

Kompoziti

Composite Materials

Ladislav Kosec, *Odsek za metalurgijo in materiale, FNT, Ljubljana*

Opisane so splošne značilnosti kompozitnih materialov, njihovih sestavin in njihovih bistvenih lastnosti. Primeri kažejo, kako se njihove lastnosti ocenijo vnaprej.

Ključne besede: kompoziti, matica, armatura, vlakna, kritični in minimalni volumen

General properties of composite materials are described, especially characteristics of matrices and strengthening elements. It is shown in some cases how their properties can be forecast.

Key words: composite materials, matrix, reinforcements, fibres, minimal and critical volume

Definicij za to, kaj je kompozitni material je več. Za veliko primerov velja, da je kompozitni material sestavljen iz dveh ali več različnih materialov na makroskopskem nivoju. Makroskopsko pomeni, da se sestavine ločijo s prostim očesom. Veliko kompozitov zadostuje temu kriteriju, čeprav so sestavine nekaterih manjše od 10 μm .

Kompozitni materiali zadoščajo naslednjim dogovorjenim kriterijem:

- niso naravne tvorbe; so delo človeških rok
- sestavljata jih dve ali več komponent različne kemične sestave, ki sta (so) med seboj jasno razmejene
- imajo lastnosti različne od lastnosti sestavin
- so homogeni v makroskopskem in heterogeni v mikroskopskem merilu
- delež, oblika in razdelitev sestavin se načrtuje vnaprej
- lastnosti kompozita so določene z vsako od komponent, kar pomeni, da mora biti količina le-te večja od minimalne

Sestavina, ki je zvezna po vsem kompozitu, je matica.

Prekinjena in razdeljena sestavina so elementi utrjevanja oziroma armiranja ali kar armatura.

V odvisnosti od razporeda elementov armiranja so kompoziti izotropni ali anizotropni (Slika 1.).

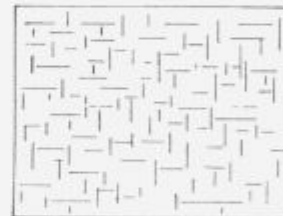
Čeprav so po omenjeni definiciji kompoziti le delo človeka, je v naravi mnogo materialov, ki imajo vse značilnosti kompozitov.

Tak primer je les, sestavljen iz celuloznih vlaken v matici lignina. Celulozna vlakna imajo veliko trdnost, niso pa toga. Matica spaja celulozna vlakna in skrbi za togost.

Človek že dolgo uporablja nekatere tehnične materiale, za katere je značilna kompozitna zgradba npr. betone, asfalte. Ljudje so že v davni spoznali ugoden efekt kompozitnega materiala. Gradili so z opekami, izdelanimi iz blata in slame, zlepljali les; tudi ometan kamniti zid lahko sodi med te primere. V srednjem veku so izdelovali predvsem orožje iz različnih materialov.



ARMIRANJE V ENI SMERI



ARMIRANJE V DVEH SMEREH (V RAVNINI)



IZOTROPNO ARMIRANJE

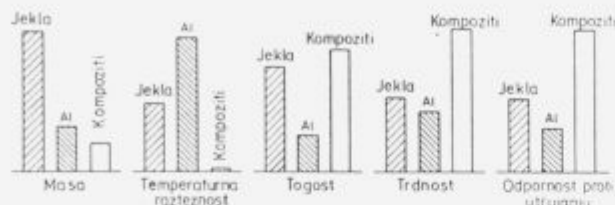
Slika 1 Trije načini orientacije elementov utrjevanja (vlakna)

Figure 1 Three types of orientation reinforcement

Kot raziskovalna in tehnična disciplina se je to interdisciplinarno področje začelo v 60 letih. V tem času se je pojavila zahteva po trdnih, togih in lahkih materialih, ki naj bi pomagala uresničiti človeške načrte v zvezi z letali, vesoljem, varčevanjem z energijo in različnimi konstrukcijami.

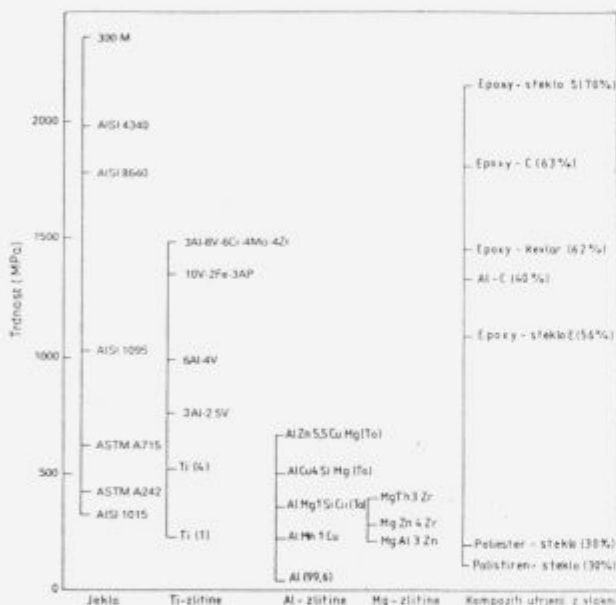
Z enovitimi materiali teh načrtov ni bilo moč speljati, saj zahtevane lastnosti pri večini materialov divergirajo (Slike 2,3,4). Tako se je rodila ideja o kombinaciji različnih materialov v integrirani sistem - kompozit, ki naj bi bil sposoben

zadostiti tem željam. Taki materialni sistemi pokažejo lastnosti povezane z vsemi sestavinami in možnosti načrtovanja in izdelave. To pa je bilo precej več kot je bilo pričakovati po prvih korakih. Že iz prvih desetletij tega stoletja je poznan fiberglas, lahek, trden vendar premalo tog, ker imajo steklena vlakna premajhen modul elastičnosti.



Slika 2 Primerjava lastnosti med enovitimi klasičnimi materiali in kompoziti¹

Figure 2 Comparison between conventional monolithic materials and composite materials¹



Slika 3 Primerjava trdnosti med konvencionalnimi kovinskimi zlitinami in kompoziti⁴

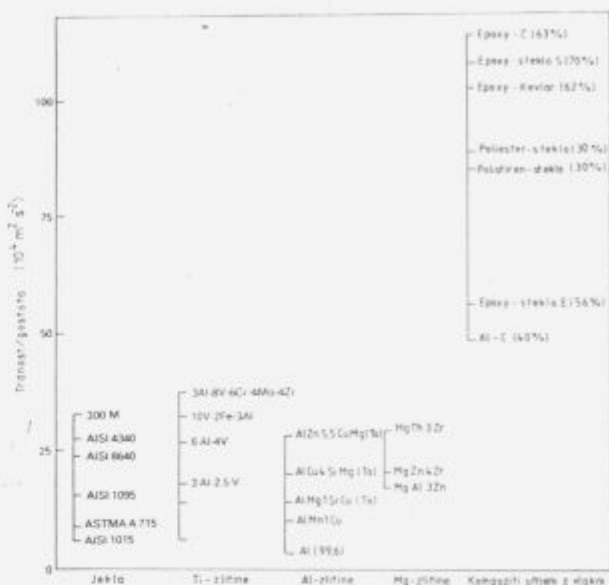
Figure 3 Comparison of strength between metall alloys and composite materials⁴

V zadnjih desetletjih pa so se uveljavila vlakna z zelo velikim modulom elastičnosti, ki so poleg tega še trdna in lahka. To so vlakna bora, ogljika, SiC ali Al₂O₃, ki utrjujejo kompozite z vsemi vrstami matic.

Vrste kompozitov

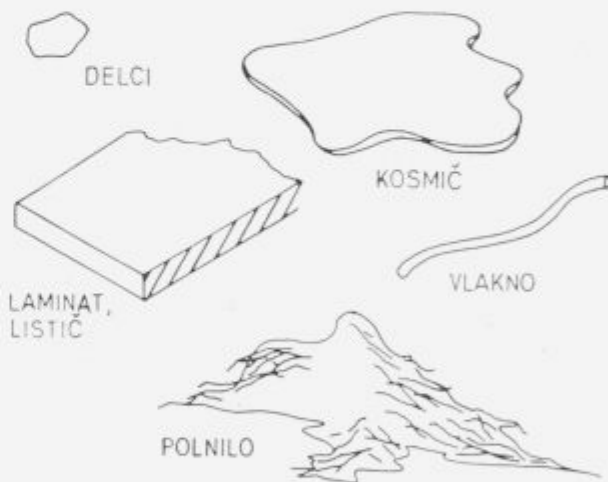
Kompoziti so lahko sestavljeni iz različnih materialov. Možnih pa je le pet osnovnih skupin (Slika 5,6):

- 1.) kompoziti z vlakni (z ali brez matice)
- 2.) kompoziti z delci
- 3.) kompoziti s kosmiči
- 4.) kompoziti z laminati, lističi
- 5.) kompoziti s polnilom



Slika 4 Primerjava specifične trdnosti med konvencionalnimi kovinskimi zlitinami in kompoziti

Figure 4 Comparison of strength/density ratio between conventional metall alloys and composite materials



Slika 5 Sestavine kompozitov

Figure 5 Constituent forms in composite materials

Armiranje kompozitov je možno na več načinov: z delci (dolgi, kratki, viskersi), kosmiči-lamelami, ploščami in polnili.

Kompoziti se klasificirajo po določenih kriterijih, ki vsebujejo:

- material matice in armaturnih elementov
- geometrijo sestavin
- strukturo in razpored sestavin
- način izdelave

Splošno poenostavljeno poimenovanje izhaja iz materiala matice, z imenom armature in njeno obliko.



Slika 6 Vrste kompozitov

Figure 6 Classes of composite materials

Kompoziti armirani z vlakni so boljši od drugih vrst, ker ima večina materialov v obliki vlaken večjo trdnost in togost kot v masivni ali drugi obliki. Utrjujejo prvenstveno vzdolž osi, v prečni smeri zanemarljivo. Dvodimenzionalna ali armatura v prostoru pomenita rešitev te slabosti, prav tako tudi laminatne ali sendvič konstrukcije.

Vlakna, ki se uporabljajo za armiranje kompozitov naj imajo naslednje lastnosti:

- majhno gostoto
- veliko trdnost in modul elastičnosti pri vseh delovnih temperaturah
- minimalno topnost v matrici
- kemično obstojnost
- brez faznih transformacij
- nestrupena
- primerna za tehnološke postopke.

Uporabnost vlaken kot kvalitetnega elementa za armiranje povečujejo še naslednje lastnosti:

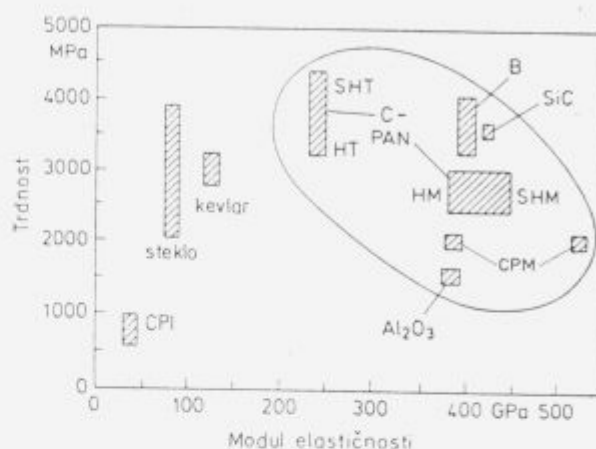
- majhen premer omogoča doseganje trdnosti, ki so blizu teoretične
- veliko razmerje dolžine in premera omogoča dober prenos obremenitve matice na vlakno
- velika prožnost in upogljivost, ki sta značilni za vlakna velikega modula elastičnosti in majhnega premera, omogočata vrsto tehnoloških postopkov z vlakni (pletenje, zvijanje,...)

Vsa vlakna, ki se danes največ uporabljajo, imajo majhno gostoto. Veliko trdnost jim zagotavlja kovalentna vez. Veliko vrst vlaken ima anizotropijo mehanskih lastnosti.

Najbolj pogosta med vlakni so:

- steklena vlakna so izdelana iz stekel različne kemične sestave; večino sestavlja 50 - 60 % SiO_2 ter oksidi kalija, bora, natrija, aluminija in železa.
- kovinska vlakna so iz volframa, berilija, molibdena in visokotrdnih ogljikovih in nerjavnih jekel.

- danes imajo največjo veljavo trdna, lahka in toga vlakna bora, ogljika in vlakna SiC in Al_2O_3 . Med vlakni organskega izvora so veljavna posebej aramidna (kevlar) in polietilenska (Slika 7).



Slika 7 Lastnosti vlaken
CPI - izotropno ogljikovo vlakno,
CPM - mezofazno ogljikovo vlakno

Figure 7 Fibers properties

Materiali matice

Matica daje kompozitnemu materialu obliko in monolitnost. Skrbi za razporeditev oziroma položaj elementov armature. Zagotavlja nosilnost kompozita tako, da prenaša obremenitve na vlakna, ki so glavni nosilni element. Prenša obremenitve porušeni in kratkih vlaken na sosednja vlakna, zmanjšuje koncentracije napetosti ob napakah, ustavlja razpoke in je zaščita vlaken pred mehanskimi poškodbami in okolico (korozijo).

Kompoziti s keramično matico delajo lahko do temperatur čez 1500°C . Tu je največja nevarnost oksidacija, proti kateri so posebno neodporna ogljikova vlakna. Z vlakni SiC ali Si_3N_4 je možno doseči delovne temperature celo $1200 - 1300^\circ\text{C}$.

Skupna značilnost visokotrdnih vlaken je majhen raztezek ob porušitvi (2 - 3%). To pomanjkljivost rešuje matica, in fiksira vlakna in prenaša obremenitve nanje; pri tem pa izrabi matica svojo osnovno značilnost, da zavira širjenje razpok.

Način povezave vlaken in matice tudi bistveno vpliva na trdnost in žilavost kompozitnega materiala. Modul elastičnosti oziroma togost kovinskih matice se lahko bistveno poveča le z armiranjem z vlakni. Večina vlaken, razen iz volframa, molibdena ali jeklenih ima tudi manjšo gostoto od kovin.

Disperzijsko in izločevalno utrjevanje zelo poveča napetost tečenja in hitrost utrjevanja, ne pa modula elastičnosti.

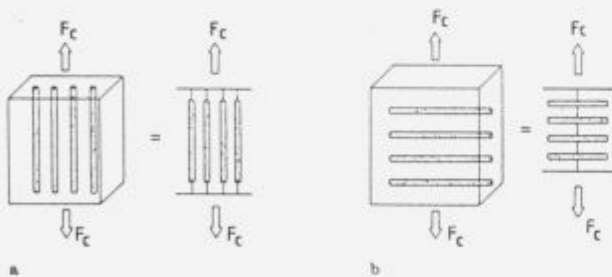
Keramične matice so praviloma trde in krhke. Imajo trdno ionsko vez in malo možnosti drsenja, kar se kaže v majhni defor-

maciji ob porušitvi in majhni lomni žilavosti. Imajo majhno toplotno prevodnost in odpornost proti toplotnim in mehanskim šokom, tudi natezna trdnost ni velika. Imajo pa velik modul elastičnosti, majhno gostoto in zdrže do visokih temperatur, s čimer prekašajo kovine. Glavna slabost je krhkost, s katero se bore že desetletja. Možnost za izboljšanje žilavosti je armiranje z vlakni (SiC, Al₂O₃, C in kovinskimi). Najbolj pogoste keramične matice so stekla, Si₃N₄, TiB₂, SiC (krhek tudi do visokih temperatur), Al₂O₃ in ZrO₂. Keramične matice se uporabljajo v kombinaciji z vlakni, ki naj bi povečala lomno žilavost in temperaturno stabilnost kompozitov s keramično matico.

Zgradba polimerov je bolj zapletena od zgradbe kovin ali keramike. Polimerne matice imajo manjšo trdnost in modul elastičnosti ter sposobnost dela pri nižjih temperaturah od kovin in keramike. V polimernih maticah prevladuje kovalentna vez, zato slabo prevajajo toploto in električni tok. Polimerne matice so praviloma lahke, žilave, odporne proti kemikalijam in vodi. So cenene, njihova predelava je preprosta.



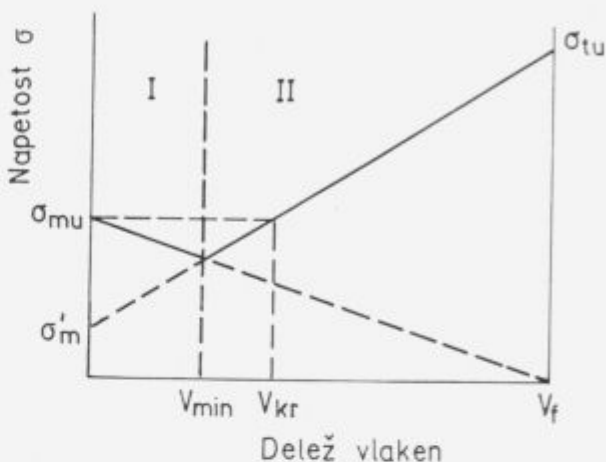
Slika 8 Shema izdelave kompozita Al-B¹
Figure 8 Schematic of Al-B composite fabrication¹



Slika 9 Kompozit utrjen z vlakni v eni smeri¹ a) vzporedna obremenitev vlaknen b) zaporedna obremenitev vlaknen
Figure 9 Unidirectional composite¹ a) isostrain b) isostress action

Kovinske matice so praviloma trdne in žilave. Pri kovinah utrditev dosežemo na več načinov. Med najbolj splošnimi načini sta izločevalno in disperzijsko utrjevanje. Na ta način se zelo povečajo napetosti tečenja in hitrost deformacijske utrditve. Vpliv teh dveh načinov utrjevanja na modul elastičnosti je zanemarljiv, saj so v maticah dispergirani delci le ovire za gibanje dislokacij, njihove interne lastnosti pa niso izko-

riščene. Togost kovinskih matic se lahko poveča le z vgraditvijo togih elementov armiranja, predvsem vlaknen z velikimi moduli elastičnosti.



Slika 10 Določitev minimalnega in kritičnega deleža vlaknen³ V področju I je množični (multipli) prelom, v področju II pa enovit.

Figure 10 Determination of minimum and critical fiber volume fraction for fibre reinforcement³ I-multiple, II-single fracture

Mejne površine v kompozitih

Lastnosti kompozita kot celote so splet lastnosti matice, vlaknen in mejnih površin med matico in vlakni. Mejne površine v kompozitih so lahko zelo velike (celo nekaj 1000cm² na cm³ kompozita). Povezava sestavin je mehanska ali kemična (reakcijska ali povezava zaradi raztapljanja in omočenja).

Večina kompozitnih materialov so termodinamično neravnotežni sistemi, za katere je značilna mreža notranjih mej in gradienti koncentracij elementov. Ti so gonilo medfaznih reakcij, ki so v omejenem obsegu neobhodni za izdelavo kompozita z dobrimi lastnostmi, intenzivne medsebojne reakcije pa običajno poslabšajo mehanske lastnosti.

Da bi imeli kompoziti stabilne lastnosti pri povišanih in visokih temperaturah, morajo biti sestavine kemično združljive, kar pomeni termodinamično in kinetično združljivost.

Termodinamična združljivost je sposobnost matice in armature, da sta v termodinamičnem ravnotežju nedoločen čas pri temperaturi izdelave in delu. Termodinamično so združljive le sestavine omejenega števila kompozitov sestavljenih iz praktično med seboj netopnih sestavin v širokem intervalu temperatur (npr. volfram in baker). Večina kompozitov pa je sestavljena iz termodinamično nezdržljivih sestavin, za katere se že iz faznih diagramov lahko ugotove smeri reakcij in fazna ravnotežja.

Ta pogosto nerešljiv problem lahko razreši kinetična združljivost, ki omogoča sestavinam kompozita, da so v nestabilnem ravnotežju, ki ga kontrolirajo pojavi kot so adsorbpcija, difuzija in hitrost kemičnih reakcij.

Nič manj od kemične, ni pomembna mehanska združljivost sestavin, ki jo določajo temperaturna razteznost, elastične last-

nosti in duktilnost. Od tega je odvisna trdnost povezave, ki je potrebna za učinkovito prenašanje obremenitev čez fazne meje.

Kompoziti s polimerno matico (PMCs) so uveljavljeni inženjerski materiali. Pri tem gre zasluga tako kvalitetnim materialom matice kot tudi vlaknen (kevlar, B, C, ...). Njihova uporaba je splošna, od preprostih izdelkov za človekovo vsakdanje življenje in užitke do zahtevnih delov bojnih strojev in naprav.

Kompoziti s kovinsko matico (MMCs) so uveljavljeni z naslednjimi najbolj znanimi kombinacijami materialov matic in vlaknen (oziroma armature): Al (ali zlitine) v kombinaciji z borom, ogljikom, aluminijevim oksidom, silicijevim karbidom ter in situ eutektični kompoziti. Uporabljajo se v zahtevnih pogojih, ko prenesejo velike obremenitve, temperature v strojih in napravah zahtevnih namenov in zanesljivosti.

V kompozitih s keramično matico (CMCs) je večinoma vloga matice in vlaknen obrnjena kot v predhodnih dveh skupinah. Velika trdnost, togost, majhna gostota in kemična stabilnost pogosto ne odtehtajo majhne žilavosti in neodpornosti proti temperaturnim šokom. Zato je filozofija načrtovanja kompozitov s keramično matico različna od one pri MMCs in PMCs, kjer je ena od osnovnih postavk veliko razmerje modulov elastičnosti vlaknen in matice ($E_f/E_m \gg 1$), ki je pri CMCs lahko tudi manjše od 1.

Postopki izdelave kompozitov so raznovrstni. Veliko jih je v celoti ali v posameznih delih izdelave povzetih iz izdelave enovitih materialov, drugi pa so v celoti na novo izpeljani.

Izdelava kompozita iz aluminijeve matice in borovih vlaknen ima npr. precej elementov poznanih iz metalurgije prahov (Slika 8).

Posebnost kompozitov je, da se lahko nekatere njihove lastnosti, posebno mehanske, izračunajo vnaprej.

Prvi preprost primer pove, kako se lahko izračunata trdnost in modul elastičnosti v kompozitu utrjenem z dolgimi vlakni, ki so vsa usmerjena v eno smer (Slika 9). Najprej izračunamo lastnosti v smeri vlaknen. Izpeljava velja za pogoj, da sta sestavini trdno povezani, da imata enaki Poissonovi števili in da se obe sestavini oziroma kompozit pod vplivom sile raztegne enako. Deformacije kompozita in obeh sestavin so enake:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m = \frac{\Delta l}{l_0}$$

(znaki c, f, m pomenijo kompozit, vlakno in matico).

Če je obremenitev tolikšna, da se obe sestavini deformirata le elastično, sta napetosti v vlaknih in matici:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f \quad \text{in} \quad \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m$$

Obremenitev na kompozit se razdeli na vlakna in matico:

$$F_c = F_f + F_m = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m$$

(A_c, A_f, A_m so prerezi kompozita, vlaknen in matice)

$$\sigma_c \cdot A_c = [E_f \cdot A_f + E_m \cdot A_m] \cdot \varepsilon_c = E_c \cdot \varepsilon_c \cdot A_c$$

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = E_f \cdot \frac{A_f}{A_c} + E_m \cdot \frac{A_m}{A_c}$$

Pri določeni dolžini kompozita so razmerja prerezov enaka volumskemu deležem sestavin. Zato se izraz lahko zapiše v običajni obliki:

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m = E_f \cdot V_f + E_m \cdot [1 - V_f],$$

kjer je $V_f + V_m = V_c = 1$. (V_f, V_m in V_c so volumski deleži vlaknen, matice in kompozita).

Enačba pove, da velja za modul elastičnosti kompozita E_c v smeri vlaknen pravilo zmesi t.j., da je odvisen od modula elastičnosti in volumskega deleža obeh sestavin.

Na enak način je sestavljen tudi izraz, ki velja za trdnost kompozita v smeri vlaknen:

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot [1 - V_f]$$

V pravokotni smeri na vlakna se mehanske lastnosti izračunajo po kriteriju enakih napetosti oziroma pravilu, ki velja za zaporedno vezane sestavine. V obeh sestavinah, vlaknih in matici, je napetost enaka:

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$$

razteg pa je enak vsoti raztegov sestavin:

$$\Delta h_c = \Delta h_m + \Delta h_f$$

Če gornji izraz delimo z začetno širino kompozita (h_c), dobimo deformacijo kompozita (specifični raztezek) v prečni smeri vlakna:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\Delta h_c}{h_c} = \frac{\Delta h_m}{h_c} + \frac{\Delta h_f}{h_c}$$

Desno stran enačbe pomnožimo z $1 = \frac{h_m}{h_m} = \frac{h_f}{h_f}$, kar da izraz za deformacijo kompozita v prečni smeri vlakna:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\Delta h_c}{h_c} = \frac{\Delta h_m}{h_m} \cdot \frac{h_m}{h_c} + \frac{\Delta h_f}{h_f} \cdot \frac{h_f}{h_c} = \varepsilon_m \cdot \frac{h_m}{h_c} + \varepsilon_f \cdot \frac{h_f}{h_c}$$

pri konstantnem prerezu kompozita so razmerja širin vlaknen in matice s širino kompozita enaka volumskemu deležu sestavin: $V_f = \frac{h_f}{h_c}$ in $V_m = \frac{h_m}{h_c}$. Zato se gornji izraz poenostavi v znano obliko za deformacijo v prečni smeri vlakna:

$$\varepsilon_{cp} = \varepsilon_{fp} \cdot V_f + \varepsilon_{mp} \cdot (1 - V_f)$$

(ε_{fp} in ε_{mp} zato, ker so posebej pri vlaknih lastnosti anizotropne).

Modul elastičnosti v prečni smeri pa je:

$$\frac{1}{E_{cp}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1 - V_f}{E_m}$$

V kompozitih, v katerih je duktilna matica utrjena z vlakni, sta zanimiva dva volumska deleža vlaken, minimalni (V_{min}) in kritični (V_{kr}).

Minimalni volumski delež vlaken je tisti, pri katerem že pride do veljave utrditev kompozitnega materiala z vlakni. Če je vlaken manj od minimalnega deleža, porušitev vlaken ni vzrok porušitvi kompozitnega materiala, ker je matica zaradi deformacijske utrditve sposobna prenesti večjo obremenitev. Pri vlaknih enakega prereza in trdnosti je trdnost kompozita v trenutku porušitve vlaken oziroma pri deformaciji, enaki porušni deformaciji vlaken, enaka:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f),$$

kjer pomeni simbol u (ultimate) trdnost (kompozita in vlaken), σ_m pa napetost v matici v trenutku, ko je napetost v vlaknih enaka njihovi trdnosti (σ_{fu}). Izraz velja, če je delež vlaken večji od minimalnega: $V_f > V_{min}$.

Pri manjšem deležu vlaken se deformacijsko utrjena matica upira obremenitvi, ki jo mora prevzeti od porušenih vlaken. Pri tem majhnem deležu vlaken je trdnost kompozita odvisna od matice.

Če pričakujemo utrditev kompozitnega materiala zaradi vlaken, mora veljati v trenutku porušitve vseh vlaken naslednji odnos:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \cdot V_f + \sigma_m' \cdot (1 - V_f) \geq \sigma_{fu} \cdot (1 - V_f),$$

kjer je σ_m trdnost matice.

Ko je med desnima stranema enakost, se lahko izračuna minimalni volumski delež vlaken:

$$V_{min} = \frac{\sigma_{fu} - \sigma_m'}{\sigma_{fu} + \sigma_m - \sigma_m'}$$

S trdnostjo vlaken se minimalni delež vlaken zmanjšuje. Kritični volumski delež vlaken (V_{kr}) je tisti, pri katerem je trdnost kompozitnega materiala enaka trdnosti nearmirane matice. Izračunamo ga iz naslednjega pogoja:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \cdot V_f + \sigma_m' \cdot (1 - V_f) \geq \sigma_{cu},$$

ko velja enakost:

$$V_{kr} = \frac{\sigma_{cu} - \sigma_m'}{\sigma_{fu} - \sigma_m'}$$

Kritični volumen se povečuje s sposobnostjo deformacijskega utrjevanja matice. Iz enačb vidimo, da je vedno $V_{min} < V_{kr}$. Na **sliki 10** je način grafičnega določevanja minimalnega in kritičnega volumna vlaken.

Z deležem vlaken sta povezana še pojma množičnega (multiplega) in enovitega (enkratnega) preloma. Ta pojav je izrazit v kompozitu s krhkimi vlakni in duktilno matico.

Kadar je delež vlaken manjši od minimalnega ($V_f < V_{min}$), porušitev vlaken ni vzrok takojšnje porušitve kompozita, če je matica sposobna prevzeti večjo obremenitev. Vlakna se pred tem porušijo na več manjših delov. To je t.i. množični (multipli) prelom.

Če pa je delež vlaken večji od kritičnega ($V_f > V_{kr}$), se pri obremenitvi, ki preseže trdnost vlaken, ta porušijo. Obremenitve, ki se prenese na matico, ta ne prenese. Zato se kompozit poruši v eni ravnini. To je enkratni (enojen) prelom. Do enkratnega preloma pride v kompozitu s krhkimi in togimi vlakni ter duktilno matico pri pogoju:

$$\sigma_{fu} \cdot V_f > \sigma_{cu} \cdot V_m - \sigma_m' \cdot V_m$$

(σ_m je napetost v matici takrat ko vlakna počijo pri σ_{fu})

Neenačba pove, da ko vlakna počijo, matica ni sposobna prenesti še dodatne obremenitve, ki so jo preje prenašala vlakna. Največ takih primerov je pri kompozitih z velikim deležem krhkih vlaken v duktilni matici. Večina vlaken poče več ali manj v eni ravnini in tako je tudi s porušitvijo kompozita.

Med posebnostmi kompozitnih materialov je njihovo reagiranje na razpoko v eni od sestavin (praviloma v bolj togi in krhki). Takrat se duktilna komponenta (pri MMCs in PMCs je to matica) resnično potruji, da bi jo ustavila. Če ji to uspe ali ne, je možno delno presoditi že iz zgoraj napisanega. Tako preprosti zapisi veljajo le za idealne pogoje.

Mnoge primere poškodb izdelkov, strojev in naprav iz materialov, ki jih po preje opisanih kriterijih ne uvrščamo med kompozite, je možno razkriti prav z uporabo mehanizmov in pravil, ki so znani in jasno definirani pri kompozitih.

Literatura

- 1 K.K.Chawla, Composite Materials, Springer-Verlag, 1987
- 2 Composites, Eng. Mat. Handbook, ASM, 1989
- 3 D.M.Karpinos, Kompozicionye Materialy, Naukovaja dumka, Kiev, 1985
- 4 D.R.Askeland, The Science and Engineering of Materials, Chapman and Hall, 1990