smicanja najčešće se koristi model drugog reda koji se može napisati kao:

$$\ln(\eta) = A + B \ln(\dot{\gamma}) + CT + D[\ln(\dot{\gamma})]^2 + E \ln(\dot{\gamma})T + FT^2 \dots (1)$$

gdje su: η - Viskoznost (Pa-s), $\dot{\gamma}$ - Brzina smicanja (1/s), T - Temperatura (°C).

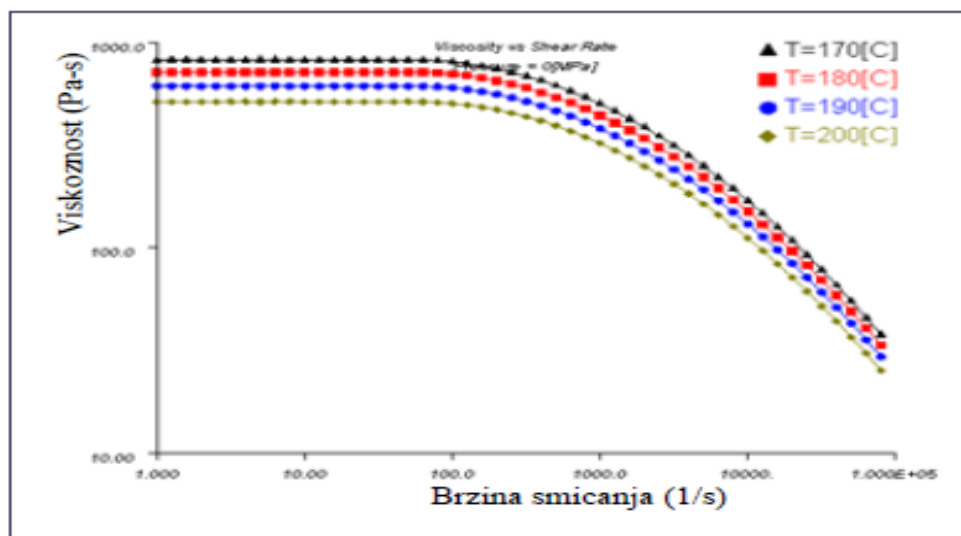
Materijal je BASF CATAMOLD 310N sa vezivom baziranim na polyacetalu sa polyetilenom čiji je tipični sastav nakon sinteriranja (Fe, C 0,20-0,50%, Cr 24-26%, Ni 19-22%, Si 0,75-1,30%, Nb 1,2-1,5%, Mn <1,5%, Ostali < 2,0%). Karakteristike viskoznosti feedstock-a CATAMOLD 310N za raspon temperature od 170 do 190 °C prikazane su na slici 44.

Na osnovu eksperimentalnih vrijednosti viskoznosti određeni su koeficijenti viskoznosti materijala (tablica 5.) koji je prikazan u matematičkom modelu (1).

Tablica 5. - Koeficijenti viskoznosti materijala [38]

A	5.48091
B	0.403646
C	0.0178002
D	-0.0576995
E	0.000327771
F	-9.38505e-005

Na slici (44.) prikazan je dijagram viskoznosti u funkciji temperature i brzine smicanja



Slika.44. Viskoznost u funkciji temperature i brzine smicanja [38]

Catamold - Granulat visoke kvalitete za MIM (metal injection molding) i CIM (ceramic injection molding) proizvođača BASF SE. Niskolegirani, visokolegirani i nehrđajući čelici, specijalne legure i keramika iz inovativne palete Catamold materijala nailaze na široku primjenu u elektro i automobilske industriji, kao i u ostalim granama industrije gdje se na konvencionalnim strojevima za brizganje postiže povoljna, pouzdana i precizna proizvodnja geometrijski zahtjevnih dijelova.

Catamold materijalima moguće je postići gustoću i do 100%, homogenu strukturu te mehanička svojstva odabranog čelika ili keramike. Sva ta svojstva kao i kvaliteta površine dovode do toga da naknadna obrada proizvedenih komada u većini slučajeva nije potrebna.

Neki od standardnih materijala su prikazani u tablici:

Tablica 6. – Prikaz nekih od Catamold standardnih materijala koji se često upotrebljavaju u raznim granama industrija [37]

Niskolegirani čelici	Osnovne karakteristike	DIN	AISI	UNS
Catamold 42CrMo4	Niskolegirani čelik za toplinsku obradu	1.7225	4140	G41400
Catamold 8740	Niskolegirani čelik za toplinsku obradu	1.6546	8740	G87400
Catamold 8620	Niskolegirani čelik za toplinsku obradu	1.6523	8620	G86200

Nehrđajući čelici	Osnovne karakteristike	DIN	AISI	UNS
Catamold 310	Nehrđajući čelik za visoke temperature	1.4841	310	S31000
Catamold 420	Martenzitni nehrđajući čelik	1.4021	420	S42000
Catamold 17-4 PHK	Nehrđajući čelik za kaljenje	1.4542	SAE J467 (17-4PH)	S17400
Catamold 316L	Nehrđajući nemagnetični čelik	1.4404	316L	S31603
Catamold P.A.N.A.C.E.A.	Nehrđajući nemagnetični čelik bez Nikla			

Keramika	Osnovne karakteristike			
Catamold AO-F	Aluminijev oksid 99,8%			
Catamold TZP	Cirkonijev oksid (5% Itrij)			
Catamold TZP-A	Bijeli cirkonijev oksid (5% Itrij)			
Catamold TZP-F315	Crni cirkonijev oksid (5% Itrij)			

13.3.2. PVT i termalna svojstva sirovine („feedstock-a“)

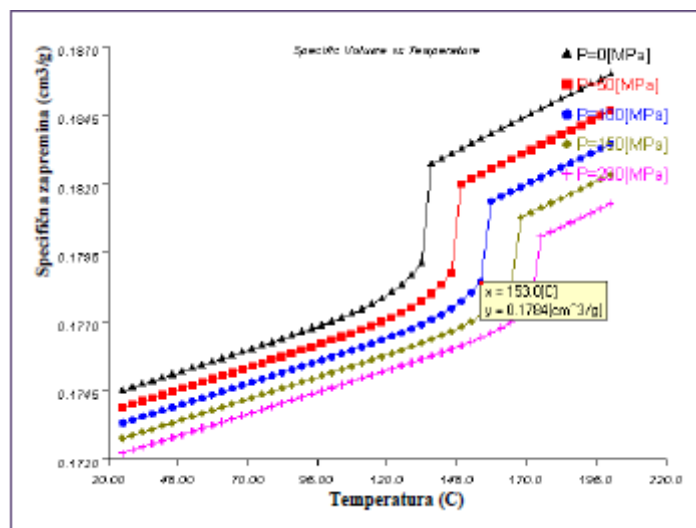
Pri numeričkoj simulaciji potrebno je opisati ponašanja specifične zapremine u zavisnosti tlaka i temperature. PVT svojstvo MIM sirovine pored viskoznosti, predstavlja ključni podatak za fazu injektiranja. Zavisnost specifične zapremine, tlaka i temperature može se opisati matematičkim modelom. Model treba definirati zavisnost $V(P,T)$ u tri karakteristična područja:

- Taline, taline + krutine, krutine.
- 2D Tait model koji je korišten u FE simulaciji dat je jednadžbom (2):

$$V(T,P) = V_o(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right] + V_t(T,P) \dots (2)$$

gdje su: $V(T,P)$ – specifična zapremina na temperaturi T i tlaku P ,
 V_o – specifična zapremina na nula tlaku,
 T – temperatura ,
 P – tlak ,
 $C = 0.0894$ – konstanta,
 B – osjetljivost materijala na tlak.

Na slici (45) prikazan je dijagram zavisnosti specifične zapremine u funkciji tlaka i temperature (PVT). [38]



Slika.45. Zavisnost specifične zapremine u funkciji tlaka i temperature - PVT

13.4. MIM PROCES - REDOSLIJED OPERACIJA MIM TEHNOLOGIJE

Injekcijsko prešanje metala – MIM (*en. Metal Injection Moulding*), može se opisati slikovitom shemom [34]:

Na slici (46) je prikazan redoslijed operacije MIM tehnologije.



Slika 46. MIM postupak – injekcijsko prešanje metala [34]

MIM proces sjedinjuje strukturne prednosti metalnih materijala sa složenošću oblika koji se postiže injekcijskim prešanjem polimera. Mješavina praha i veziva koja se ubrizgava u kalup mora biti homogena. Prahovi za MIM su sferičnog oblika i mnogo sitniji od onih za konvencionalno sabijanje u hladnom ukovnju (MIM prašak: 10...20 μm ; konvencionalni prašci: 50...150 μm).

Kad je izradak izbačen iz kalupa, vezivni materijal se uklanja ili otapanjem i ekstrakcijom ili/i toplinskim procesom, a zatim se otpresak sinterira. Uslijed velike količine veziva u početnom materijalu (do 40 % volumena), MIM otpresak je podvrgnut velikom smanjenju volumena (čak do 20 % linearnog skupljanja) tijekom sinteriranja. Dimenzijske tolerancije stoga nisu tako dobre kao kod konvencionalnih postupaka sabijanja u ukovnju.

Opće karakteristike MIM-a jesu:

- ograničen broj materijala koji se može prešati -niskolegirani i nehrđajući čelici, legure za meke magnete, mjedi, bronce, WC, čisti Ni, legure za elektrotehniku (Invar i Kovar) te W-Cu kompoziti;
- postupak je ograničen na relativno male proizvode vrlo složenog oblika za srednje do velike količine;
- skuplji je od konvencionalnih postupaka;
- problem je izbor vezivnog sredstva.

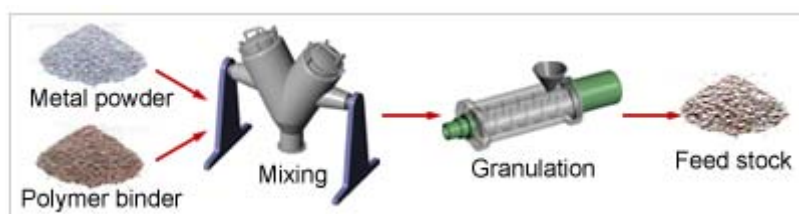
13.4.1. Načelo rada MIM postupka

1. Sirovina-miješanje i granuliranje (priprema granulata)

Priprema sirovine -

Prvi korak je stvoriti praškastu mješavinu metala i polimera (veziva). Metalni prahovi koji se koriste su mnogo sitniji (obično ispod 20 mikrona) od onih koje se koriste u procesu tradicionalne metalurgije praha. Metalni prašak se miješa zajedno s termoplastičnim polimerima (veziva) u toplom stanju, nakon što se ohladi, granulira se u homogenu sirovinu u obliku peleta. Dobivena sirovina sadrži obično 60% volumena metala, a 40% volumena polimera (veziva).

Na slici (47) je prikazan redosljed operacije za miješanje i granuliranje sirovine koju ćemo koristiti

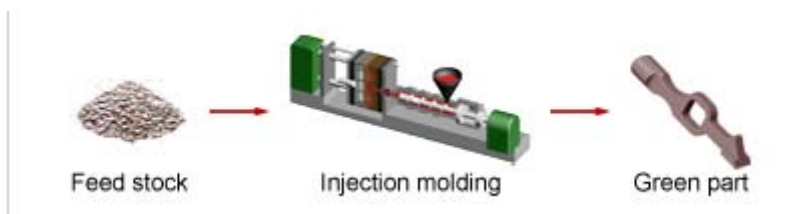


Slika 47. Prikaz miješanja sirovine te granuliranja [39]

2. Ubrizgavanje

Sljedeći korak je prešanje dijela u konvencionalnom stroju za injekcijsko prešanje (ubrizgavanje) koji je prikazano na slici (48). Sirovina pelete se gravitacijski izvlači iz spremnika u stroju barela, gdje grijači rastope veziva, dovode sirovine do oblika nazvanog „pasta za zube“. Klipni vijak gura materijal u dva dijela kalupa kroz otvore vrata. Nakon što se ohladi, "zeleni" dio je izbačen iz kalupa sa svojom vrlo složenom geometrijom koja je u potpunosti formirana (kao što je prikazano na slici 48).

Na slici (48) je prikazan redosljed operacije za ubrizgavanje (oblikovanje sirovine)



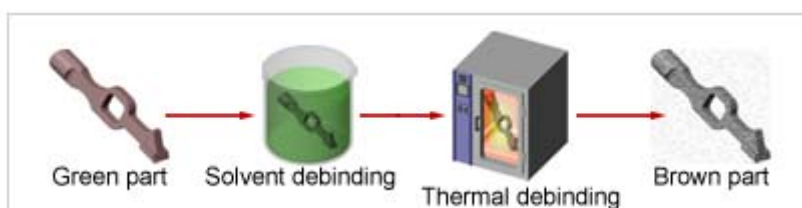
Slika 48. Prikaz oblikovanja sirovine [39]

3. Odstranjivanje veziva

Ovaj korak uklanja polimerno vezivo od metala. Dobiveni dio, više poznat kao "zeleni dio," još uvijek se sastoji od istog udjela metala i polimera veziva koji su činili sirovinu, te je u svim svojim dimenzijama oko 20% veći od gotovog dijela.

Sljedeći korak je uklanjanje većine veziva. Ovaj proces, obično se naziva "debinding," može se izvesti kemijski (katalitički debinding) ili toplinski. Izbor „debinding“ metode ovisi o materijalu koji se obrađuje, fizikalnim i metalurškim svojstvima i kemijskom sastavu. "Zeleni" dio je grijan u peći na niskoj temperaturi, čime se polimer vezivo ukloni uparavanjem (odstranjivanjem u obliku pare). Kao rezultat toga, nakon odstranjivanja (debinding), preostali dio se naziva "smeđi dio" i sadrži oko 40% praznog prostora volumena.

Na slici (49) je prikazan redosljed operacije za odstranjivanje veziva



Slika 49. Prikaz odstranjivanja veziva [39]

4. Srašćivanje (sinteriranje)

Srašćivanje je zadnja faza procesa koju postiže „smeđa“ komponenta. Sinteriranje (hrv. srašćivanje) je spajanje čestica pri visokoj temperaturi. Može uslijediti na temperaturi ispod temperature tališta (cca $2/3 T_t$) u krutom stanju difuzijom atoma, ali se u nekim stadijima srašćivanja može javiti i taljevina.

Završni korak za srašćivanje provodi se u peći visoke temperature (do 2500 ° F) kako bi se smanjio prazan prostor od oko 1-5%, što je rezultat visoke gustoće (95-99%) metalnog dijela. Za sinteriranje se obično upotrebljavaju električne prolazne peći. Otpresci složeni u ladice na jednoj strani, stavljaju se u peć, prolaze kroz nju i uzimaju se na drugoj strani kao sinterirani. Pri izlazu iz peći nalazi se komora za hlađenje. Zaštitna atmosfera u pećima za sinteriranje sprečava oksidaciju.

Najčešće se upotrebljava redukcijaska atmosfera, ili se sinteriranje obavlja u vakuumu.

Na slici (50) je prikazan redosljed operacije za sinteriranje



Slika 50. Prikaz procesa sinteriranja [39]

Za MIM-postupak ne može se reći da je najbolje rješenje u odnosu na druge proizvodne metode, ali nudi alternativni proizvodni put, kojim se daju rješenja za dijelove koji su u prošlosti bili vrlo teški i preskupi za proizvodnju. MIM-postupak je najučinkovitiji za male, složene komponente u godišnjim količinama od 1000 i više (ako je dio posebno složen i skup, MIM bi još uvijek mogao biti isplativ za količine od 500 ili više). Može biti koristan ako se dva ili više dijelova izrađuju odvojeno, a sklapaju u završnoj fazi.

Injekcijsko prešanje metala može omogućiti miješanje ili spajanje tih dijelova u jednu komponentu i tako smanjiti rizik grešaka, izbjeći gubitke uzrokovane sklapanjem i eliminirati skupe sekundarne operacije. Dijelovi mogu sadržavati tekst, logotip ili serije kodova. Tim postupkom se postiže značajnije uštede u odnosu na postupke preciznog lijeva.

13.5. Primjena MIM-a

MIM poboljšava kvalitetu proizvoda, skraćuje vrijeme proizvodnje i postiže uštedu troškova čak do 50% u odnosu na postupke kovanja čelika i postupke preciznog lijeva .

Kao rezultat tih prednosti MIM proces postaje široko prihvaćen kao standardni postupak unutar industrijskih sektora.

Metalni dijelovi proizvedeni iz procesa MIM nalaze se u brojnim industrijama, uključujući i zrakoplovnu, automobilsku, te potrošačke proizvode, medicinu, stomatologiju i telekomunikacije.

MIM komponente se mogu naći u mobitelima, sportskoj opremi, kod električnih alata, kirurških instrumenata i raznih elektroničkih i optičkih uređaja.

13.6. Proizvodi MIM-a

Klizni zatvarač se koristi kao MIM komponenta, kao središnji element za sjedala u automobilima. [36]



Slika 51: Klizni zatvarač [36]

Brave automobila, bravarske kapice ove MIM komponente koriste se u mnogim europskim vozilima. Kroz zadane atribute MIM materijal osigurava visoki stupanj sigurnosti protiv otvaranja na silu. [36]



Slika 52: Brave automobila [36]

Rebalans ručna kočnica

Rebalans jedinica sastoji se od tri ručne MIM - komponente. MIM materijali se postižu odgovarajućom toplinskom obradom. Osiguravaju čvrstoću, širenje i tvrdoću u uskom i definiranom rasponu tolerancije i sposobnosti potrebnih za prijenos snage. [36]



Slika 53: Rebalans ručna kočnica [36]

Potražnja za MIM-om u medicinskoj djelatnosti je dodatno povećana od najnovijih smjernica koje je postavio Britanski institut za zdravlje i kliničku specijalnost. Povećala se bolnička potražnja za jednokratnu upotrebu proizvoda. Proizvodi za jednokratnu upotrebu moraju biti visoke kvalitete i odgovarati geometriji postojećih instrumenata. [35]



Slika 54: Troakar za postavljanje katetera za peritonealnu dijalizu [35]

14. ZAKLJUČAK

Kompoziti predstavljaju veliki izazov, ali i pružaju nove mogućnosti za svakoga konstruktora, projektanta i inženjera. Nove mogućnosti donose isto tako i nove probleme. Čest je slučaj slabog prijanjanja matrice i ojačala, te je potrebno naći prikladna veziva da se riješi taj problem, ili kemijski treba izmijeniti ojačala i matricu. No, također treba istražiti i mogućnosti uporabe, jer će u budućnosti uporabljivi kompoziti imati prednost pri izboru materijala.

Jedan od najbrže rastućih segmenata industrije kompozita je područje kopnenog transporta, pri čemu najveći dio otpada na automobilsku industriju. Iako se može očekivati da će industrija kompozita rasti, brzina rasta ovisit će o nekoliko čimbenika. Najvažniji je tehnički napredak koji će omogućiti proizvodnju visokih serija ubrzanjem procesa proizvodnje. Ostali se odnose na konkurentnost cijene materijala, svojstva i trajnost kompozita u širokom spektru upotrebe.

Intenzivno se radi na zamjeni postojećih materijala kompozitima s biljnim vlaknima. Osim što su jeftini i lagani, uporaba je lako izvediva. Ugljikova su vlakna pak još uvijek namijenjena samo za skupe primjene. No kako će potrošnja rasti, a proizvodnja postajati dostupnija i jeftinija, cijena će padati. Zbog toga nije nerealno očekivati skoriju pojavu elemenata karoserije od ugljikovih vlakana kod *običnih* automobila. Upotrebi modernih kompozita pogodovat će *Direktiva 2000/53/EC* Europske unije, koja traži da zemlje članice do 2015. godine iskoriste i uporabe 95 % otpadnih vozila. Već je počela proizvodnja vanjskih dijelova koja vodi prema budućim konstrukcijama ultralakih automobila i konačnoj viziji automobila.

Kompoziti s metalnom matricom predmet su interesa, 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. 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.

Ojačala, kontinuirana ili diskontinuirana, mogu činiti 10 do 60 vol.% kompozita. Kontinuirano vlakno ili vlaknasta ojačala uključuju ugljik (C), silicijev karbid (SiC), bor, aluminijev oksid (Al₂O₃) i metale visokog tališta. Diskontinuirana ojačala sastoje se uglavnom od SiC u obliku viskera (w), čestica (p) SiC, Al₂O₃ ili titanova diborida (TiB₂) i kratkih ili nasjeckanih vlakana Al₂O₃ ili ugljika [2].

Najistaknutije karakteristike metalnih matrica vidljive su u različitim oblicima, posebice u tome što metalna matrica daje metalnu prirodu kompozitu u smislu toplinske i električne vodljivosti, proizvodnih procesa i interakcije s okolišem. Dominirajuća mehanička svojstva matrice, kao modul elastičnosti i čvrstoće u poprečnom smjeru kompozita s usmjerenim ojačalima, dovoljno su visoka u nekih MMC-a da je moguće jednosmjerno slaganje u nekim inženjerskim konstrukcijama.

Upornim radom na MIM tehnologiji, pomiču se granice razvoja procesa i time se postiže uspješno napredovanje ispred konkurencije. Postignuta je lakša i jeftinija proizvodnja.

Kod MIM-a je konačni proizvod od čistog metala, s obzirom da se polimer koristi samo kao vezivo, da bi se metal mogao injekcijski prešati.

MIM poboljšava kvalitetu proizvoda, smanjuje vrijeme proizvodnje i postiže uštedu troškova čak do 50% u odnosu na postupke preciznog lijeva. Kao rezultat ovih pogodnosti MIM proces postaje široko prihvaćen kao standardna tehnika unutar nekih industrijskih sektora.

Tijekom posljednjih desetljeća MIM tehnologija (ubrizgavanje kompozita - praha sa rastopljenim vezivom) je postala pouzdana tehnologija za serijsku izradu metalnih i keramičkih komponenti složenih oblika. Danas MIM industrija doživljava ekspanziju potiskujući konkurentske tehnologije i preuzimajući dio njihovog tržišta. Za područje jugoistočne Europe je od posebnog

interesa da usvoji ovu tehnologiju, a dosadašnje iskustvo i znanje iz srodnih oblasti omogućava relativno jednostavno usvajanje tehnologije injekcijskog prešanja metalnih kompozita (MIM) koje je našlo široku primenu u elektronici, avio-industriji, automobilskoj industriji, kemijskoj industriji, medicini itd. Radi se o serijskoj proizvodnji kompleksnih metalnih komponenti malih dimenzija i složenih geometrija sa tolerancijama manjim od $\pm 0.3\%$. Ove komponente se odlikuju velikom čvrstoćom, mehaničkom snagom, otporne su na habanje, koroziju i starenje, stabilnih su dimenzija, podnose visoke radne temperature.

LITERATURA

- [1] Prof.dr.sc. Tomislav Filetin, doc.dr.sc. Gojko Maric
Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu - Zavod za materijale
- [2] Pleše, T.: Ispitivanje mehaničkih svojstava regenerata drvno-plastičnog kompozita, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2004.
- [3] http://www.sfzg.unizg.hr/_download/repository/kompoziti.pdf
- [4] <http://bs.scribd.com/doc/30929402/Materijali-II-Kompozitni-Materijali-Predavanja-Spanicek>
- [5] http://vtsbj.hr/images/uploads/Tehnicky_materijali_12-II.pdf
- [6] <http://www.plastikainfo.com/tehnologija/kompozitni-materijali>
- [7] <http://www.scribd.com/doc/36204378/Kompoziti-skripta>
- [8] http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zav_teh_meh/katedre/
- [9] Macan, J.: nastavni materijali iz kolegija *Kompozitni materijali*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2011
- [10] M.S.M. Alger: "Polymer Science Dictionary", Elsevier Applied Science, Metal Matrix Composites, *Advanced Materials&Processes* 12/98, p. 19-23.
- [11] D.A. McCoy, D.J. Lloyd: "Fabrication of graphite fibre reinforced aluminium", *Canadian Aeronautics and Space J.* v. 33, 3/1987, p. 11-17.
- [12] V. Sundararajan: "Aluminum Composites In Aerospace Applications", <http://home.att.net/~s.prasad/almmc.htm>
- [13] M. Lima, D. Santos: "Metal Matrix Composites from Self-Propagating Synthesis and Hot Pressing", *European Microscopy and Analysis* 9/2001, p. 29-31.
- [14] „Reinforced Aluminum via the PRIMEX CASTTM Foundry Process", www.msematerials.com/mmc.html, 2003, p. 1-3.
- [15] D. Lewis, M. Singh, S.G. Fishman: "In situ COMPOSITES", *Advanced Materials&Processes* 7/95. p. 29-31.
- [16] A.W. Urquhart: "Molten Metals Sire MMCs, CMCs", *Advanced Materials&Processes* 7/91,p. 25-29.
- [17] "Sprayforming of particle reinforced cooper and aluminum composites", <http://sfb372.iwt.uni-bremen.de/project-d2-eng.html>, 2002, p. 1-2.
- [18] "Rapid-solidification processing improves MMC properties", *Advanced Materials&Processes* 11/90, p. 71-73.
- [19] M.E. Buck: "Advanced fibres for advanced composites", *Advanced Materials&Processes* 9/87, p. 61-67.

- [20] A.L. Geiger, M. Jackson: "Low-expansion MMCs boost avionics", *Advanced Materials&Processes* 7/89, p. 23-30.
- [21] T. Takami, M. Fujine, Sh. Kato, H. Nagai, A. Tsujino, Y. Masuda, M. Yamamoto: "MMC All Aluminum Cylinder Block for High Power SI Engines", *SAE TECHNICAL PAPER SERIES* 1/2-1231, p. 1-11.
- [22] D.O. Kennedy: "SiC Particles Beef Up Investment-Cast ALUMINUM", *Advanced Materials&Processes* 6/91, p. 42-46.
- [23] "Intermetallic Ti composite has good fracture toughness", *Advanced Materials&Processes* 4/02, p. 9.
- [24] T.E. Wilks: "Cost-effective magnesium MMCs", *Advanced Materials&Processes* 8/92, p. 27-29.
- [25] E. M.: *Werkstoffe für den Überschallsprung, INGENIEUR- WERKSTOFFE* v.4, 11/92, p.12-14.
- [26] A.K. Lee, L.E. Sanchez-Caldera, S. Turker Oktay: "Liquid-metal mixing process tailors MMC microstructures", *Advanced Materials&Processes* 8/92, p. 31-34.
- [27] D.J. Weiss: "Casting metal matrix composites", *Advanced Materials & Processes* 3/98, p. 29-30.
- [28] Ch.S. Rice, P.F. Mendez: "Slurry –Based Semi-Solid DIE CASTING", *Advanced Materials&Processes* 10/02, p. 49-52.
- [29] Prof.dr.sc. Tomislav Filetin, doc.dr.sc. Gojko Maric
Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu - Zavod za materijale
- [30] Dio teksta je objavljen u članku I. Žmak, F. Kovačiček: „Proizvodni postupci za izradu metalnih kompozita“. Zbornik radova savjetovanja MATRIB2004, Vela Luka, lipanj 2004.
- [31] F. Petzoldt, "Micro powder injection moulding – challenges and opportunities", *Powder Injection Moulding International*, Vol.2, No. 1, pp. 37-42,
<http://www2.etf.unssa.rs.ba/infoteh/rad/2009/E-I/E-I-20.doc> 05.Srpanj.2010
- [32] EGIDE UK Specialist in Metal, Ceramic & Plastic Injection Moulding
http://www.egideuk.com/what_is_mim.php 17. Lipnja.2010
- [33] Powder metallurgical injection moulding MIM – Metal Injection Moulding
http://www.sintermetalltechnik.com/sixcms/media.php/1751/SST_MIM_engl.pdf 19
Lipnja.2010
- [34] Postavljanje katetera za peritonejsku dijalizu endoskopskim načinom
<http://zorancala.iz.hr/postavljanje.html> 28. Lipnja.2010

- [35] Novi materijali 2 predavanje Franz PM materijali i super legure
http://www.fsb.hr/NewsUpload/30_09_2006_5504_Novi_materijali_II_predavanje_Franz.ppt 08
Lipnja.2010
- [36] http://www.mimaweb.org/About_MIM.htm
- [37]
<file:///L:/Eksperimentalni%20rad%20-%20diplomski/Metal%20Injection%20Molding.html>
- [38] Powder Metal Technologies and Applications; ASTM Handbook, Volume7, 1998.