به نام خدا

مفهوم و طراحی
CONCEPTION AND DESIGN

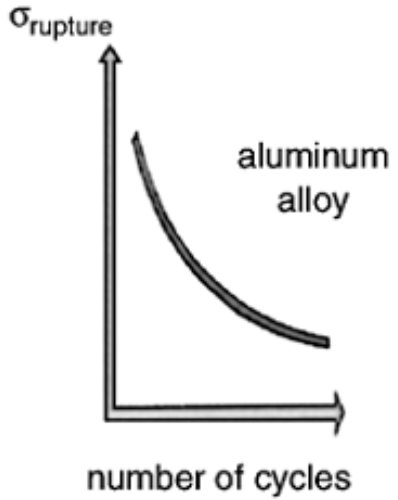
Dr. Hamzeh Shahrajabian-IAUN

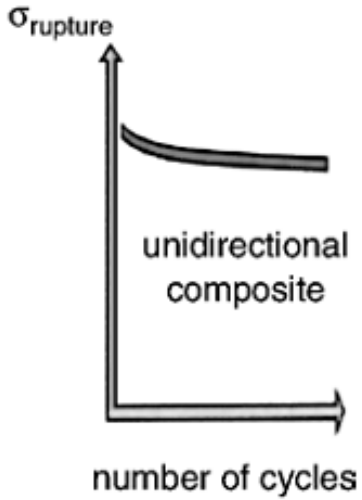
طراحی یک قطعه کامپوزیتی

- جهت گیری الیاف می تواند خواص مکانیکی را در جهت خاصی بهینه کند.
- رفتار ماده تا شکست الاستیک است.
- مقاومت در برابر خستگی آن عالی است.

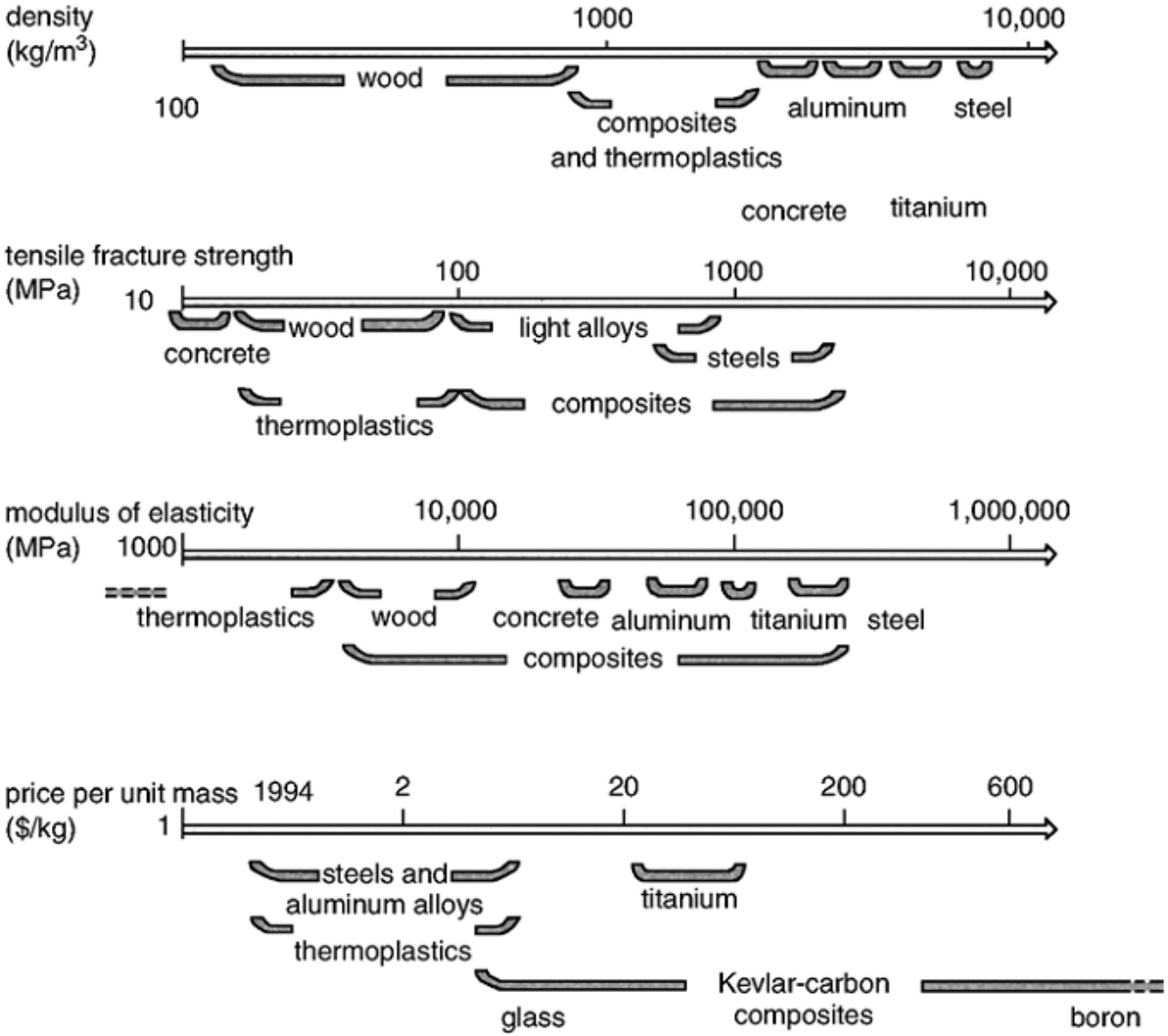
مقاومت در برابر خستگی عالی کامپوزیتها

- مقاومت خستگی مخصوص به صورت نسبت تنش به چگالی (σ/ρ) تعریف می شود.
- در کامپوزیتها این مقدار ۳ برابر آلیاژهای آلومنیوم و ۲ برابر فولادها و آلیاژهای تیتانیم استحکام بالا است. زیرا مقاومت خستگی کامپوزیتها ۹۰٪ استحکام شکست استاتیکی است در حالیکه این مقدار برای آلیاژهای آلومنیوم ۳۰٪ و فولادها و آلیاژهای تیتانیم استحکام بالا ۵۰٪ است.

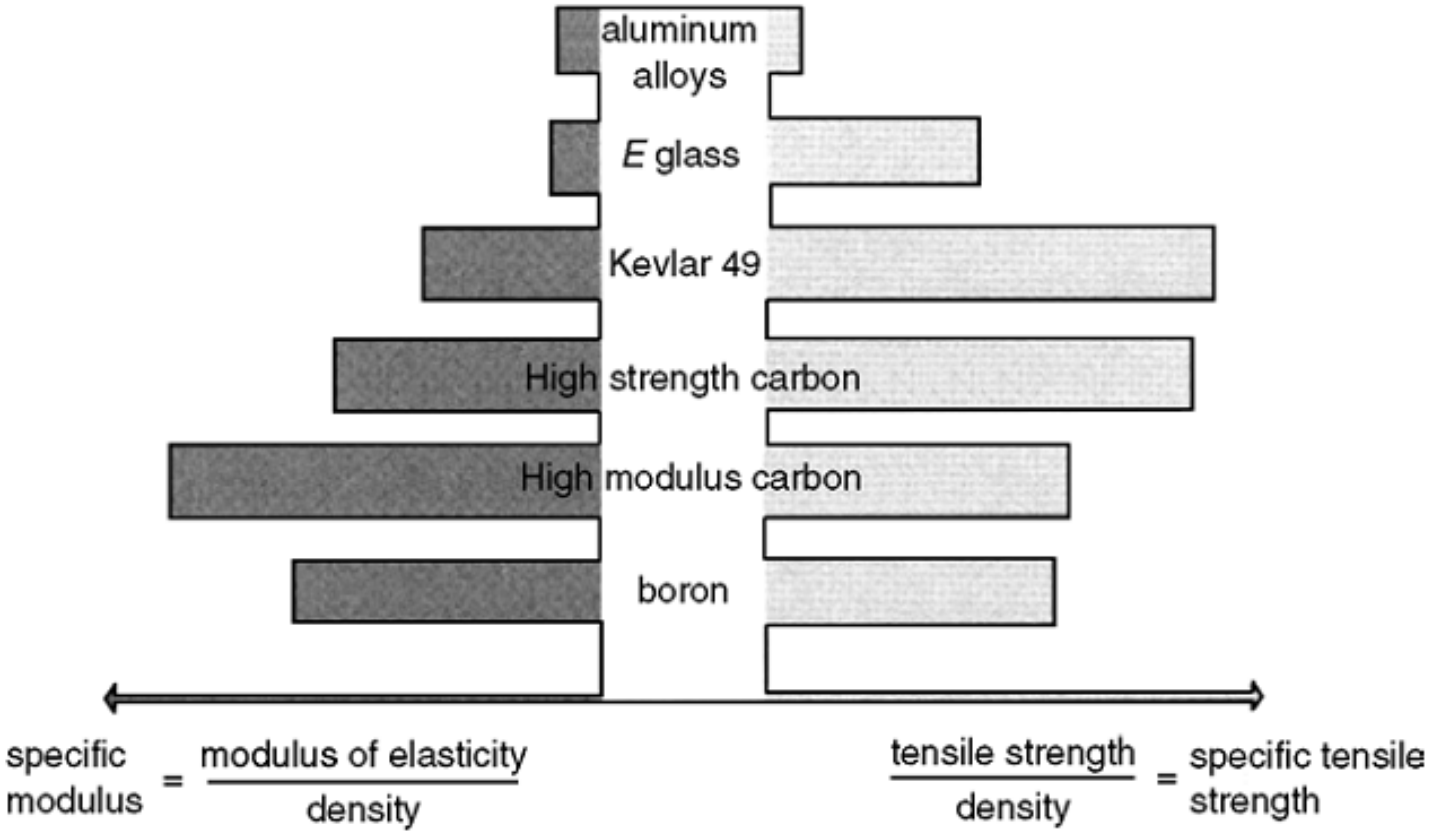




دستورالعمل هایی برای پیش طراحی



مشخصه های خاص انواع الیافها



ضرایب ایمنی به دلایل زیر درنظر گرفته می شود:

- تغییرات ناخواسته بزرگی مشخصه های مکانیکی الیاف و ماتریس
- تمرکز تنشها
- نقص فرضیات انجام شده در محاسبات
- فرآیند تولید
- فرسوده شدن مواد

میزان ضریب ایمنی بصورت زیر تعیین می شود :

High volume composites:		
Static loading	short duration:	2
	long duration:	4
Intermittent loading over long term:		4
Cyclic loading:		5
Impact loading:		10
High performance composites:		1.3 to 1.8

پوسته یا لمینت (LAMINATE)

- لمینت از رویهمگذاری چند لایه تک جهته تولید می شود.

لایه های تک جهته و پارچه ها

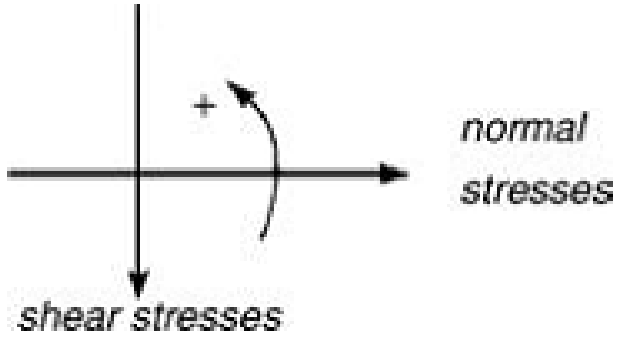
- مزیتهای لایه تک جهته:
  - دارای حداکثر صلبیت هستند (حداکثر تعداد الیاف در یک جهت).
  - دارای دورریز کمتری هستند.
  - تک لایه در مسافت طولانی تری استفاده شود. پس انتقال بار الیاف ها در طول مسافت طولانی پیوسته است.
- معایب لایه تک جهته:
  - زمان لایه گذاری زیاد است.
  - تولید شکلهای پیچیده سخت است.
- مثلاً لایه تک جهته اپوکسی/کربن با عرض ۳۰۰ یا ۱۰۰۰ میلیمتر وقتی در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد نگهداری شود تا چند سال قابل مصرف است.

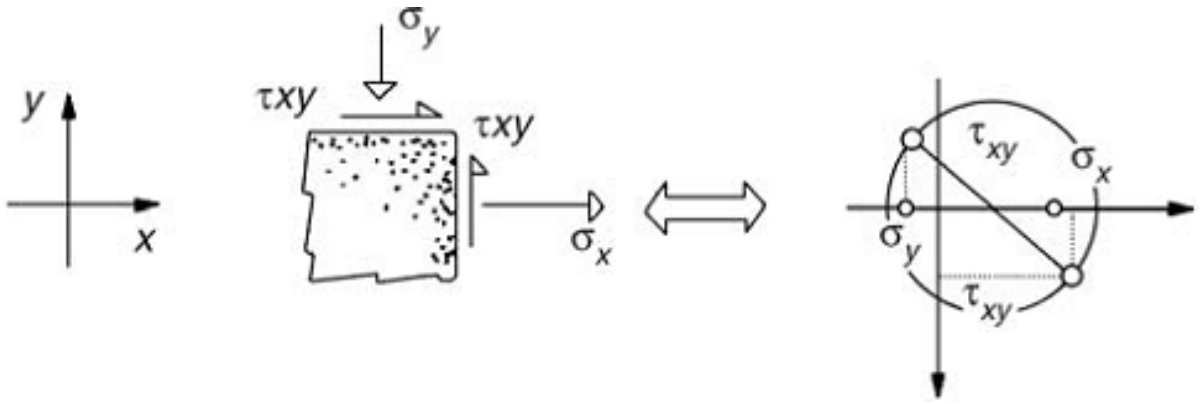
ادامه

- مزایای پارچه:
  - زمان لایه گذاری کمتر است.
  - امکان تولید شکلهای پیچیده با تغیر فرم دادن به پارچه وجود دارد.
  - امکان ترکیب الیافهای مختلف در یک پارچه وجود دارد.
- معایب پارچه:
  - مدول و استحکام کمتر است.
  - بعد از برش دور ریز زیاد است.
  - هنگام لایه گذاری قطعات بزرگ به اتصالات نیاز است.

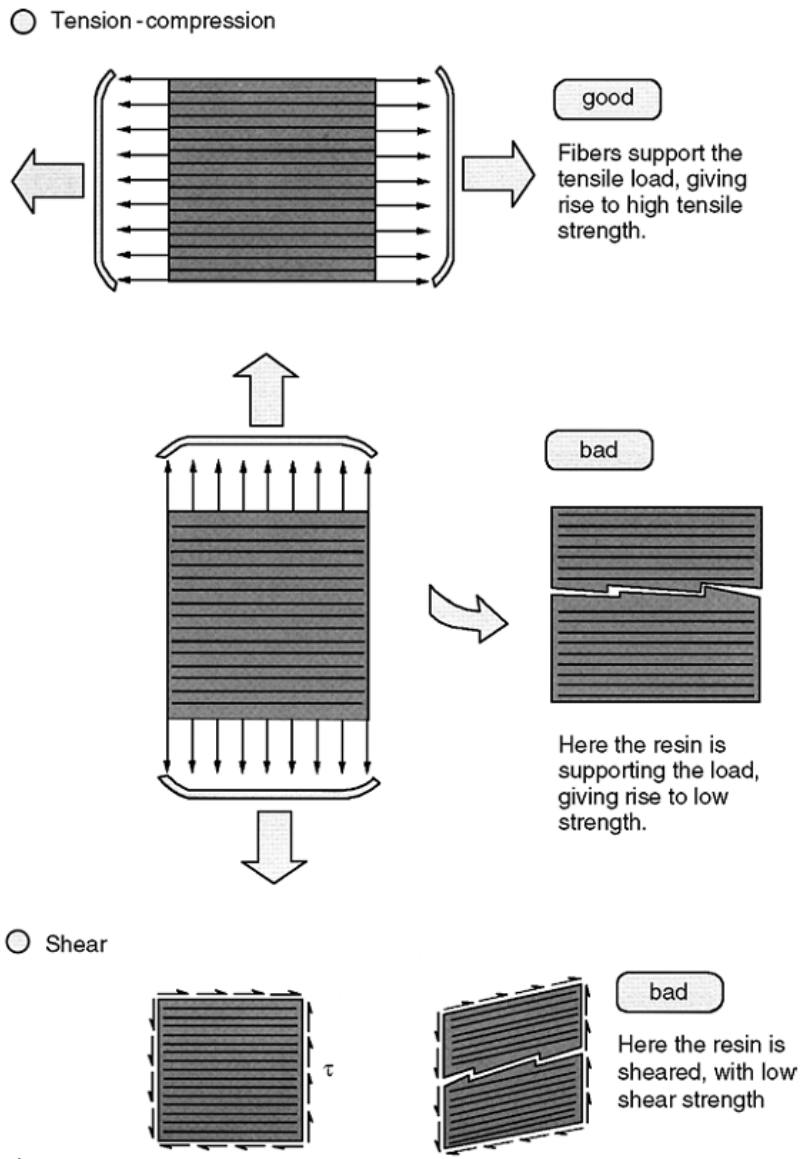
اهمیت جهت تک لایه

- دایره موهر را بیاد آورید:

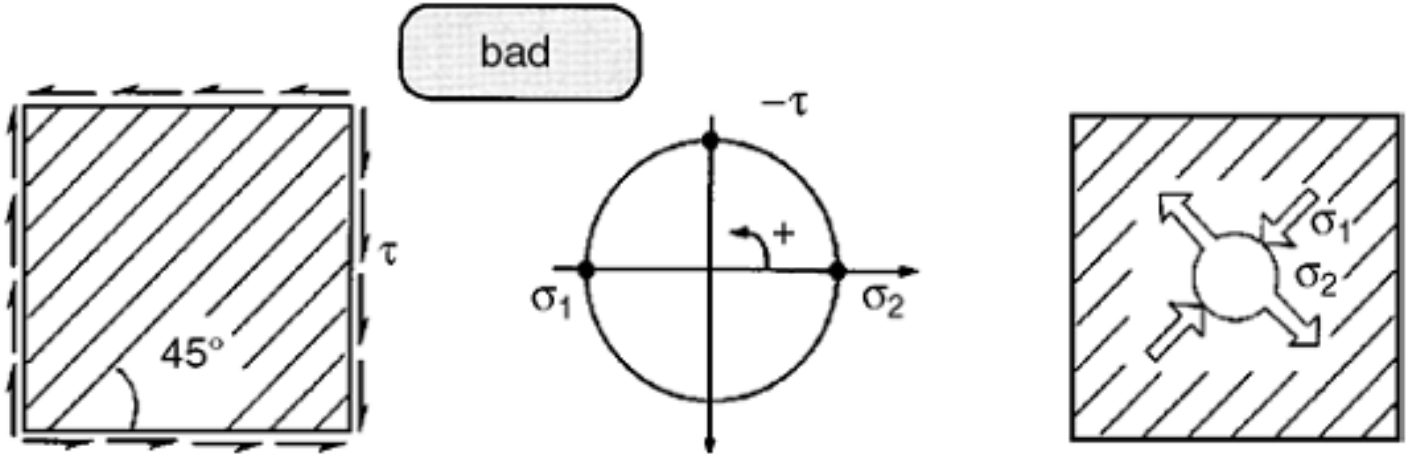




اثر جهت تک لایه

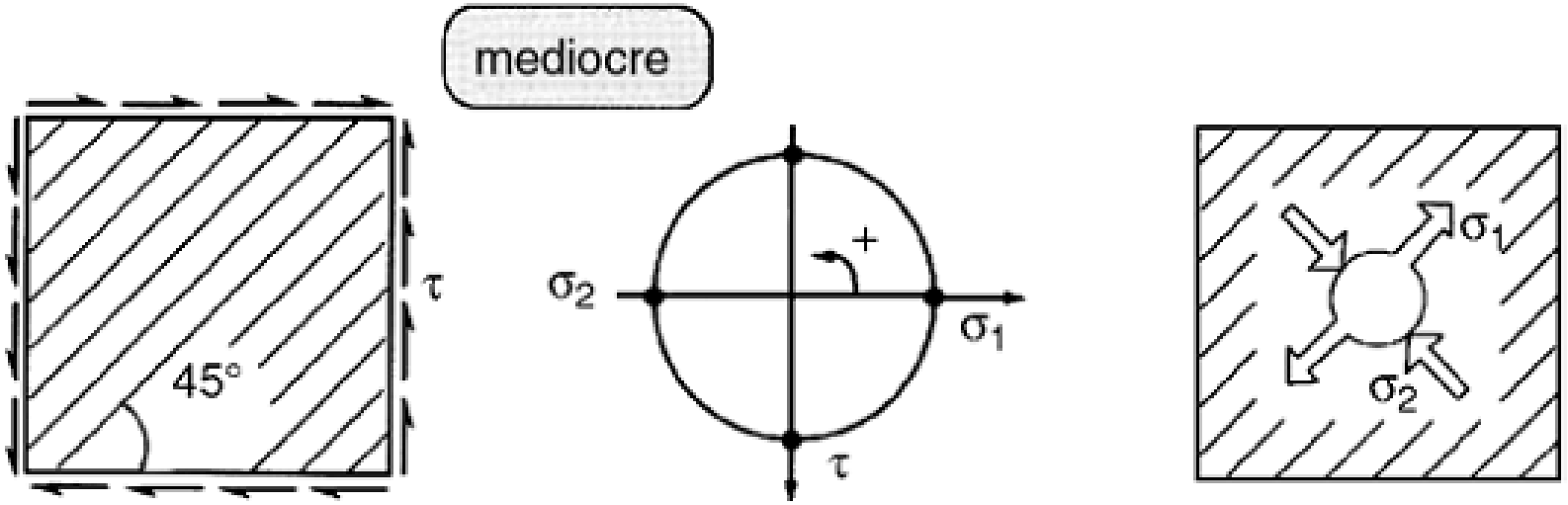


طراحی بد

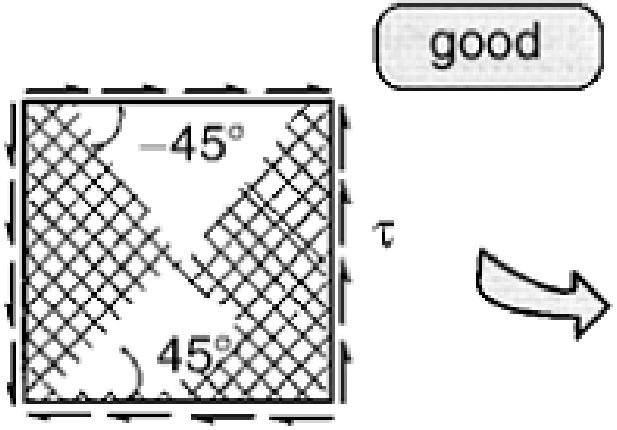


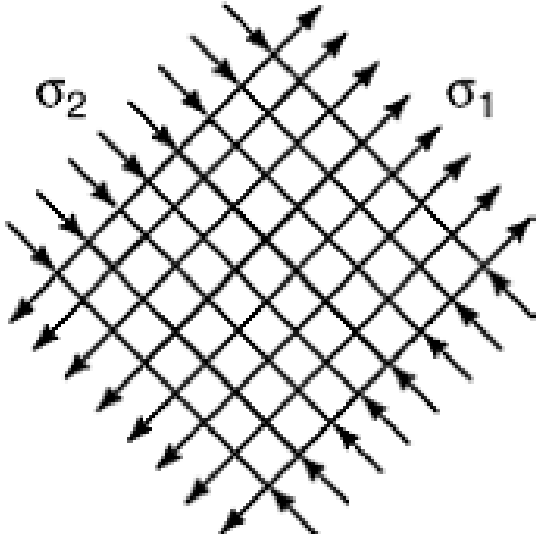
$$\sigma_1 = -\tau \qquad \sigma_2 = \tau$$

طراحی متوسط



طراحی خوب



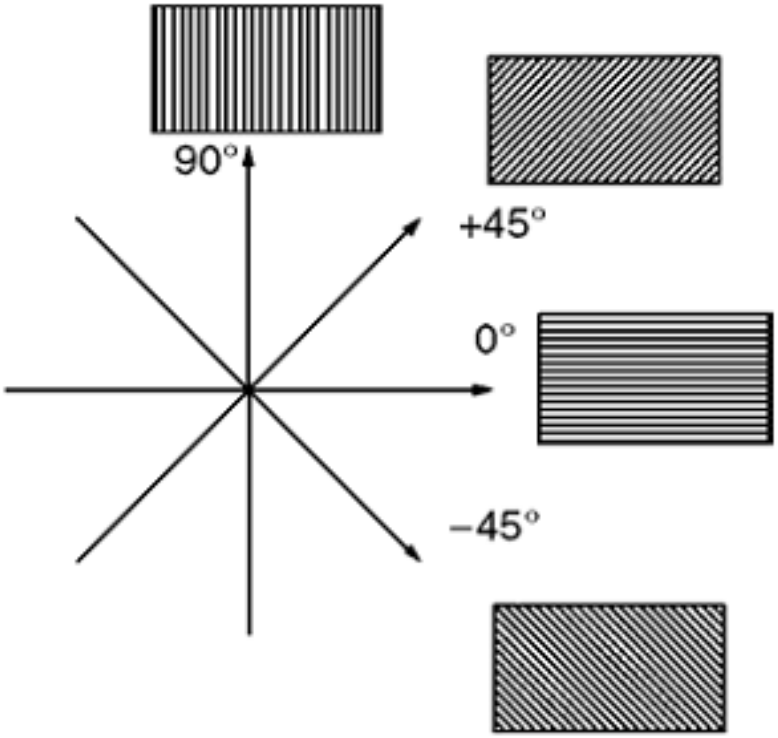


کد برای برای نشان دادن لمینیت

- جهت نرمال
- صفحه میانی
- توصیف تک لایه ها
- تقارن نسبت به صفحه میانی
- موارد خاص پارچه های متعادل
- فن آوری حداقل

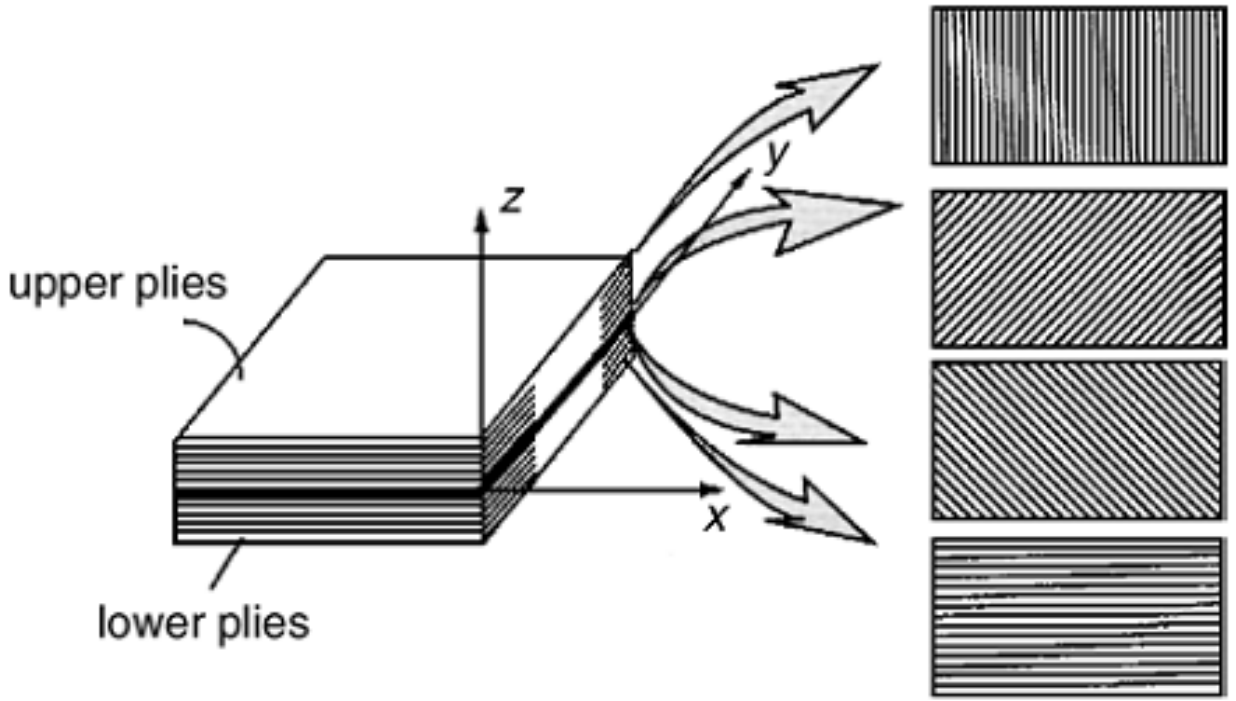
جهت نرمال

- پرکاربردترین لایه ها در شکل زیر نمایش داده شده است. تک لایه های ۳۰ و ۶۰ درجه نیز البته در بازار موجود است.



صفحه میانی

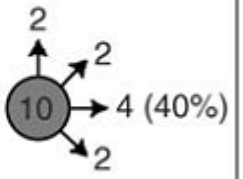
- صفحه میانی دو نیمه لمینیت را از هم جدا می کند.



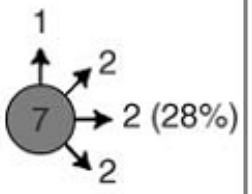
توصیف تک لایه ها

- توصیف تک لایه ها با شروع پایین ترین لایه در اندازه $Z<0$ شروع شده و تا بالاترین لایه تک لایه در اندازه $Z>0$ ادامه می یابد.
- هر تک لایه با جهتش تعیین می شود.
- لایه های پشت سر هم با "/ "از هم جدا می شوند.
- از گروه بندی کردن تعداد زیاد تک لایه با یک جهت اجتناب شود. هرچند وقتی این اتفاق می افتد، از ایندکس عددی برای نشان دادن تعداد لایه ها استفاده می شود.

تقارن صفحه میانی

PLY NUMBER	ORIENTATION	CONVENTIONAL NOTATION	SYMBOL
10	90°		
9	0°		
8	0°		
7	−45°		
6	+45°	$[90/0_2/-45/45]_s$	
5	+45°		
4	−45°		
3	0°		
2	0°		
1	90°		

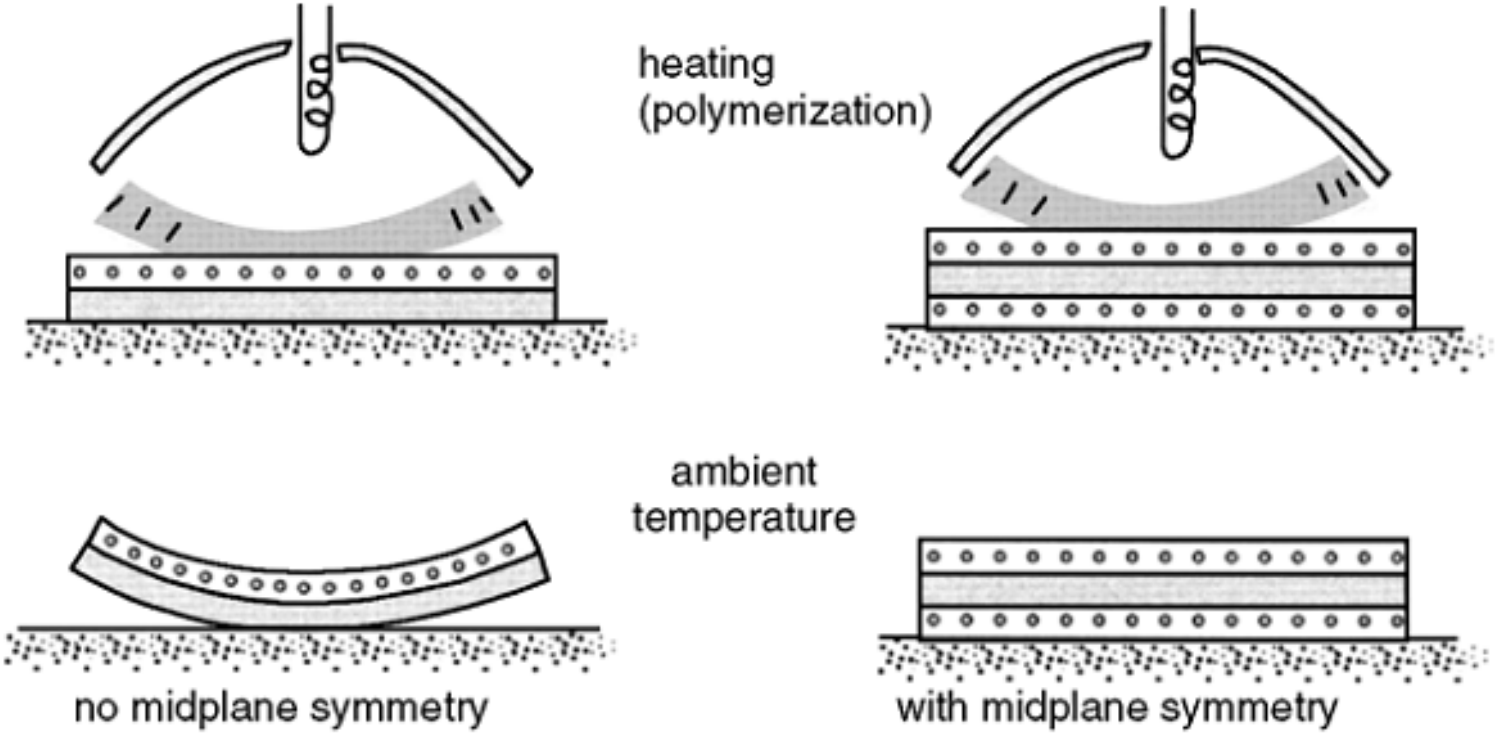
mid plane

PLY NUMBER	ORIENTATION	CONVENTIONAL NOTATION	SYMBOL
7	0°		
6	+45°		
5	−45°		
4	−90°	$[0/45/-45/\overline{90}]_s$	
3	−45°		
2	+45°		
1	0°		

mid plane

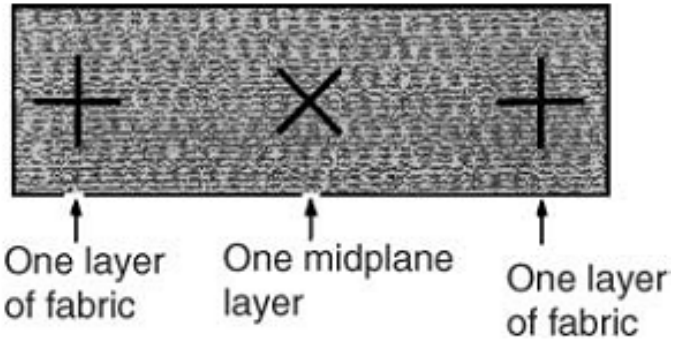
چرا به تقارن صفحه میانی نیاز است؟

- برای جلوگیری از پیچ و تاب خوردن لمینیت این کار انجام می شود.



موارد خاصی از لمینیتهای متعادل

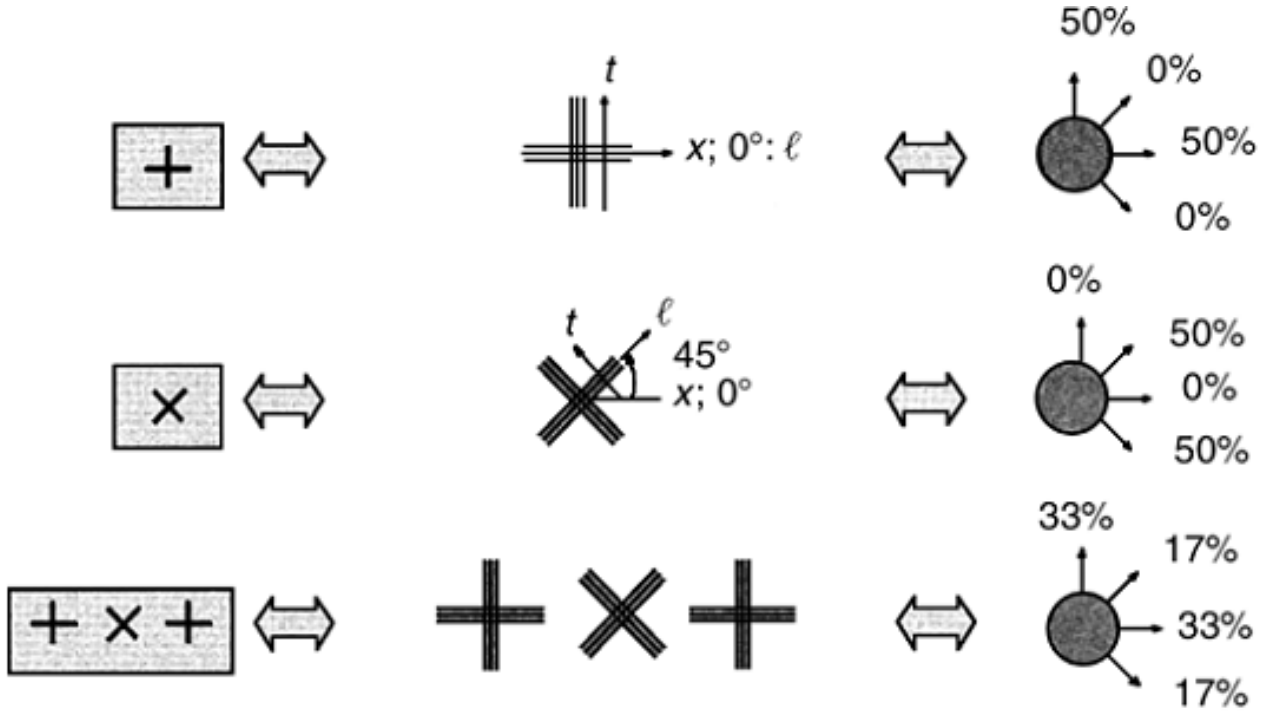
- برخی لمینت ها به طور جزئی یا کلی از پارچه های متعادل تهیه می شوند.



- لمینت بالا از سه لایه با پارچه های متعادل تشکیل شده است و نسبت به صفحه میانی تقارن دارد.

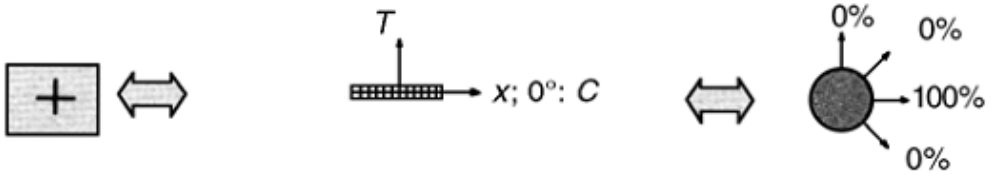
توصیف۱

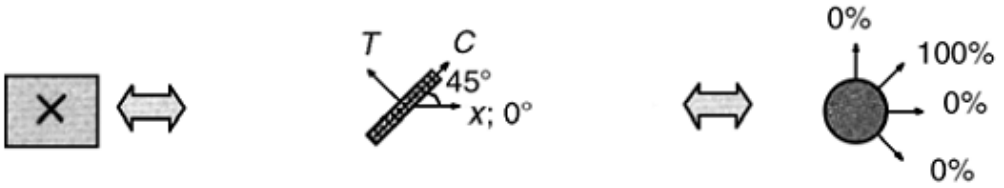
- هر لایه از پارچه می تواند با دو تک لایه تک جهته متقاطع جایگزین شود (خواص الاستیک آنها مشخص است)، بطوریکه ضخامت آنها نصف پارچه باشد. این توصیف برای تعیین خواص الاستیک تک لایه مرسوم است.

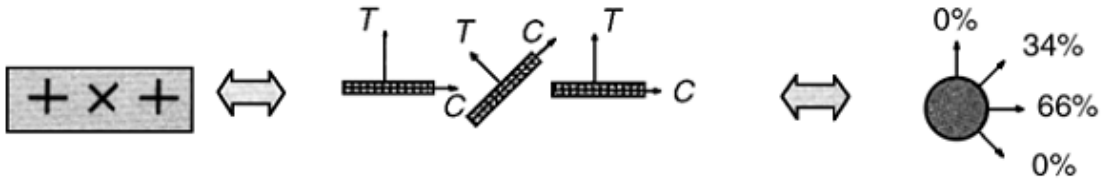


توصیف۲

- هر لایه از پارچه می تواند با یک تک لایه ناهمسانگرد که خواص الاستیک آن مشخص است، با ضخامت یکسان با پارچه توصیف باشد. این توصیف برای تعیین تنش شکست لمینیت مناسب است.





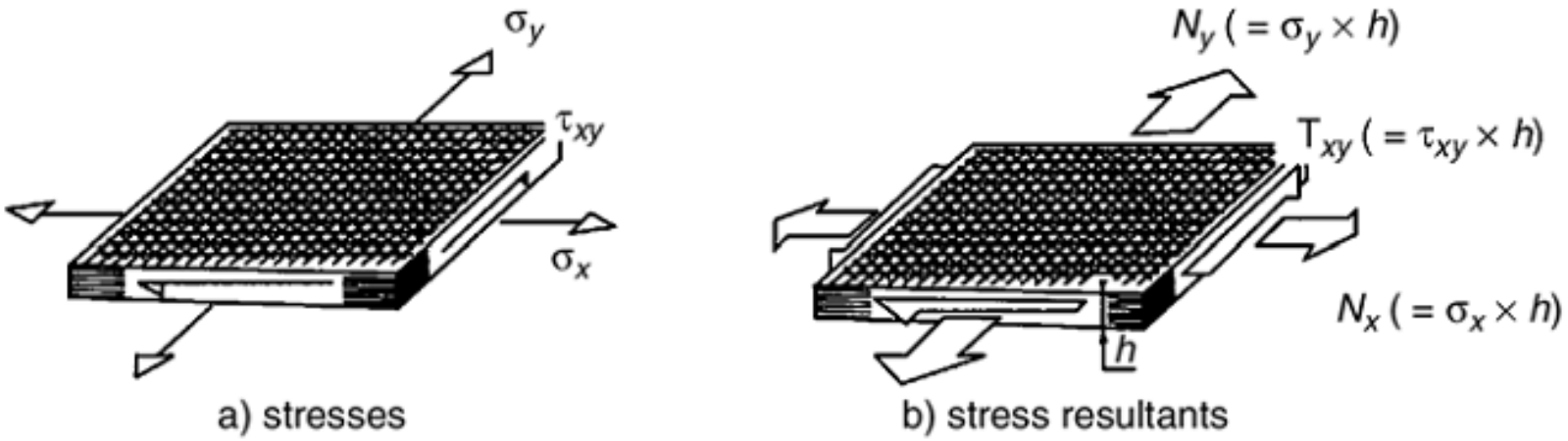


فن آوری حداقل

- عموماً برای هرجهت حداقل تعداد تک لایه استفاده می شود (۵ تا ۱۰٪)، مثلاً ۰، ۹۰، ۴۵،۴۵-.
- حداقل ضخامت لمینت باید از مرتبه ۱ میلیمتر باشد، برای مثال ۸ تک لایه تک جهته یا ۳ تا ۴ لایه پارچه از کربن/اپوکسی (به غیر از صنایع فضایی که ضخامت خیلی کم است یا کامپوزیتهای ساندویچی که صفحه میانی ندارند).

آرایش تک لایه ها

- نسبت و تعداد تک لایه ها برای قرار گیری در هر جهت بر اساس نوع و جهت بارگذاری روی لمینیت است. مثلاً در شکل زیر بارگذاری صفحه ای (membrane loading) داریم:



ادامه

- سه معیار باید توسط طراحان برای پیکربندی تک لایه مورد توجه قرار گیرد:
  ۱. تحمل بارگذاری بدون تخریب لمینیت
  ۲. محدود کردن تغییر شکل قطعه بارگذاری شده
  ۳. حداقل کردن وزن ماده استفاده شده
- این معیارها همیشه با همدیگر بکار نمیروند. مثلاً حداقل کردن ضخامت با افزایش صلبیت در تضاد است.

ادامه

- به محض تعریف لمینیت (تعداد لایه ها و جهات)، باید شرایط زیر را تاجایی که ممکن است درنظر گرفته شود (بدون فراموش کردن فن آوری حداقل):

۱. هنگامی که تنش غالب در راستای ۰ درجه است ، تک لایه های ۹۰ درجه روی سطح قرار گرفته، و بعد از آنها تک لایه های ۴۵ درجه و ۴۵- درجه.

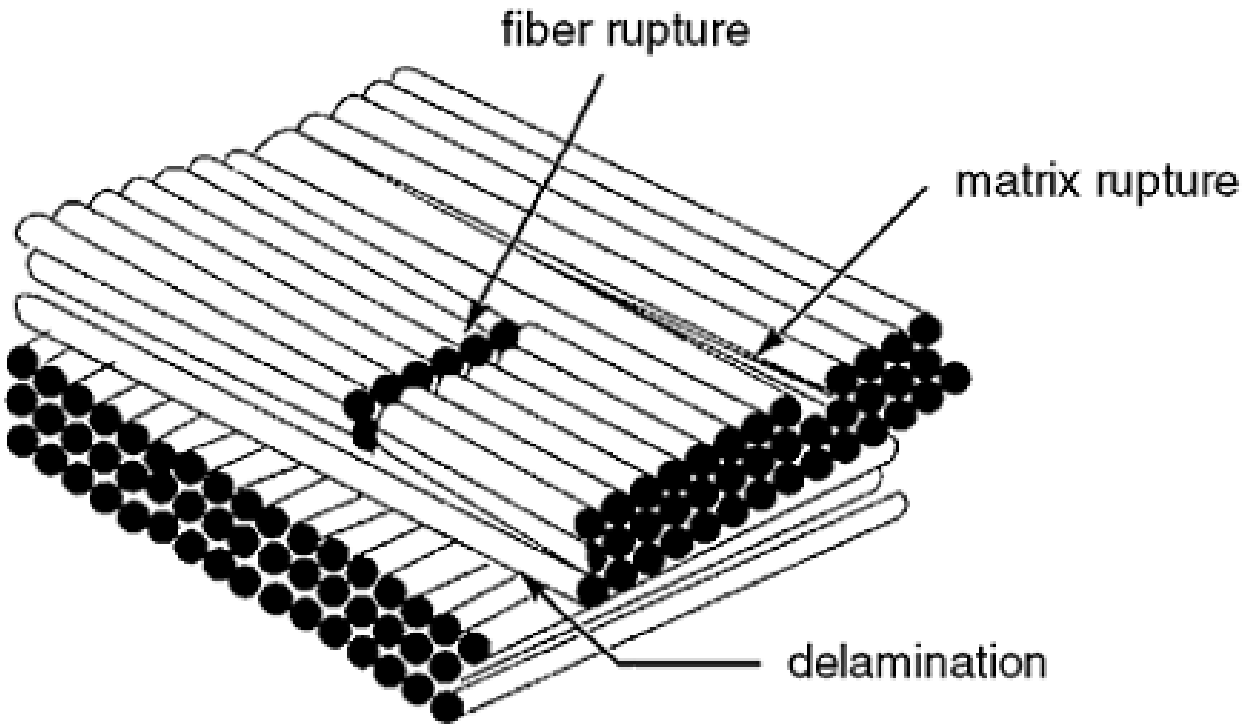
۲. بیشتر از ۴ تک لایه پشت سر هم در یک راستا قرار ندهید.

شکست لمینیت ها

- آسیب (damage)
- مهمترین معیارهای شکست

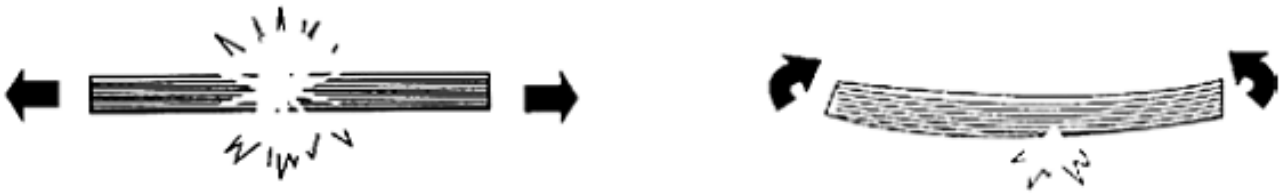
آسیب

- مودهای مختلف شکست در شکل زیر نشان داده شده است:



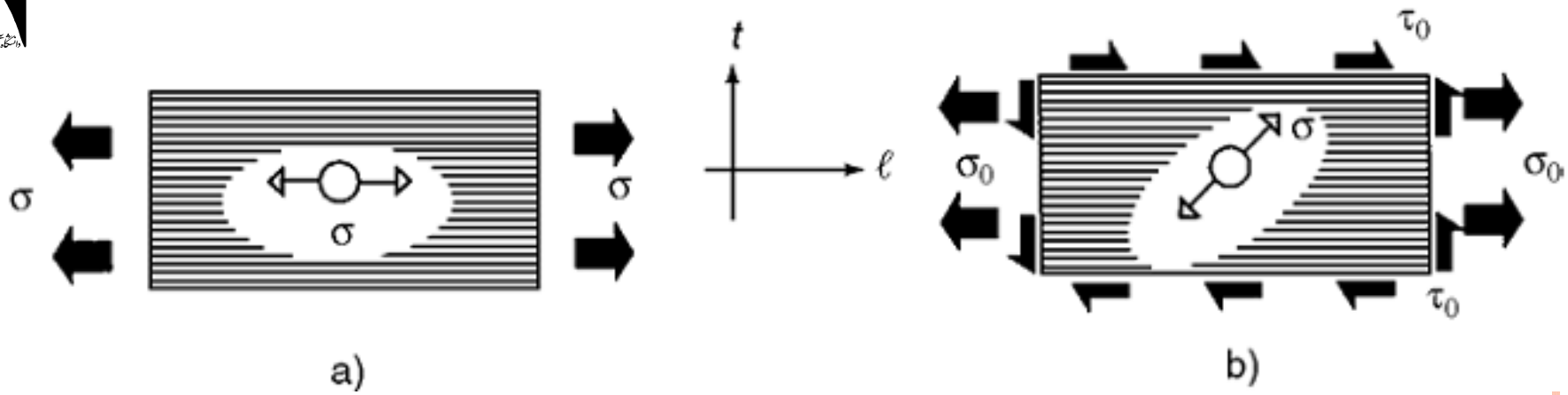
مودهای مختلف آسیب

- tension



- compression

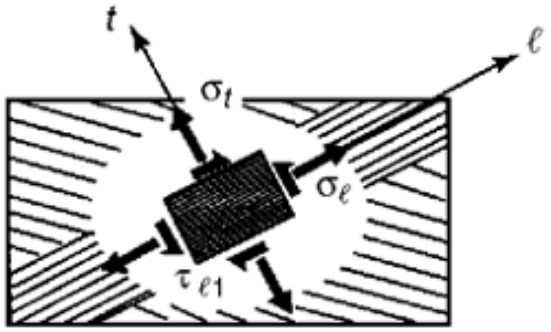
- shear; delamination



- در شکل a نمونه موقعی می شکند که تنش از استحکام شکست بیشتر شود.
- در شکل b در جهتی غیر از جهت الیاف رخ می دهد در نتیجه استحکام شکست کاهش می یابد.

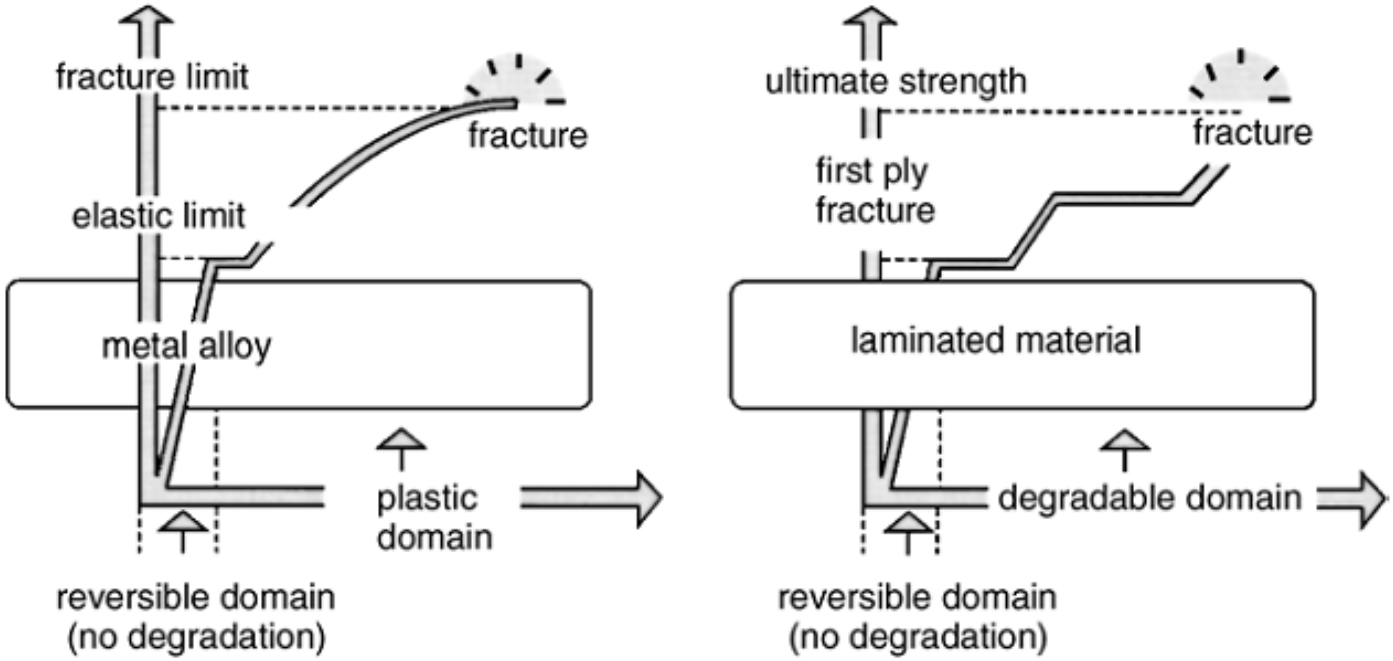
مهمترین معیارهای شکست

- یکی از مهمترین معیار های شکست معیار Tsai-Hillاست. در این معیار α عدد Tsai-Hill است.
- اگر α کوچکتر از ۱ باشد شکست اتفاق نمی افتد.
- اگر بزرگتر یا مساوی ۱ باشد شکست اتفاق می افتد که عموماً از جانب رزین است.



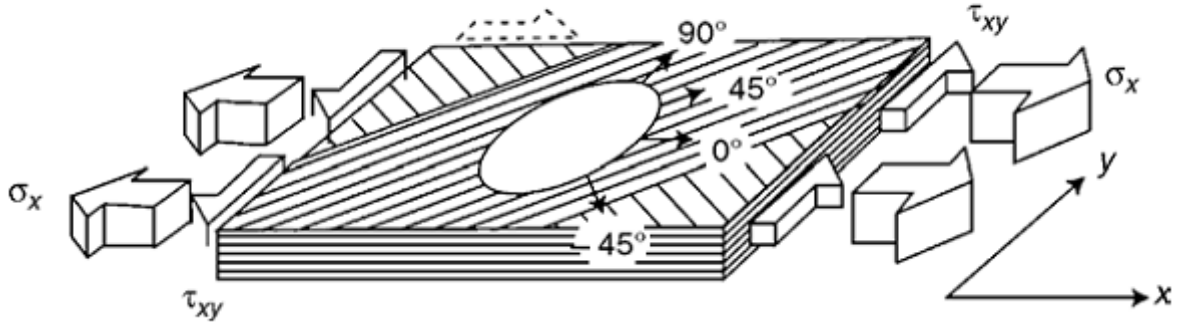
$$\alpha^2 = \left(\frac{\sigma_\ell}{\sigma_\ell}_{\text{rupture}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_t}_{\text{rupture}}\right)^2 - \frac{\sigma_\ell \sigma_t}{\sigma_{\ell}^2}_{\text{rupture}} + \left(\frac{\tau_{\ell t}}{\tau_{\ell t}}_{\text{rupture}}\right)^2$$

مقایسه رفتار فلزات و لمینیت در فشار



روش تعیین σ_ℓ, σ_t, $\tau_{\ell t}$ در هر تک لایه

- در شکل زیر خواص مکانیکی تک لایه ها، نسبت های (درصدهای) تک لایه ها در هر جهت (۰، ۹۰، ۴۵ و ۴۵-) و مقادیر تنشهای نرمال و برشی مشخص است. محاسبه تنشهای σ_ℓ, σ_t, $\tau_{\ell t}$ برای هر لایه کار زمان بری است که با کامپیوتر به راحتی بدست می آید. سپس با قرار دادن تنشها در رابطه Tsai-Hill شکست پیش بینی می شود.

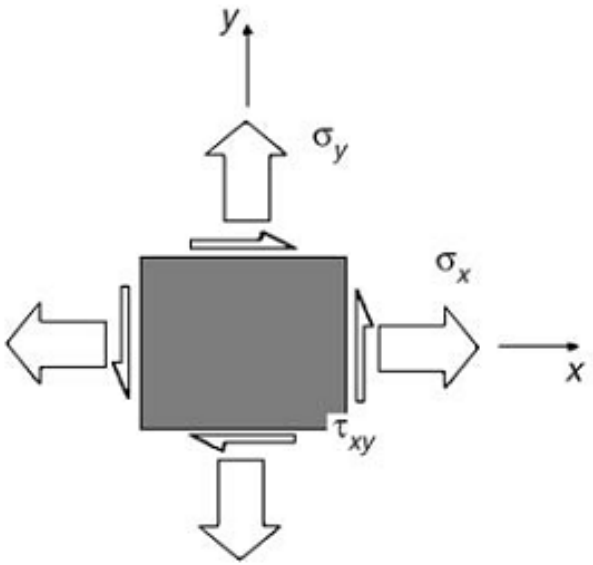


اندازه کردن لمینیت

- مدول الاستیک و تغییرشکل لمینیت
- مثالی از بارگذاری ساده
- مثالی از بارگذاری پیچیده، ترکیب بهینه لمینیت
- ملاحظات عملی رفتار لمینیت

مدول الاستیک و تغییرشکل لمینیت

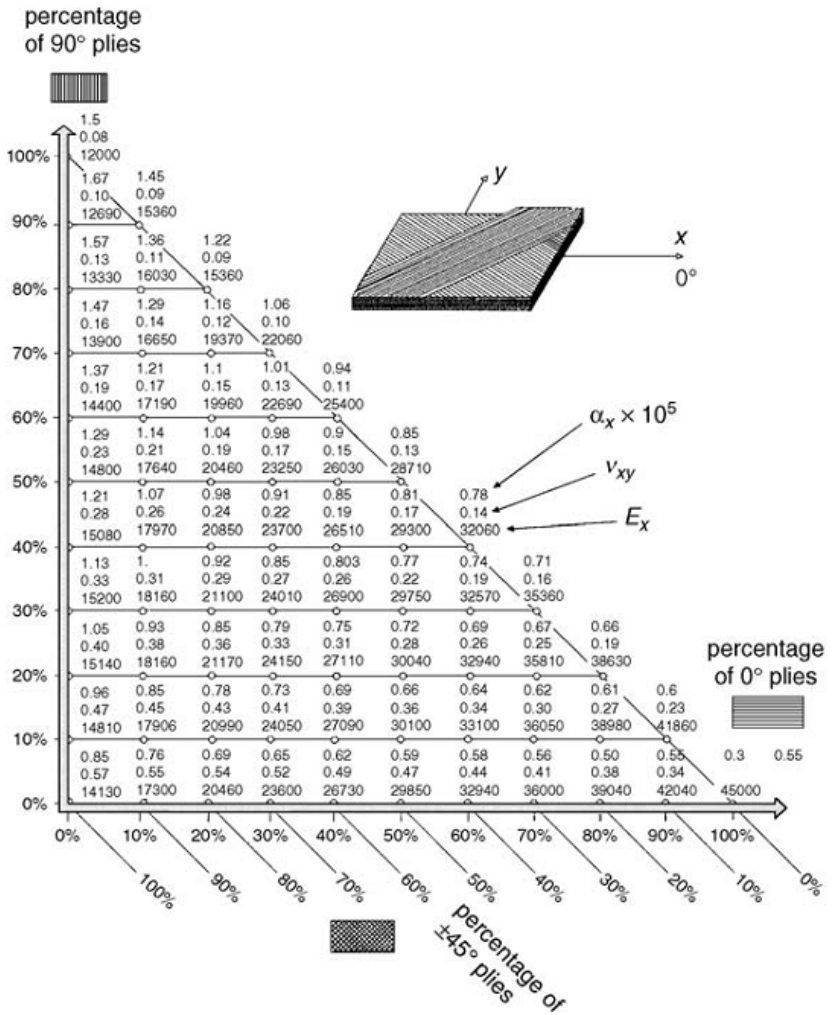
- مدول را می توان از جداول بدست آورد.
- از رابطه تنش-کرنش مانند شکل زیر (البته رابطه زیر برای تک لایه است نه لمینیت) می توان برای تعیین میزان تغییر شکل لمینیت استفاده کرد.

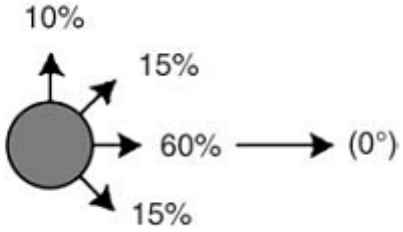


$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

مثال) مدول الاستیک و ضریب انبساط حرارتی لمینیت اپوکسی/شیشه با ۶۰ درصد حجمی شیشه چقدر است؟

Table 5.14 Glass/Epoxy Laminate: V_f = 60%, Ply Thickness = 0.13 mm





- از جدول روبرو داریم:

$$E_x = 33{,}100 \text{ MPa}$$
$$E_y = 17{,}190 \text{ MPa}$$

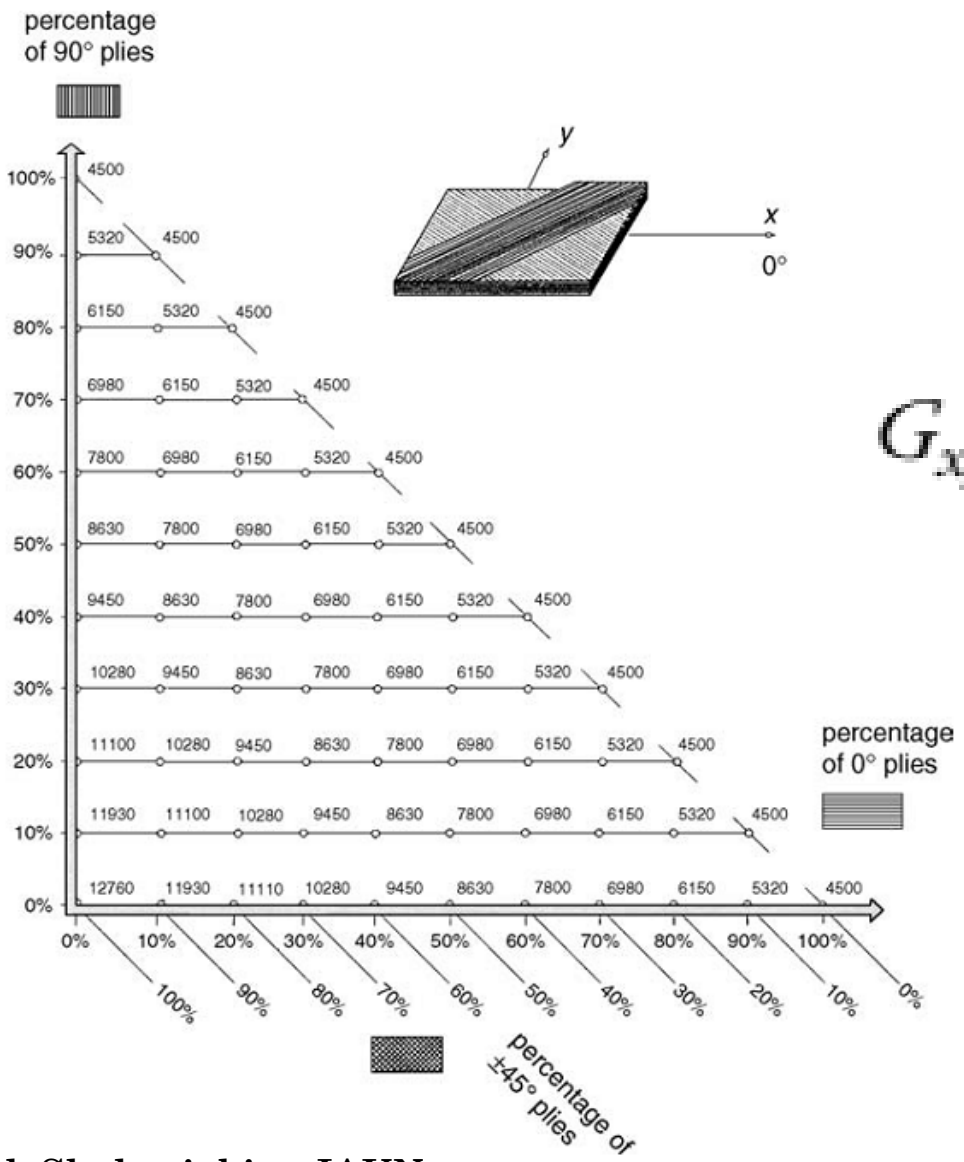
$$\nu_{xy} = 0.34$$
$$\nu_{yx} = 0.17$$

- با جابجایی درصد ۰ و ۹۰ مقدار مدول در جهت y بدست می آید.

ادامه

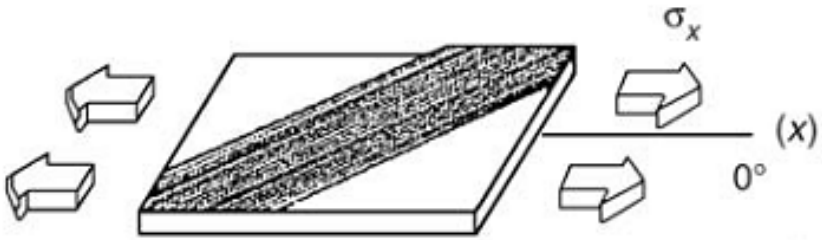
- مدول برشی از جدول روبرو بدست می آید:

Table 5.15 Glass/Epoxy Laminates. V_f = 60%. Ply Thickness = 0.13 mm

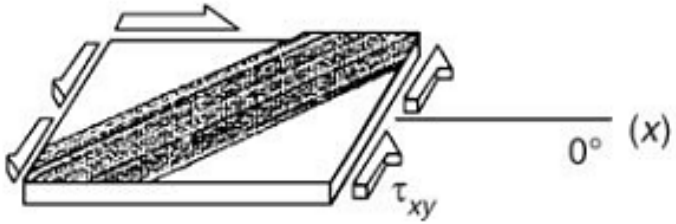


$$G_{xy} = 6{,}980 \text{ MPa.}$$

مثالی از بارگذاری ساده لمینیت کولار/اپوکسی

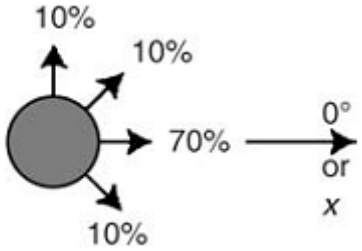


At what value of σ_x, denoted as $\sigma_{x\,max}$, will this laminate fail?



At what value of τ_{xy}, denoted as $\tau_{xy\,max}$, will this laminate fail?

Calculation of the maximum stresses $\sigma_{x\,max}$, $\sigma_{y\,max}$, $\tau_{xy\,max}$ is done based on the Hill–Tsai failure criterion.[11]

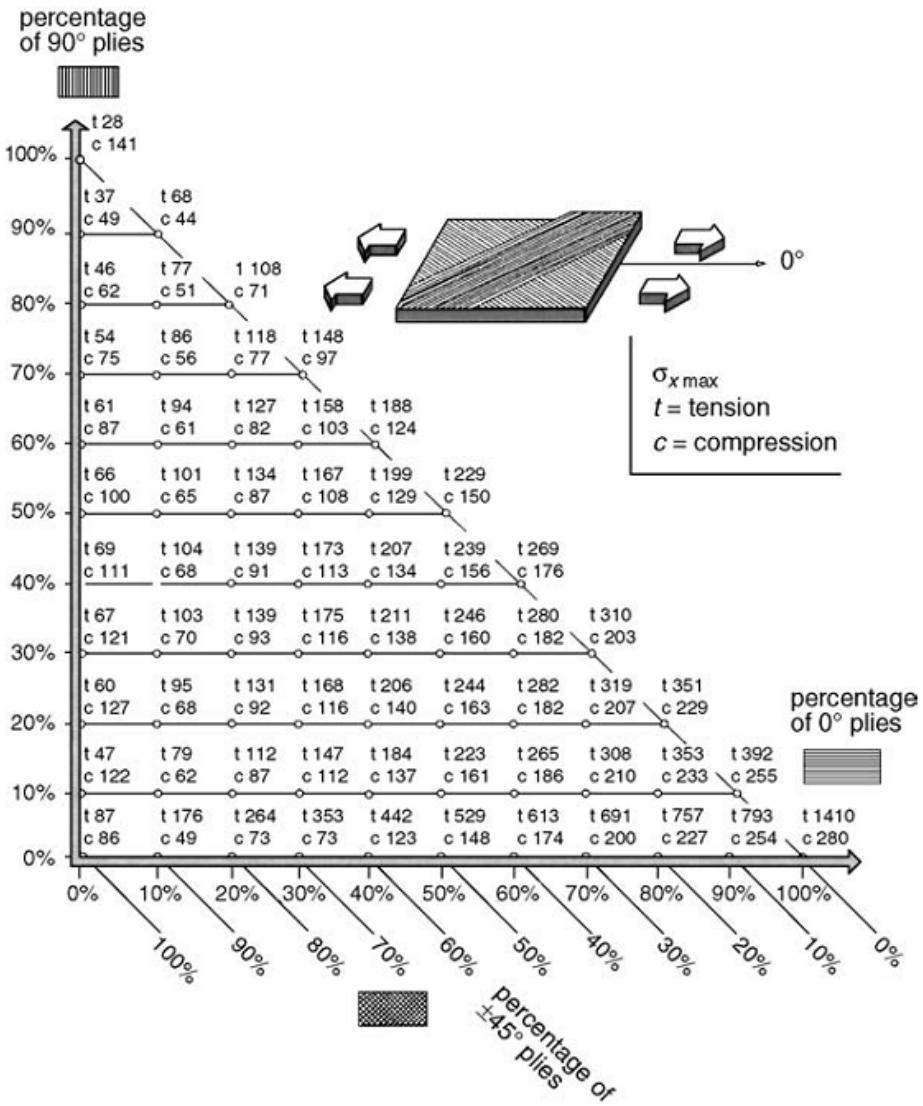


ادامه

- بر اساس جدول روبرو داریم:

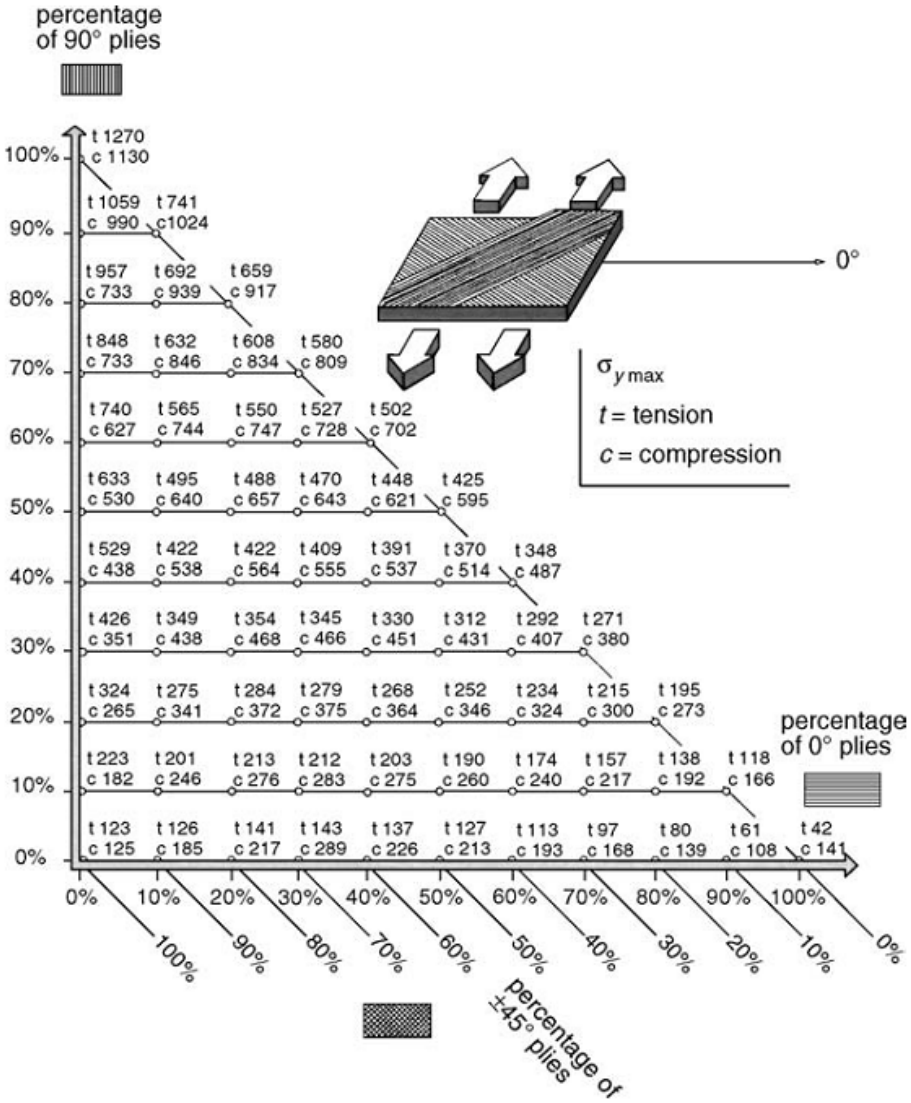
$$\sigma_{x\ \max(\text{tension})} = 308\ \text{MPa}$$

Table 5.6 Kevlar/Epoxy Laminate: V_f = 60%, Ply Thickness = 0.13 mm



Maximum stress $\sigma_{x\max}$ (MPa) as a function of the ply percentages in the directions 0°, 90°, +45°,–45°.
(More information on modulus and strength of a basic ply: see Section 3.3.3)

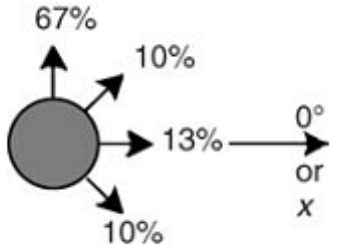
Table 5.2 Carbon/Epoxy Laminate: V_f = 60%, Ply Thickness = 0.13 mm



Maximum stress σ_{ymax} (MPa) as a function of the ply percentages in the directions 0°, 90°, +45°, −45°.
(More information on modulus and strength of a basic ply: see Section 3.3.3)

مثال)

- Which maximum compression stress along the 90 direction (or y) can be applied to a carbon/epoxy laminate containing 60% fiber volume fraction with the orientation distribution as shown in the above figure?



ادامه

$$\sigma_{y\max} = \sigma_{13/67/10/10} = \sigma_{10/60/15/15} + \Delta\sigma = 744 + \Delta\sigma$$

$$\Delta\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial p^{0^\circ}} \times \Delta p^{0^\circ} + \frac{\partial\sigma}{\partial p^{90^\circ}} \times \Delta p^{90^\circ}$$

p^{0° and p^{90° as the proportions of the plies along the 0° and 90° directions

$$\Delta\sigma = (747 - 744) \times \frac{3}{10} + (846 - 744) \times \frac{7}{10} = 72 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y\max} = 744 + 72 = 816 \text{ MPa}$$

تبصره

- صفحاتی که تنش های حداکثر را نمایش می دهند برای پارچه های متعادل مناسب نیستند.
- به خصوص، مقادیر استحکام فشاری یک لایه از پارچه متعادل کوچکتر است از آنچه که با رویهمگذاری تک لایه های متقاطع (۰ و ۹۰) معادل در این دو جهت بدست می آید.

بارگذاری پیچیده (بارگذاری دو محوره)

- در این حالت از جداول گفته شده نمی توان استفاده کرد. روش کار بصورت زیر است:
  - تنشها را با تنشهای منتج N_x, N_y, T_{xy} جایگزین کنید. این تنشهای منتج داده های اولیه را که توسط برخی مطالعات قبلی داده شده را تشکیل می دهد.
  - سپس می توان فرض کرد که هر یک از ۳ تنش منتج به یک جهت مناسب تک لایه اختصاص می یابد.
  - با این فرضیه می توان فرض کرد N_x توسط تک لایه 0 درجه تحمل می شود و ضخامت آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$e_x = \frac{N_x}{\sigma_{\ell\ \text{rupture}}}$$

  - به همین ترتیب برای لایه ۹۰ درجه داریم:

$$e_y = \frac{N_y}{\sigma_{\ell\ \text{rupture}}}$$

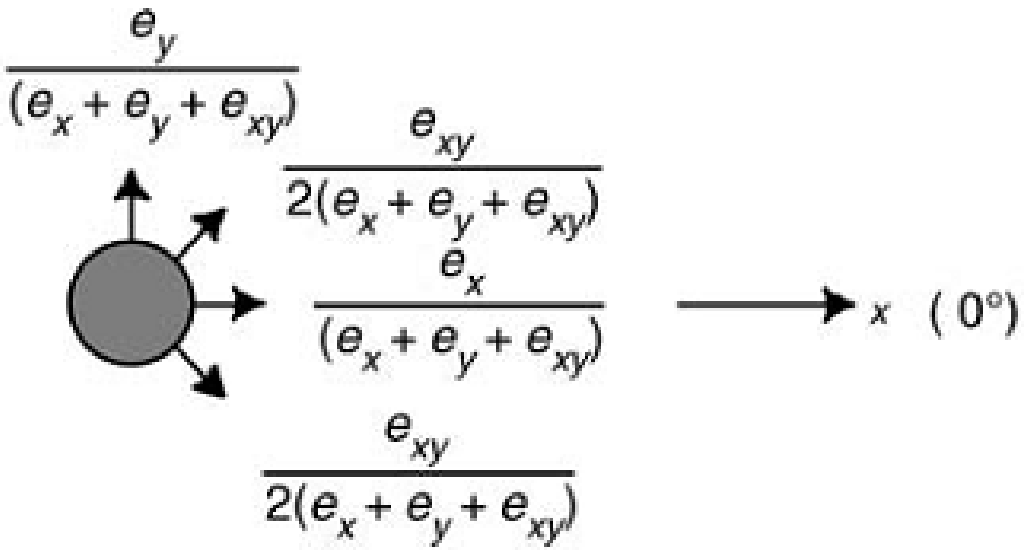
  - تنش برشی توسط لایه های ±۴۵ درجه تحمل می شود:

$$e_{xy} = \frac{T_{xy}}{\tau_{\text{rupture}}}$$

τ_{rupture} is the maximum stress that a $\pm 45°$ laminate can support.

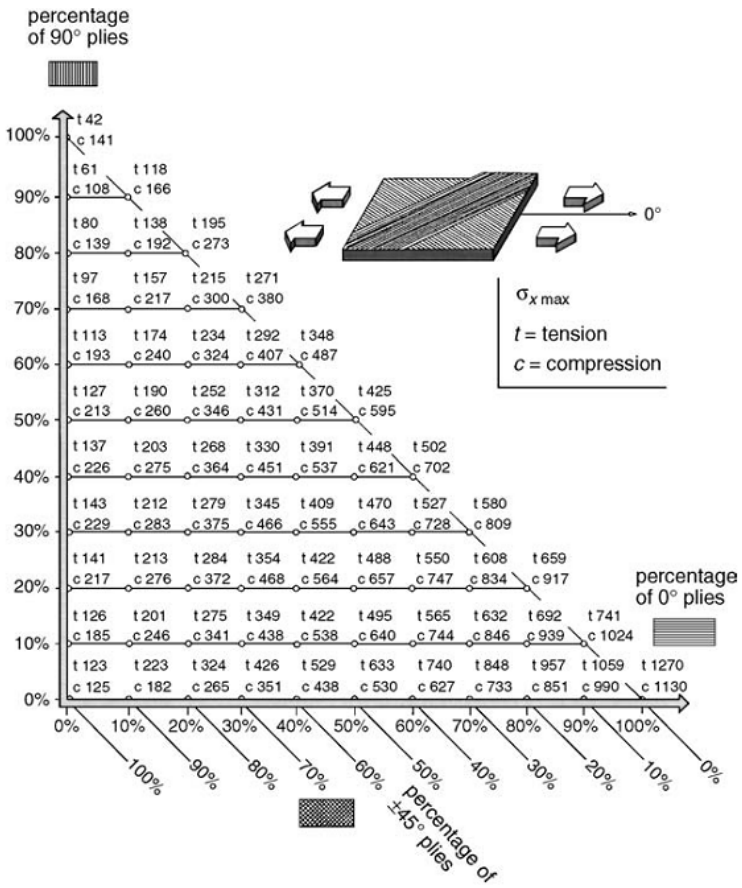
ادامه:

- در نهایت داریم:



Example: Determine the composition of a laminate made up of unidirectional plies of carbon/epoxy (Vf = 60%) to support the stress resultants Nx = -800 N/mm, Ny = -900 N/mm, Txy = -300 N/mm.

Table 5.1 Carbon/Epoxy Laminate: V_f = 60%, Ply Thickness = 0.13 mm



Maximum stress $\sigma_{x\,max}$ (MPa) as a function of the ply percentages in the directions 0°, 90°, +45°, –45°.
(More information on modulus and strength of a basic ply: see Section 3.3.3)

- از جدول روبرو برای ۱۰۰٪ تک لایه صفر درجه داریم:

$$\sigma_{\ell\ \text{rupture}} \text{ is } 1{,}130$$

$$e_x = \frac{800}{1130} = 0.71 \text{ mm};$$

$$e_y = \frac{900}{1130} = 0.8 \text{ mm}$$

ادامه

- از جدول روبرو برای ۱۰۰ درصد تک لایه ±۴۵ داریم:

$$\tau_{\text{rupture}} = 397 \text{ MPa}$$

$$e_{xy} = \frac{340}{397} = 0.86 \text{ mm}$$

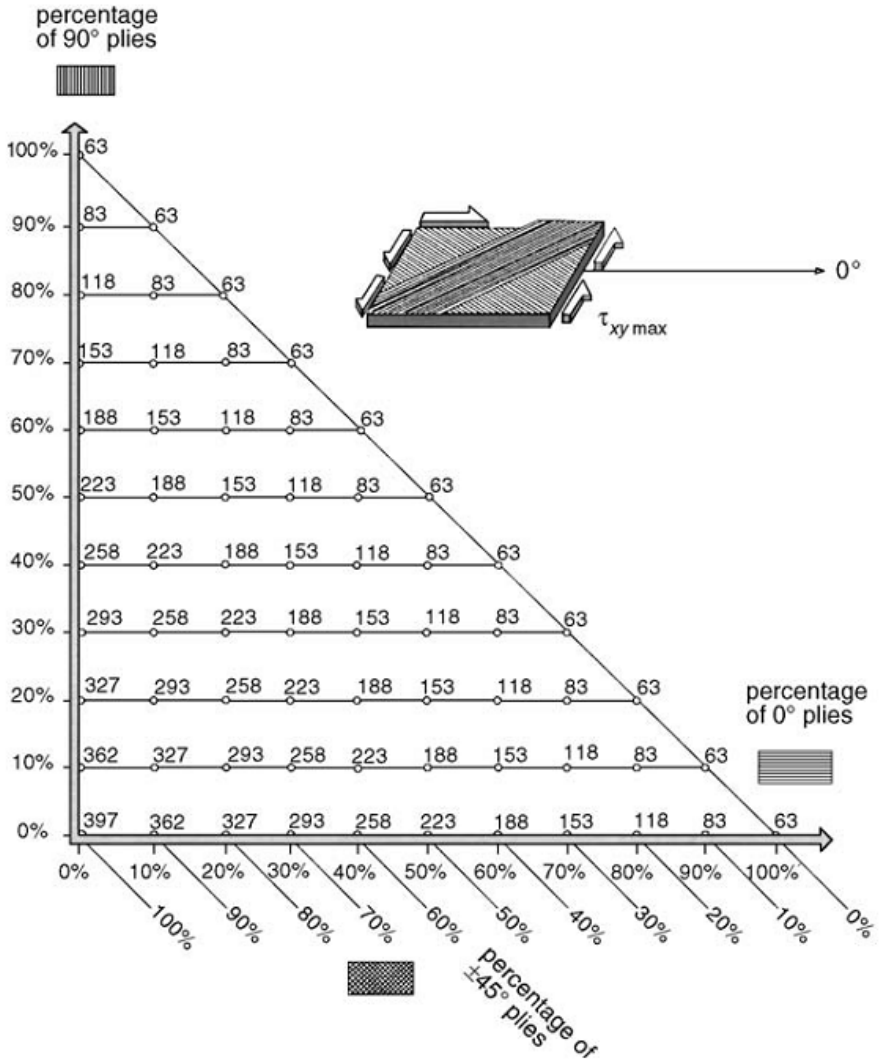
- پس برای درصد لایه ها داریم:

$$0°: \quad \frac{e_x}{e_x + e_y + e_{xy}} = 0.3$$

$$90°: \quad \frac{e_y}{e_x + e_y + e_{xy}} = 0.34$$

$$\pm 45°: \quad \frac{e_{xy}}{e_x + e_y + e_{xy}} = 0.36$$

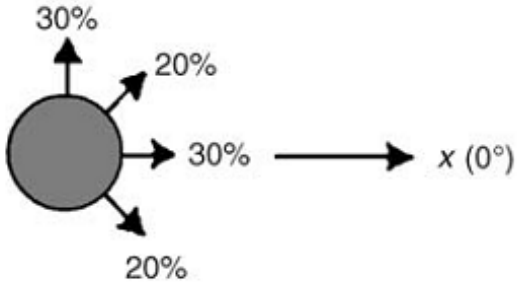
Table 5.3 Carbon/Epoxy Laminate: V_f = 60%, Ply Thickness = 0.13 mm



Maximum stress τ_{xymax} (MPa) as a function of the ply percentages in the directions 0°, 90°, +45°, −45°.
(More information on modulus and strength of a basic ply: see Section 3.3.3)

ادامه

- در نهایت لمینیت بصورت روبرو در می آید که بر اساس جداول قبلی می توان مدولها را بدست آورد :



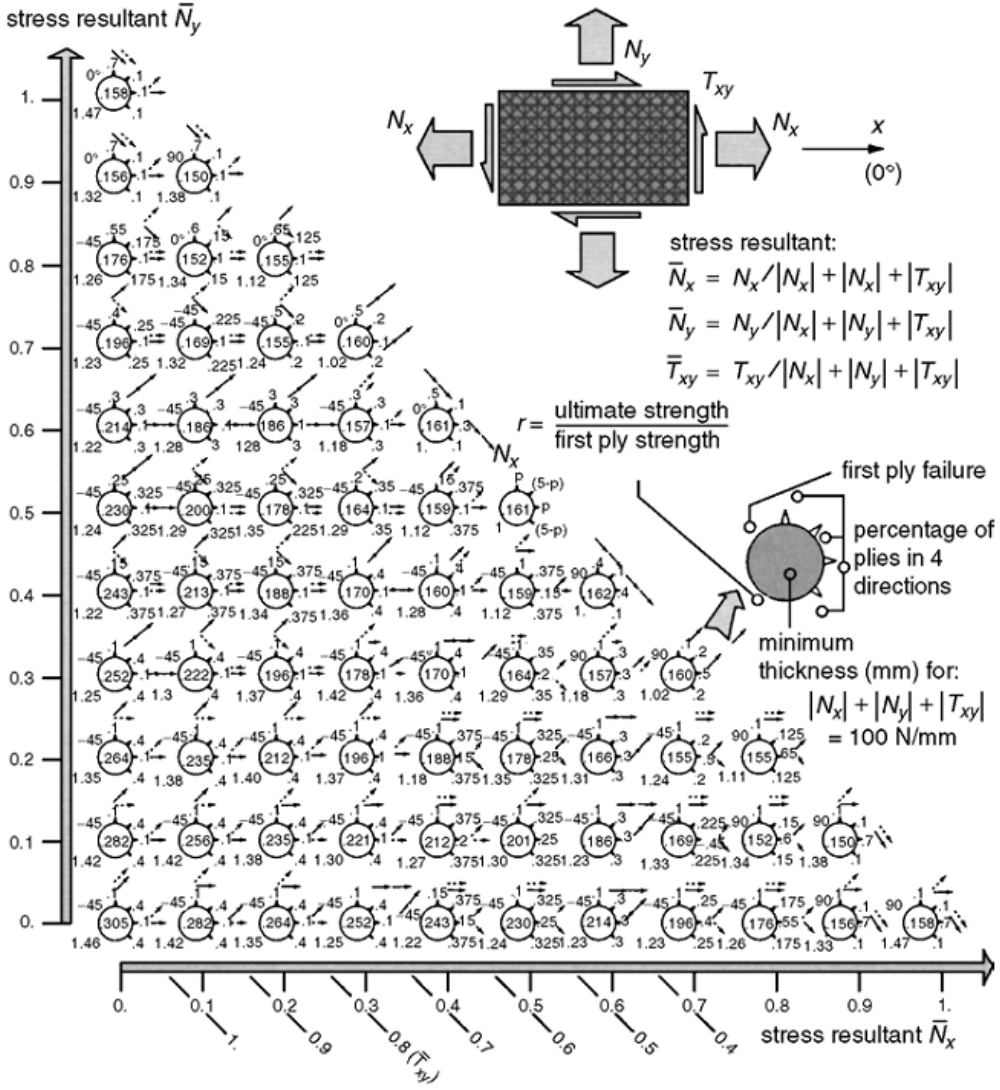
- حداقل ضخامت لمینیت از معیار Tsai-Hill بدست می اید.
- البته در واقعیت لایه ها با درجات مختلف بخشی از بارها در جهات دیگر تحمل می کنند. پس ضخامت های واقعی بزرگتر از ضخامت های بدست آمده در اسلاید قبل خواهند بود، که در عمل خطرساز می شود.

بارگذاری پیچیده-ترکیب بهینه لمینیت

- در مورد قبل لمینیت بهینه نشد. لمینیتی بهینه است که با کمترین ضخامت بتواند تنشهای N_x, N_y, T_{xy} را تحمل کند.
- در این حالت از جداولی استفاده می شود که بر اساس معیارTsai-Hill ترکیب بهینه لمینیت را بر اساس N_x, N_y, T_{xy} میدهد.

نمونه ای از نمودار ترکیب بهینه

Table 5.16 Optimum Composition of a Carbon/Epoxy Laminate



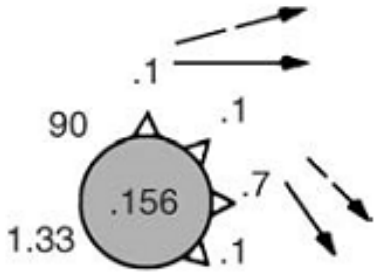
$V_f = 0.6$, 10% minimum in each direction of 0°, 90°, +45°, −45°. (Ply characteristics: see Appendix 1 or Section 3.3.3).

Dr. Hamzeh Shahrajabian-IAUN

مثلاً برای تنشهای زیر داریم:

$$N_x = 720 \text{ N/mm}; \qquad N_y = 0; \qquad T_{xy} = 80 \text{ N/mm}$$

$$\bar{N}_x = 720/(720+80) = 0.9; \qquad \bar{N}_y = 0; \qquad \bar{T}_{xy} = 80/(720+80) = 0.1$$



- بر اساس جدول اسلاید قبل داریم:

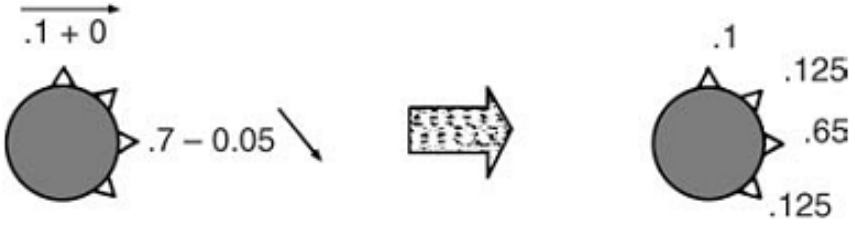
- Optimal composition of the laminate
  - 70% of 0° plies (along x direction)
  - 10% of 90° plies
  - 10% of plies in 45°, 10% of plies in –45°
- Critical thickness of the laminate: 0.156 mm when the arithmetic sum of the 3 stress resultants is equal to 100 N/mm. For this thickness, the first ply failure occurs in the 90° plies. However, one can continue to load this laminate until it reaches 1.33 times the critical load, as:

$$N_x = 1.33 \times 720 = 957 \text{ N/mm}; \qquad N_y = 0$$

$$T_{xy} = 1.33 \times 80 = 106 \text{ N/mm}$$

ادامه

- مجموع تنشهای منتج برابر است با: $720 + 80 = 800$ N/mm
- مقدار فوق ۸ برابر ۱۰۰ است.
- پس ضخامت لمینیت باید بیشتر از مقدار زیر باشد. $8 \times 0.156 = 1.25$ mm
- **ترکیبات همسایگی:** دومین کوچکترین ضخامت در حومه، با اصلاح ترکیب نشان داده شده در جهت مشخص شده با پیکان توپر بدست می آید:



پیکان افقی: بدون تغییر
پیکان به سمت پایین: کاهش ۰,۰۵
پیکان به سمت بالا: افزایش ۰,۰۵

One then obtains (not shown on the plate) a thickness of 0.160 mm (increase of 2.5% relative to the previous value) and a multiplication factor for the loading equal to 1.35.

ادامه

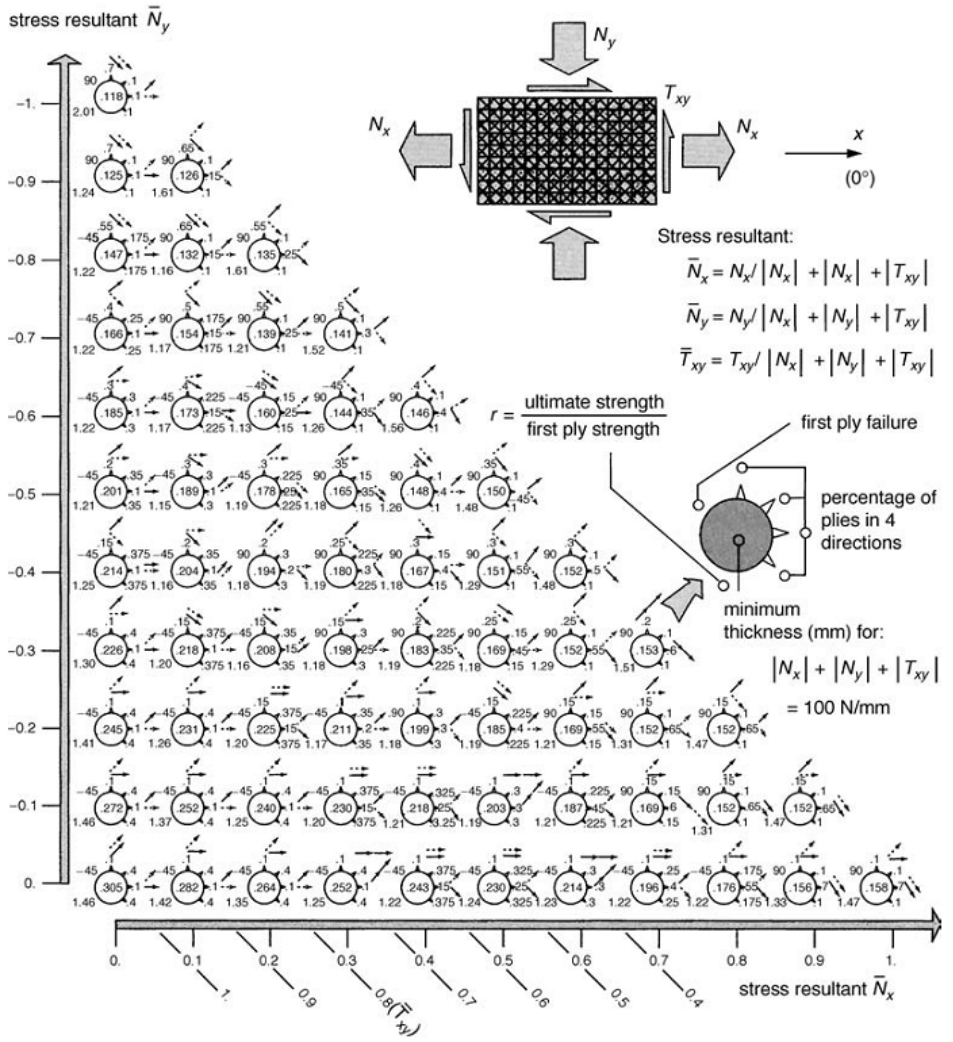
- سومین کوچکترین ضخامت در حومه با اصلاح ترکیب نشان داده شده در جهت مشخص شده با پیکان خط شکسته بدست می آید:

One then obtains a thickness (not shown on the plate) of 0.165 mm (increase of 6%) and a multiplication factor of 1.3 for the load.

مثال دیگر

$$N_x = 600 \text{ N/mm};\ N_y = -300 \text{ N/mm};\ T_{xy} = 100 \text{ N/mm}$$

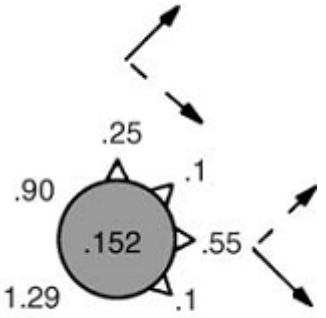
Table 5.18 Optimum Composition of a Carbon/Epoxy Laminate



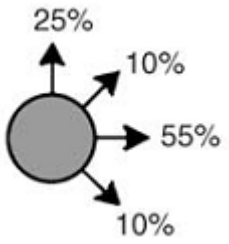
V_f = 0.6, 10% minimum in each direction of 0°, 90°, +45°, −45°. (Ply characteristics: see Appendix 1 or Section 3.3.3).

از جدول روبرو داریم:

$$\bar{N}_x = .6;\ \bar{N}_y = -.3;\ \bar{T}_{xy} = 0.1 \text{ N/mm}$$



- optimal composition of the laminate:



ادامه

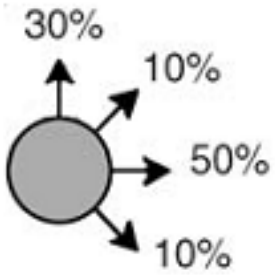
where

- Critical thickness is $10 \times 0.152 = 1.52$ mm
- These are the 90° plies that fail first.
- Complete rupture of the laminate occurs when:

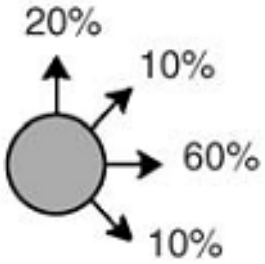
$$N_x = 1.29 \times 600 = 774 \text{ N/mm}$$

$$N_y = 1.29 \times -300 = -387 \text{ N/mm}$$

$$T_{xy} = 1.29 \times 100 = 129 \text{ N/mm}$$



- نزدیکترین ضخامت بحرانی (در جهت افزایش):



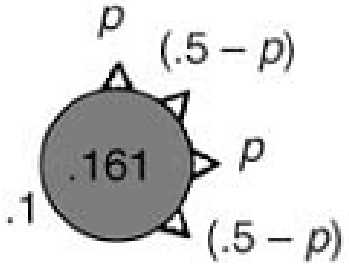
- سومین ضخامت نزدیک (در جهت افزایش۹:

تبصره

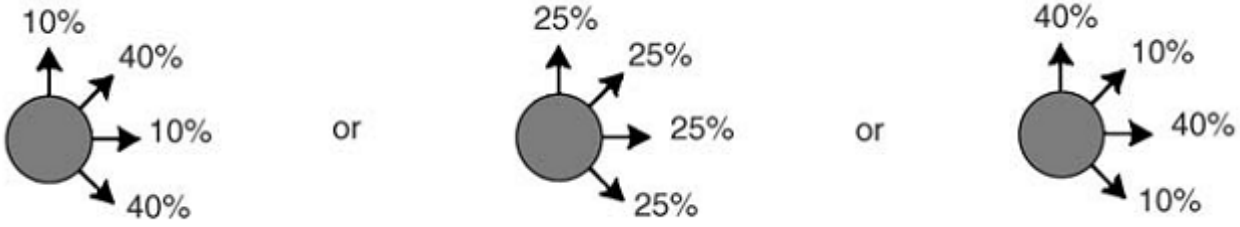
- چند مورد بارگذاری می تواند منجر به چندین ترکیب بهینه متمایز با ضخامت یکسان شود. برای مثال:

$$\bar{N}_x = \bar{N}_y = 0.5;\ \bar{T}_{xy} = 0$$

- در این حالت بارگذاری آیزوتروپیک بوده و دایره موهر به نقطه تبدیل می شود.
- بر اساس جدول در شش اسلاید قبل داریم:



meaning that all values of p less than or equal to 0.5 apply, for example:

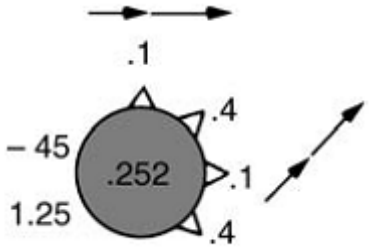


در همه موارد ضخامت ۰,۱۶۱ بدست می آید و مستقل از p است.

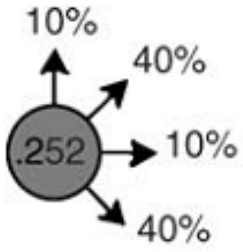
ادامه

- در برخی موارد بارگذاری در جدول، تنها پیکانهای توپر وجود دارد. مثلاً برای:

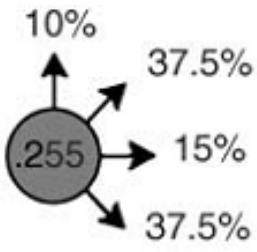
$$\bar{N}_x = 0.3; \qquad \bar{N}_y = 0; \qquad \bar{T}_{xy} = 0.7$$



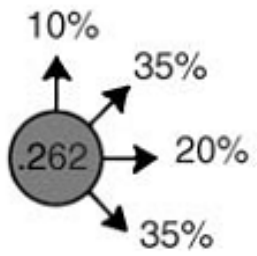
- بر اساس جدول در هفت اسلاید قبل داریم:
- سه ترکیب بهینه همسایه عبارتند از:



then



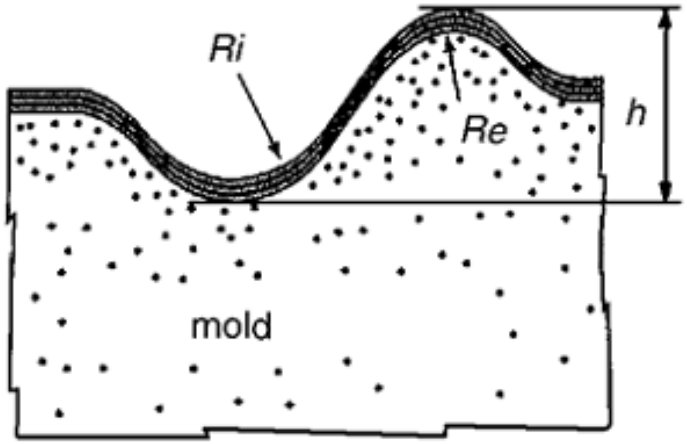
then

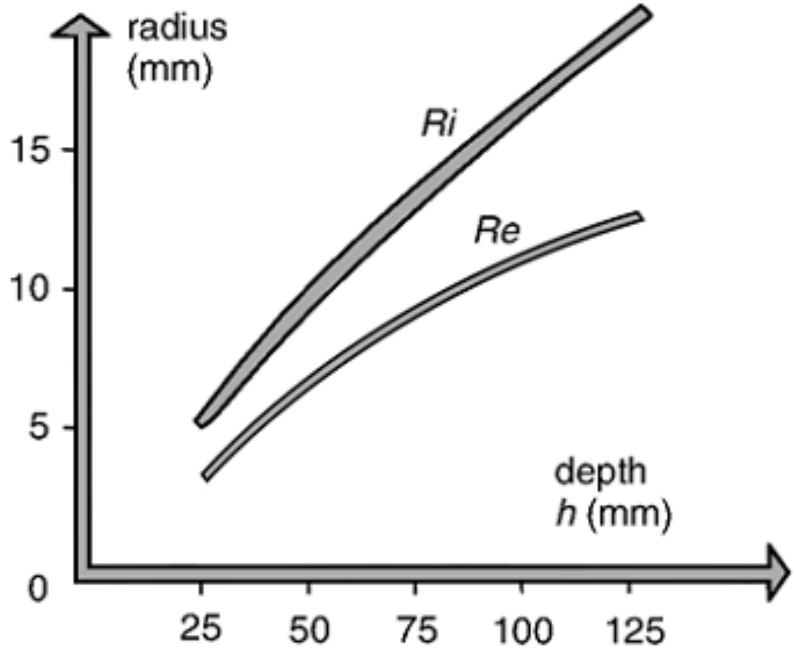


ملاحظات عملی

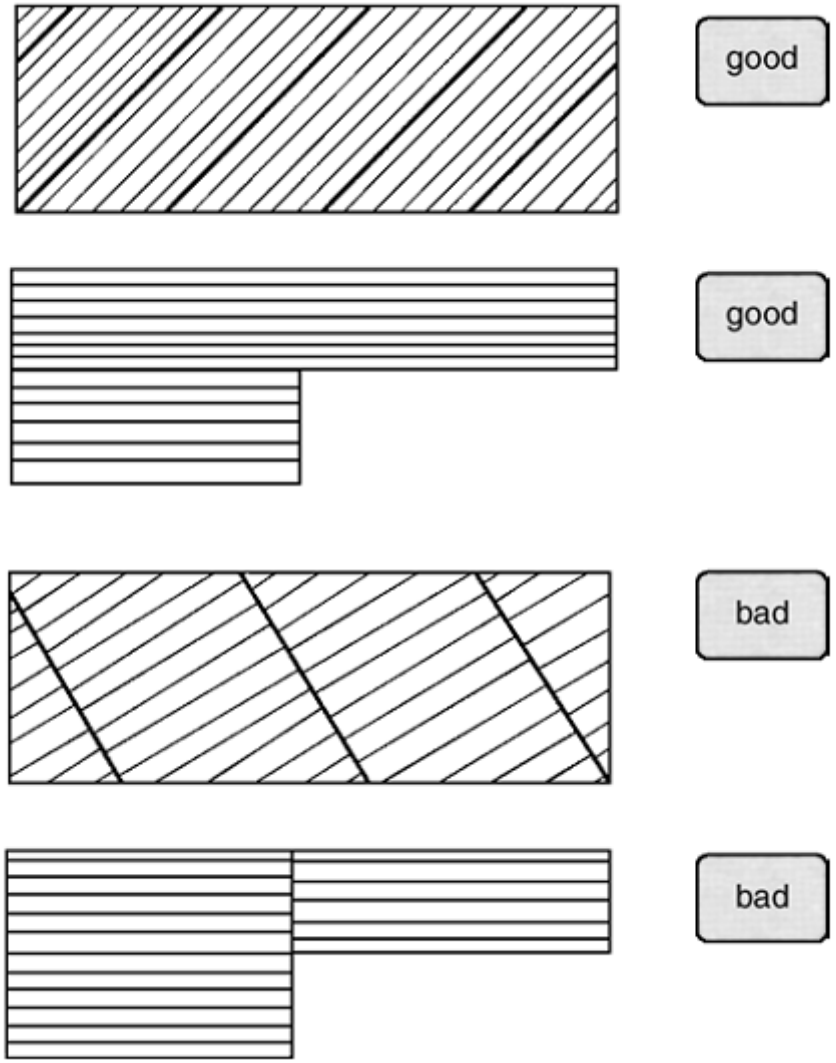
- پارچه ها قادرند سطوح باقیمانده را به خاطر عمل هل دادن در جهات تار و پود، پوشش دهد.
- شعاع قالب نباید زیاد کوچک باشد (شکل اسلاید بعد).
- ضخامت یک لایه پلیمریزه شده بیشتر از ۰,۸ تا ۰,۸۵ ضخامت لایه قبل از پلیمریزاسیون نیست. در مقدار نهایی ضخامت باید ۱۵٪ حاشیه های غیر ضروری نیز به حساب آید.
- وقتی یک ورقه تک جهته کل سطحی را که باید یک تک لایه پوشش دهد را پوشش نمی دهد، ضروری است هنگام بریدن قطعات ورق احتیاطهای لازم به عمل آید (شکل دو اسلاید بعد).
- ورقه های تک جهته به خوبی به گوشه های تیز در جهت منطبق نمی شود.

حداقل شعاع گوشه های داخلی و بیرونی قالب

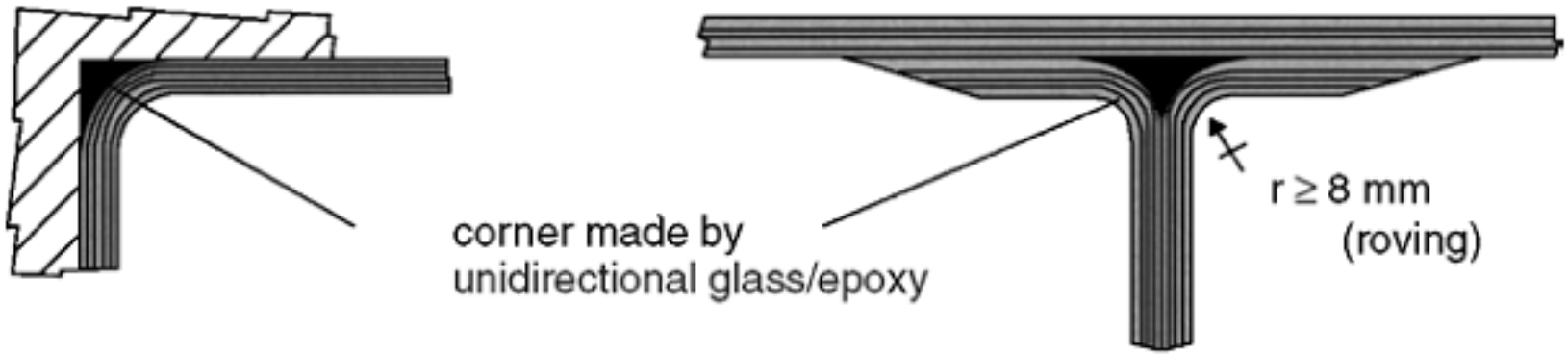




آرایش های مختلف پیشنهادی برای برش



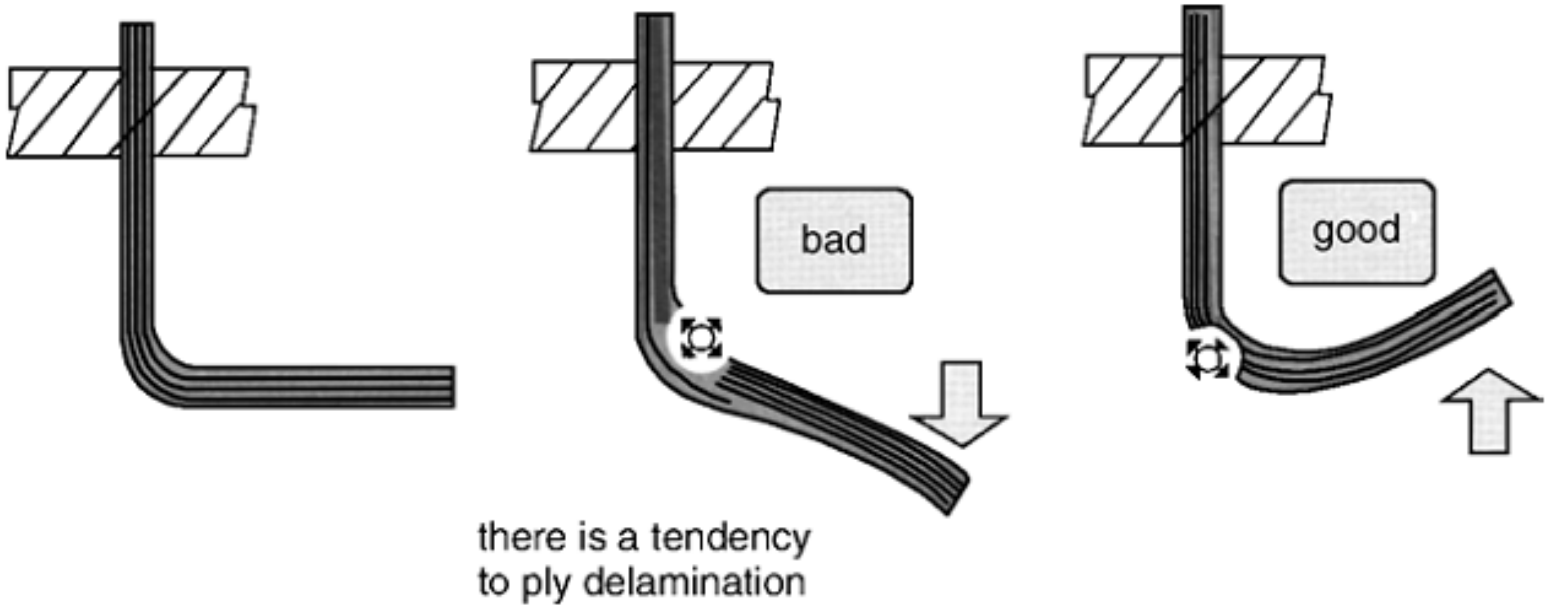
روش قرار دادن در گوشه



لایه لایه شدن (DELAMINATION)

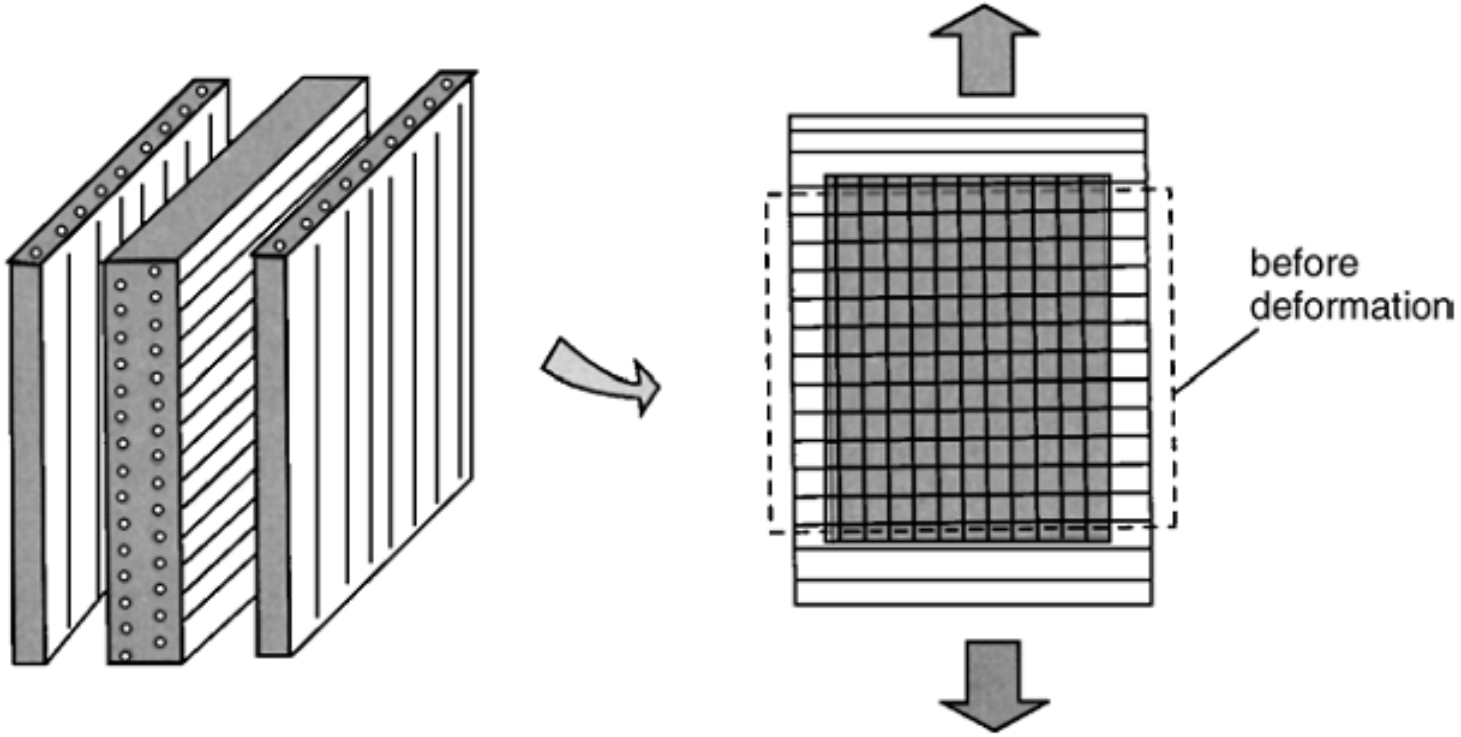
- هنگامی که لایه های تشکیل دهنده لمینیت از هم جدا شوند می گوییم لایه لایه شده اند.
- عوامل زیر باعث دلمینیشن می شوند:
  - یک ضربه ای که آثار ظاهری برجا نگذاشته و می تواند باعث لایه لایه شدن شوند.
  - وضعیت بارگذاری که باعث جداشدن لایه ها می شود (شکل اسلاید بعد).
  - تنش های برشی بین لایه ها خیلی نزدیک به لبه های لمینیت.
  - حالت پیچیده تنشها در فصل مشترک به خاطر کمانش موضعی.

موقعیت گوشه



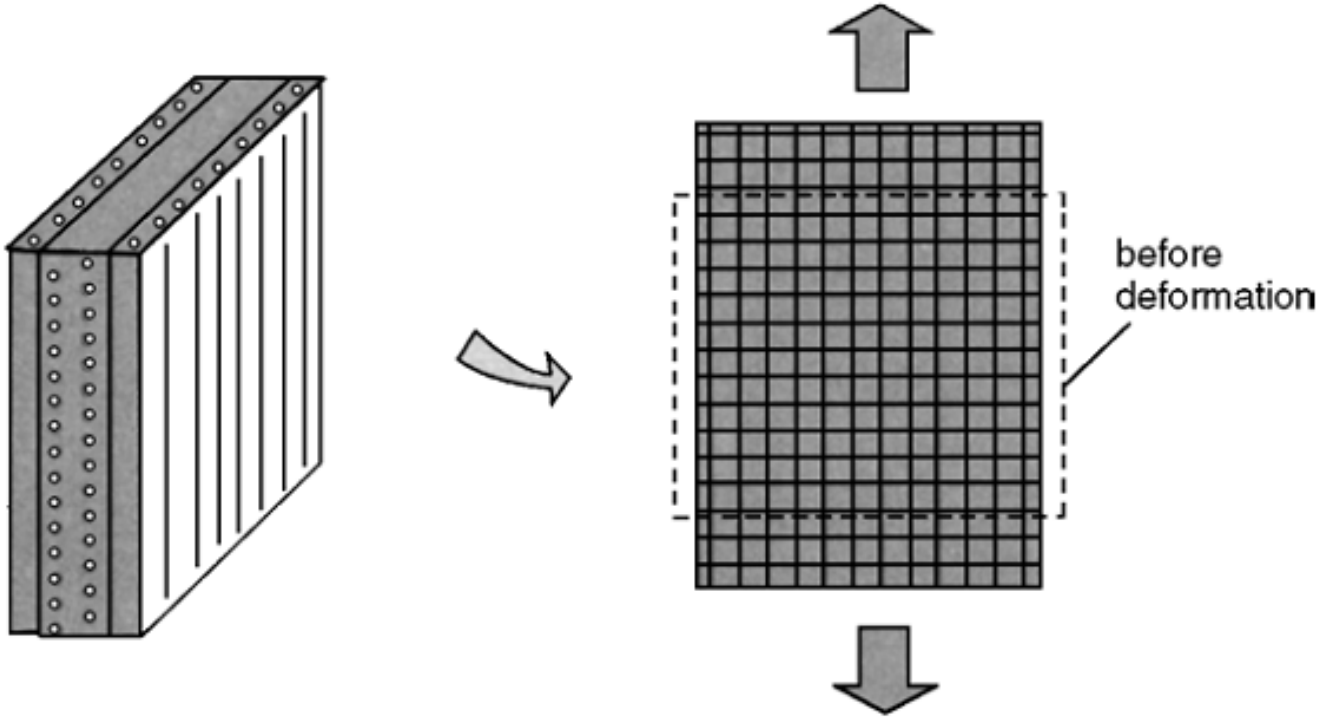
سه لایه در موقعیت جدا از هم (خوب به هم نچسبیدند)

- تحت اثر تنش، لایه ها بطور مستقل تغییر شکل می دهند.



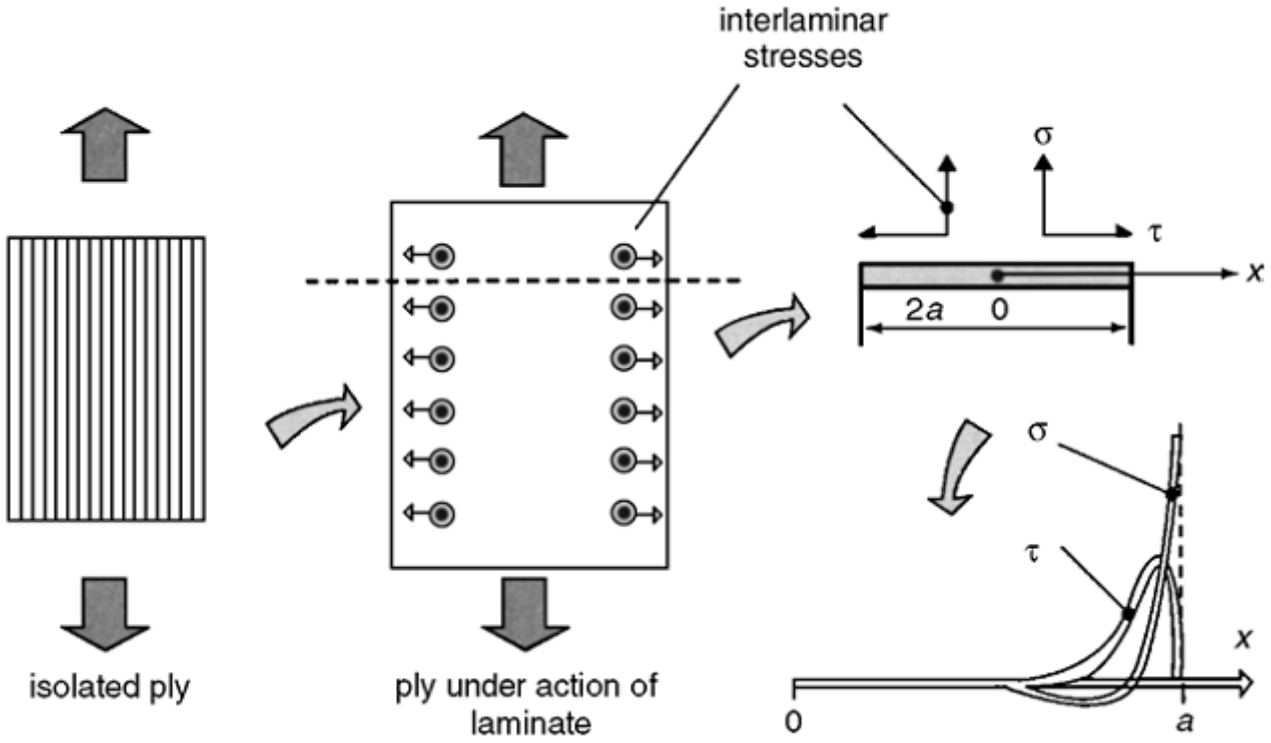
سه لایه متصل به هم

- لایه ها با همدیگر تغییر شکل می یابند.

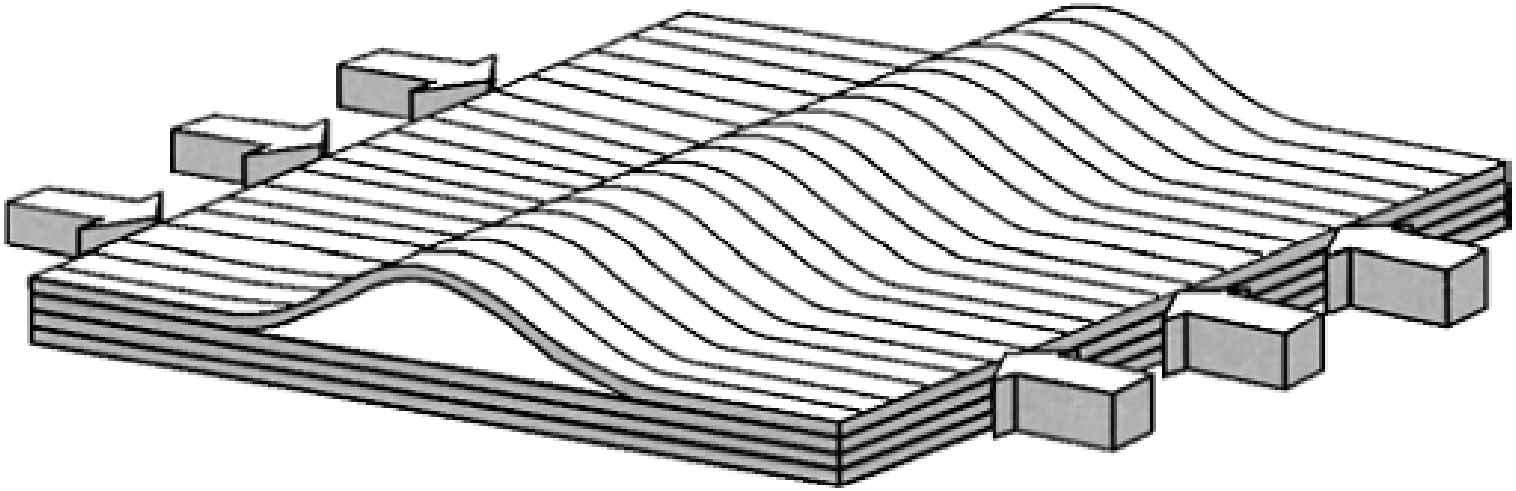


تنش ها در لبه های آزاد

- تنش های برشی زیاد در لبه ها باعث لایه لایه شدن می شود.

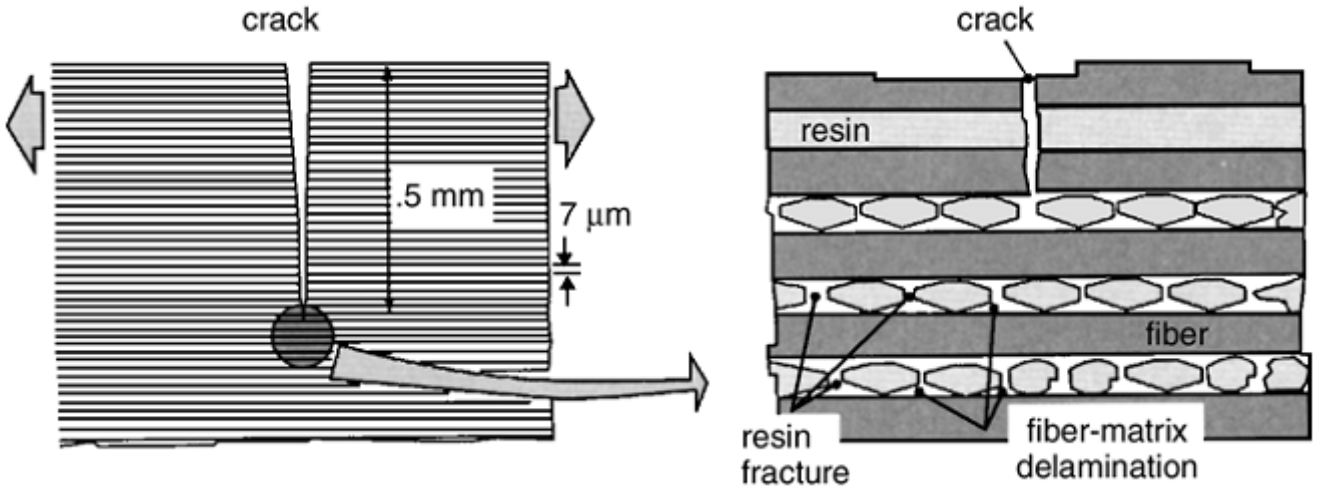


لایه لایه شدن به خاطر کمانش موضعی



چرا مقاومت خستگی خیلی عالی است؟

- **پارادوکس:** شیشه خیلی ترد است. رزین گرماسخت نیز خیلی ترد است. اما ترکیب تقویت کننده و ماتریس از انتشار ترک جلوگیری می کند.
- **توضیح:** هنگام انتشار ترک، برای مثال در لایه تک جهته، تمرکز تنش اولیه در انتهای ترک منجر به شکست رزین می شود. الیافها سپس جدا شده و از رها شدن تنشها سود می برند. به عنوان یک ماده همگن، تمرکز تنش بیشتری وجود ندارد.

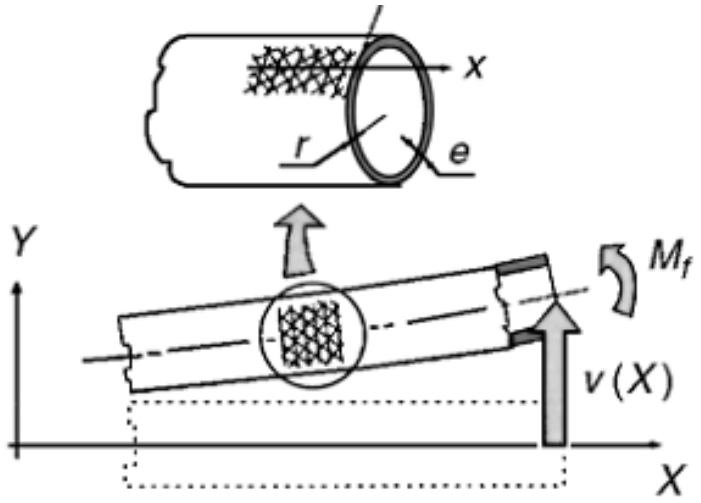


تیوبهای لمینیتی

- این تیوبها به روش رشته پیچی تولید می شوند. خواص لوله تحت تنش به صورت زیر است:

E_x and G_{xy} are the moduli of elasticity in the tangent plane x,y.
I and I_o are respectively the quadratic moment of inertia and polar moment of inertia ($I_o = 2I$).
Y is the coordinate of a point in the section (in the undeformed position) in the X, Y, Z coordinates.
r is the average radius of the tube.

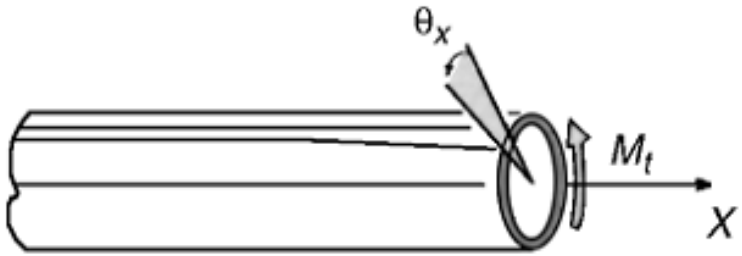
روابط تیوب لمینیتی



flexure

$$E_x I \frac{d^2 v}{dX^2} = M_f$$

$$\sigma_x = -\frac{M_f}{I} \times Y$$



torsion

$$G_{xy} I_0 \frac{d\theta_X}{dX} = M_t$$

$$\tau_{xy} = \frac{M_t}{I_0} \times r$$