1. ЧВРСТОЋА КОМПОЗИТНЕ ЛАМИНЕ

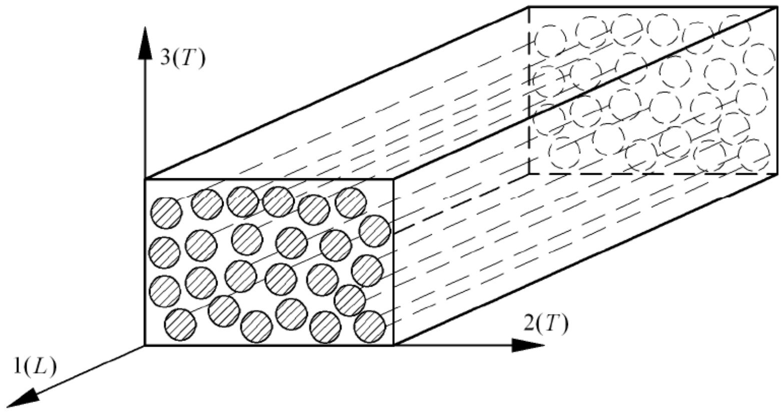
5.1. Увод

У претходном поглављу представљени су методи којима је могуће, полазећи од карактеристика фаза (влакана и матрице), предвидети карактеристике које ће имати ламина у зависности од запреминског удела фаза у ламини. Карактеристике ламине изражене су преко њених еластичних коефицијената, односно модула еластичности E_i у правцу главних материјалних оса, модула смицања G_{ij} за три нормалне равни као одговарајућих Поасонових коефицијената ν_{ij}. Сви еластични коефицијенти изражени су у функцији карактеристика влакана, матрице као и запреминских удела фаза. Овај приступ познат је као микромеханички приступ. Познавањем еластичних коефицијената ламине (укупно 9, односно 4 за раванско стање напона) могуће је изразити напон у функцији деформација ламине користећи се генералисаним Хуковим законом, односно поставити аналитичке једначине које описују напонско деформационо стање сваке композитне конструкције.

Осим овако изражених еластичних коефицијената, потребно је познавати карактеристике ламине у смислу чврстоће, односно које максималне напоне у зависности од спољашњег оптерећења је ламина у могућности да издржи без лома. Као и у претходном случају, како би се окарактерисала ламина у смислу чврстоће, биће приказан микромеханички приступ подређивања свих величина које дефинишу чврстоћу ламине као градивног елемента ламината и целе композитне конструкције. Чврстоћа ламине може бити окарактерисана преко следећих величина:

- затезна чврстоћа ламине у правцу влакана F_{1T},
- притисна чврстоћа ламине у правцу влакана F_{1C},
- затезна чврстоћа ламине попречно на правац влакана F_{2T},
- притисна чврстоћа ламине попречно на правац влакана F_{2C},
- смичућа чврстоћа ламине у материјалној равни F_6.

Претходне величине представљају максималне напоне у одређеним правцима које ламина може да издржи без лома. Уобичајена ознака за ове напоне је $\boldsymbol{F_{ij}}$ (i = 1, 2 односно j = T, C), при чему први индекс означава правац материјалне осе (оса **1** правац простирања влакана у ламини, оса **2** попречно на правац простирања влакана у ламини), док други индекс означава затезање односно притисак (*T – tension, C – compression*).

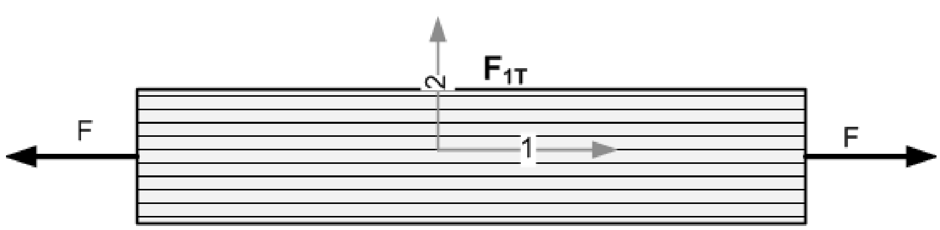


Слика 5.1. *Осе композитне ламине*

5.2. Затезна чврстоћа ламине у правцу влакна F_{1T}

Посматрамо композитну ламину са неиспрекиданим влакнима распоређеним у једном правцу (правац 1) затегнуту само у правцу влакана. Претпостављено је следеће:

– влакна су униформно распоређена у матрици,
– у матрици не постоје празнине (двофазна композитна ламина),
– остварена је идеална веза између матрице и влакана,
– нападна линија силе поклапа се са правцем простирања влакана,
– у ламини не постоје заостали напони као последице самог процеса производње композитне ламине,
– материјали влакна и матрице понашају се као линеарно еластични материјали.



Слика 5.2. Затезна чврстоћа ламине у правцу влакана

Сила у композитној ламини $\boldsymbol{F_c}$ једнака је:

$$F_c = F_f + F_m,$$

при чему су F_f и F_m силе у влакнима и матрици. На основу врсте оптерећења које делује у овом случају, као и наведених претпоставки може бити закључено да између деформација композитне ламине, влакана и матрице важи следећа веза:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

Односно, у посматраној тачки, затегнуте ламине у правцу влакана, а претпостављајући идеалну везу остварену на интерфејсу влакана и матрице, деформације композитне ламине, влакана и матрице морају бити једнаке.

Изражавајући силу у композиту, преко нормалног напона и одговарајуће површине према дефиницији нормалних напона следи:

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m$$

Нормални напон, у посматраној тачки композитне ламине може, даље, бити изражен:

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot \frac{A_f}{A_c} + \sigma_m \cdot \frac{A_m}{A_c}$$

Односно, за јединичну запремину композитне ламине нормални напон (у правцу влакана) може бити изражен и као функција запреминских односа фаза (V_f, V_m) и напона у влакнима и матрици.

$$\sigma_1 = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m$$

На основу карактеристика влакана односно матрице, а посматрајући максималне деформације сваке од фаза у композитној ламини приметићемо да постоје нека влакна, која се користе при производњи ламината, која имају мање максималне деформације при затезању ε_{ft}^u у односу на матрицу ε_{mt}^u са којом сачињавају композит.

Прво ће бити проучен случај композитне ламине за коју важи:

$$\varepsilon_{ft}^u < \varepsilon_{mt}^u$$

У овом случају напон може бити изражен преко напона у влакнима и матрици, а у зависности од њихових запреминских удела у композиту. Водећи рачуна да матрица може издржати веће деформације у односу на влакно важи следећа релација за деформацију влакна:

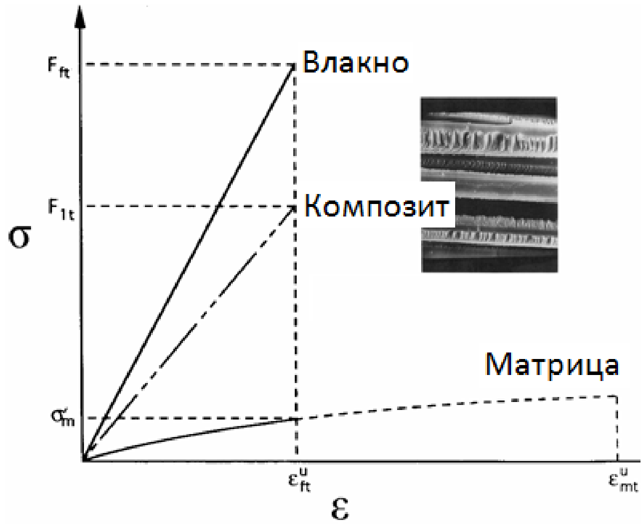
$$\varepsilon_f = \varepsilon_{ft}^u$$

У том случају затезна чврстоћа ламине у правцу влакана дата је следећим изразом:

$$, F_{1T} = F_{ft} \cdot V_f + \sigma_m^{'} \cdot V_m$$

што даље, а у функцији максималне деформације при затезању ε_{ft}^u у влакнима, може бити написано у облику:

$$F_{1T} = F_{ft} \cdot V_f + \varepsilon_{ft}^u \cdot E_m \cdot V_m .$$



Слика 5.3. Напон у композиту у функцији деформација

Односно, после сређивања претходне релације, затезна чврстоћа ламине у правцу влакана $\boldsymbol{F_{1T}}$, изражена преко затезне чврстоће влакна и модула еластичности влакана и матрице у композиту као запреминског удела матрице је:

$$F_{1T} = F_{ft} \cdot \left(V_f + E_m \cdot \frac{\varepsilon_{ft}^u}{F_{ft}} \cdot V_m \right) = F_{ft} \cdot \left(V_f + \frac{E_m}{E_f} \cdot V_m \right)$$

Претходна релација за затезну чврстоћу ламине може бити упроштена уколико се узме у обзир да важи за многа влакна и матрице:

$$E_f >> E_m$$

Претходно добијен израз за $\boldsymbol{F_{1T}}$, може бити представљен само у функцији карактеристика влакана (затезне чврстоће влакна $\boldsymbol{F_{ft}}$ и запреминског удела влакана у композиту $\boldsymbol{V_f}$):

$$F_{1t} \cong F_{ft} \cdot V_f$$

У овом случају односа затезних чврстоћа влакана и матрице може бити и дефинисан минималан запремински удео влакана у композиту ($\boldsymbol{V_{min}}$) који је неопходно обезбедити како би велику већину оптерећења понела влакна, што је, како је то и раније било назначено, њихова основна функција. Односно, полазећи од релације:

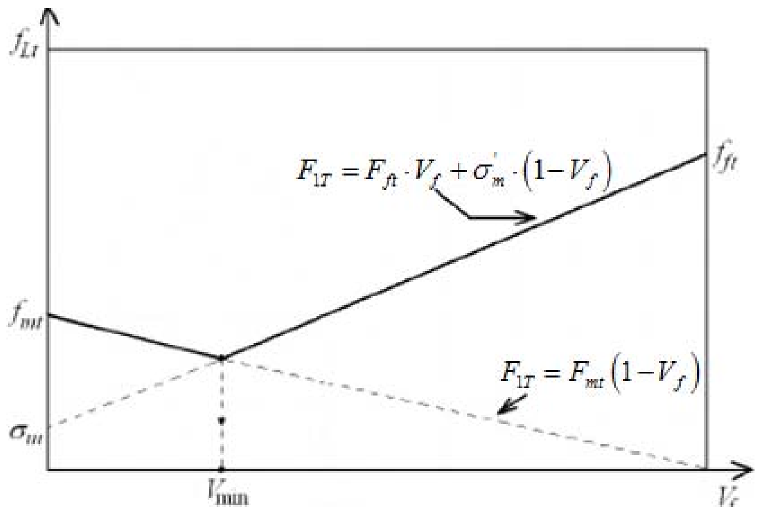
$$F_{1T} = F_{ft} \cdot V_f + \sigma_m^{'} \cdot \left(1 - V_f\right),$$

следи да влакна представљају главни носећи елемент у композиту. У случају да је запремински удео влакана у композиту мали, рецимо мањи од неког минимално потребног запреминског удела влакана који би обезбедио правилну расподелу оптерећења у композиту матрица би носила већи део оптерећења до свог лома, односно док није достигнут напон који одговара величини σ_m. У овом случају затезна чврстоћа композита F_{1T} може бити представљена следећом релацијом:

$$F_{1T} = F_{mt}\left(1 - V_f\right)$$

Дакле, у случају да је V_f мање у односу на V_{min}, а на основу претходне две релације, може бити одређен минимално потребан удео влакана у композиту:

$$V_{\min} = \frac{F_{mT} - \sigma_m^{'}}{F_{fT} + F_{mT} - -\sigma_m^{'}}$$

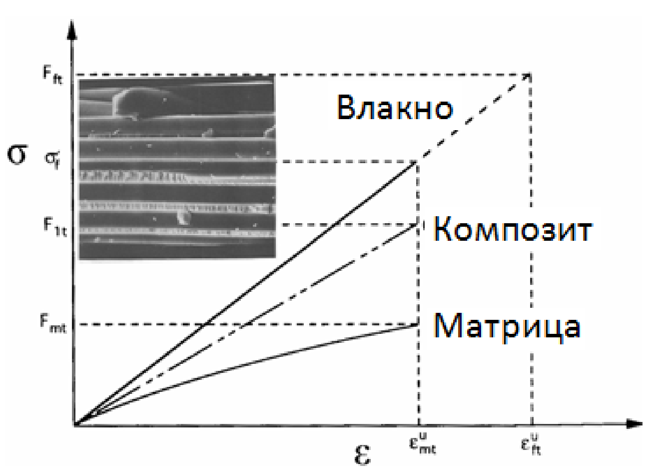


Слика 5.4.　　Одређивање минималног удела влакна

У претходним релацијама величина F_{mT} представљају затезну чврстоћу до лома матрице.

Сада ће бити размотрен случај када је :

$$\varepsilon_{mt}^{u} < \varepsilon_{ft}^{u}$$



Слика 5.5.　　Дијаграм напона у композиту у функцији деформације

У овом случају односа затезних чврстоћа влакана и матрице, затезна чврстоћа ламине у правцу влакана $\boldsymbol{F_{1T}}$ може бити изражена:

$$F_{1t} = \sigma'_f \cdot V_f + F_{mt} \cdot V_m = F_{mt} \cdot \left(V_f \cdot \frac{E_f}{E_m} + V_m \right)$$

У претходном изразу величина $\boldsymbol{\sigma_f'}$ је вредност напона у влакну која одговара оптерећењу на затезање ламине када је достигнута вредност деформације матрице $\boldsymbol{\varepsilon_{ft}^u}$.