



INNOVATEX 2016

Łódź 12-13 października 2016

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

Dr hab. inż. Janusz German
Profesor Politechniki Krakowskiej
Zakład Wytrzymałości Materiałów
Wydział Inżynierii Lądowej
<http://limba.wil.pk.edu.pl/~jg>

Mikromechaniczny opis wytrzymałości kompozytów warstwowych

Konferencja Technicznych i Specjalistycznych Wyrobów Włókienniczych
Łódź 12-13 października 2016



TEMATY

Czynniki determinujące analizę

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

❖ **Materiał kompozytowy (włóknisty kompozyt laminatowy)**

- ◆ **niejednorodność**
- ◆ **anizotropia**

❖ **Poziomy „obserwacji”**

- ◆ **makroskopowy**
- ◆ **mikroskopowy**



TEMATY Poziomy obserwacji (1)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

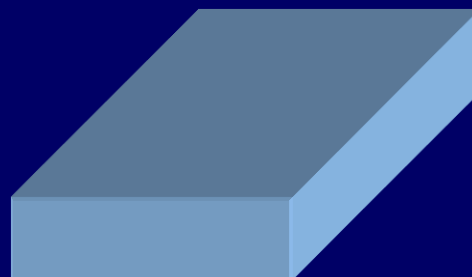
Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

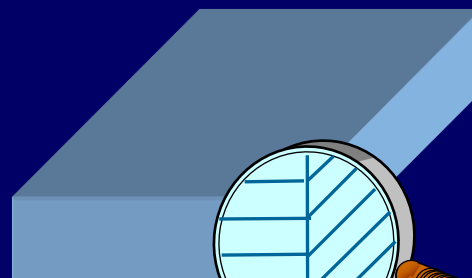
Podsumowanie

Poziom makroskopowy



LAMINAT

- analiza wytrzymałościowa



WARSTWA

- kryteria wytrzymałościowe



TEMATY Poziomy obserwacji (2)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

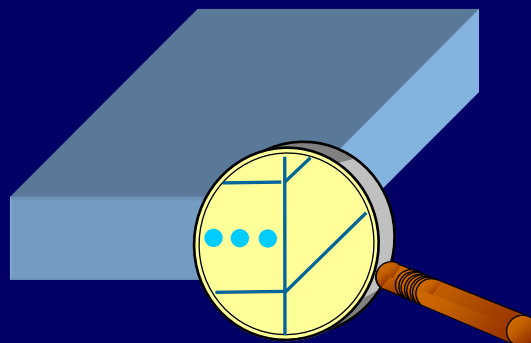
Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

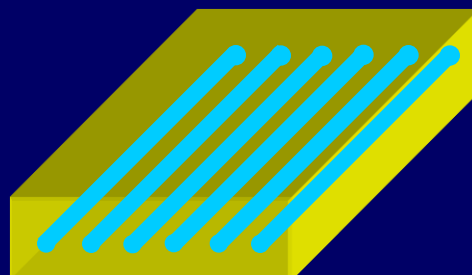
Podsumowanie

Poziom mikroskopowy



SKŁADNIKI WARSTWY

- włókna
- matryca (osnowa)



MODEL MIKROMECHANICZNY

- Wpływ własności składników na własności warstwy





TEMATY

Podstawowe zagadnienia

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

- ❖ **wytrzymałość warstwy na rozciąganie w kierunku włókien X_t**
- ❖ **wytrzymałość warstwy na ściskanie w kierunku włókien X_c**
- ❖ **efektywność włókien**
 - typ włókien
 - objętościowy udział włókien
 - efektywna długość włókien



TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

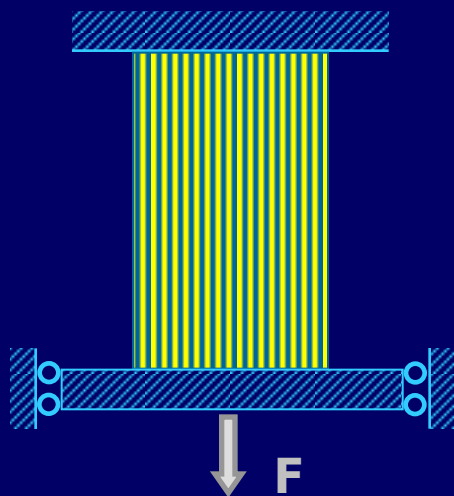
Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

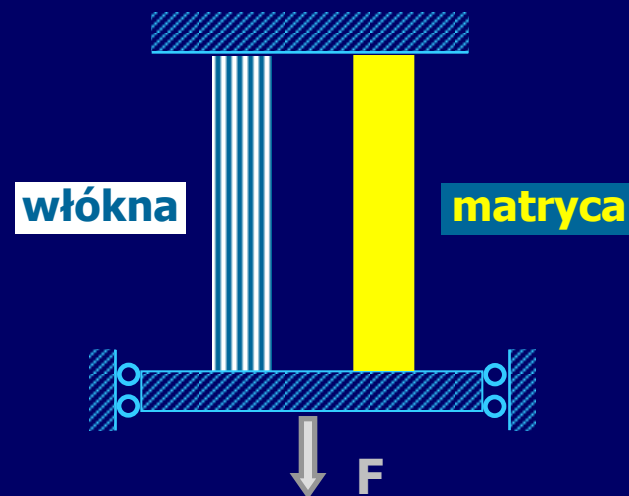
TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (1)

Wytrzymałość warstwy na rozciąganie - założenia (1)



Warstwa kompozytu



Model mikromechaniczny warstwy kompozytu



TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (2)

TEMATY

Wytrzymałość warstwy na rozciąganie - założenia (2)

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

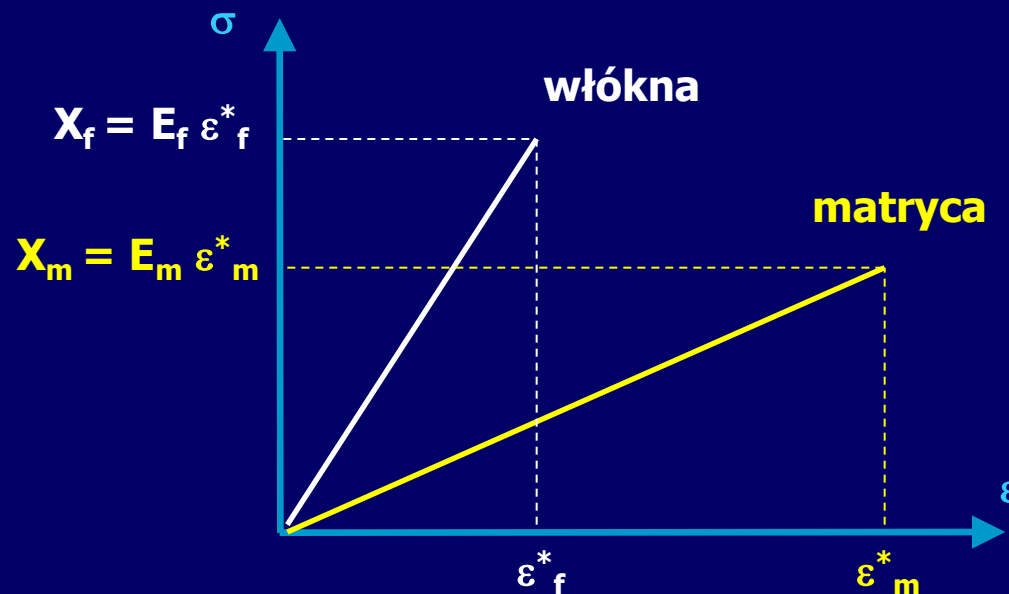
Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

- matryca i włókna są liniowo sprężyste aż do zniszczenia





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (3)

TEMATY

Wytrzymałość warstwy na rozciąganie - założenia (3)

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

- **wszystkie włókna mają jednakową wytrzymałość (pomijana jest losowa zmienność wytrzymałości)**
- **odkształcenia podłużne matrycy i włókien są takie same**
- **mimo pęknięcia włókien lub matrycy – w warstwie panuje jednoosiowy stan naprężenia (wieloosiowy stan naprężenia powstający w pobliżu miejsca pęknięcia jest pomijany)**





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (4)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

Zniszczenie składników warstwy

❖ Kryterium zniszczenia składników warstwy

Składniki warstwy pozostają nieuszkodzone tak długo, aż odkształcenie wywołane obciążeniem F nie osiągnie wartości obciążenia niszczącego włókna, bądź matrycę

❖ Możliwe przypadki zniszczenia

- Przypadek „kruche włókna – ciągliwa matryca” ($\varepsilon_f^* < \varepsilon_m^*$)
- Przypadek „krucha matryca – ciągliwe włókna” ($\varepsilon_f^* > \varepsilon_m^*$)
- Przypadek „matryca i włókna o jednakowej kruchości” ($\varepsilon_f^* = \varepsilon_m^*$)





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (5)

Zniszczenie typu „kruche włókna – ciągliwa matryca”

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

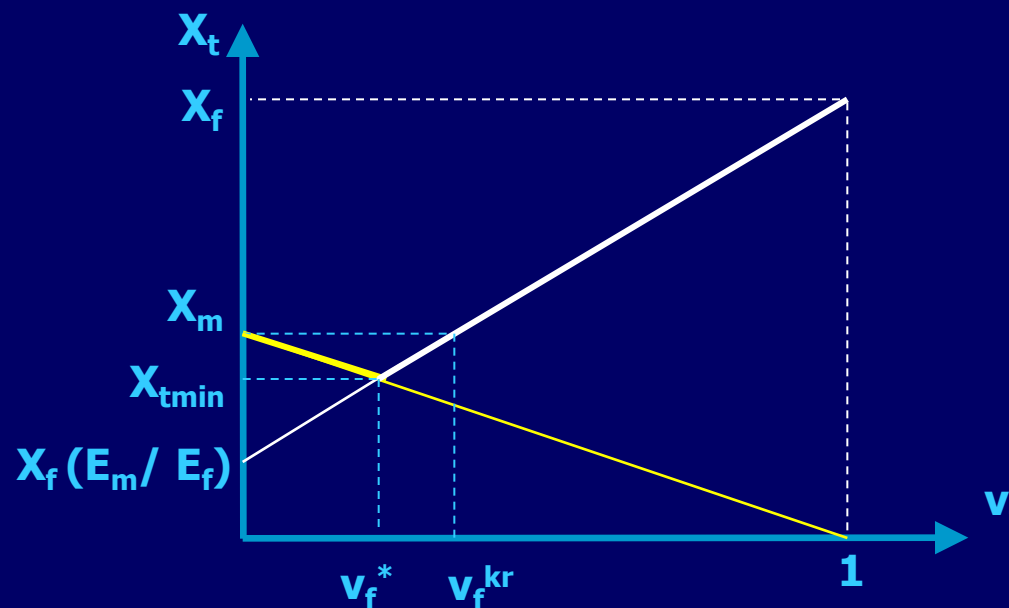
Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie



wytrzymałość kontrolowana przez matrycę

wytrzymałość kontrolowana przez włókna





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (6)

Zniszczenie typu „krucha matryca - ciągliwe włókna”

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

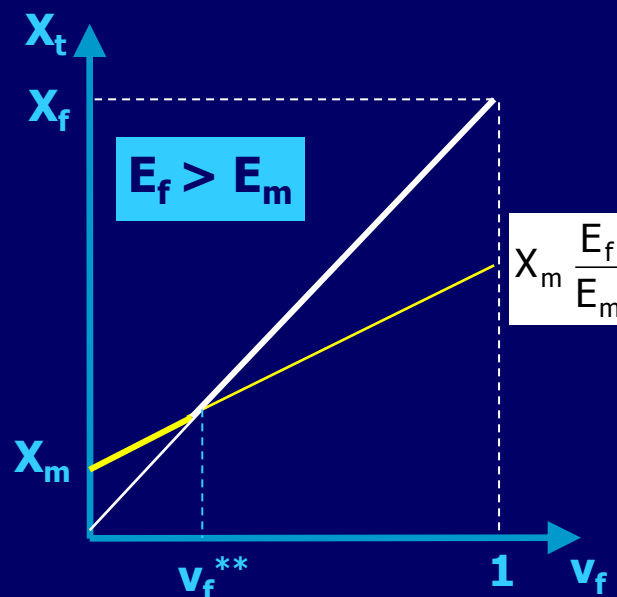
Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

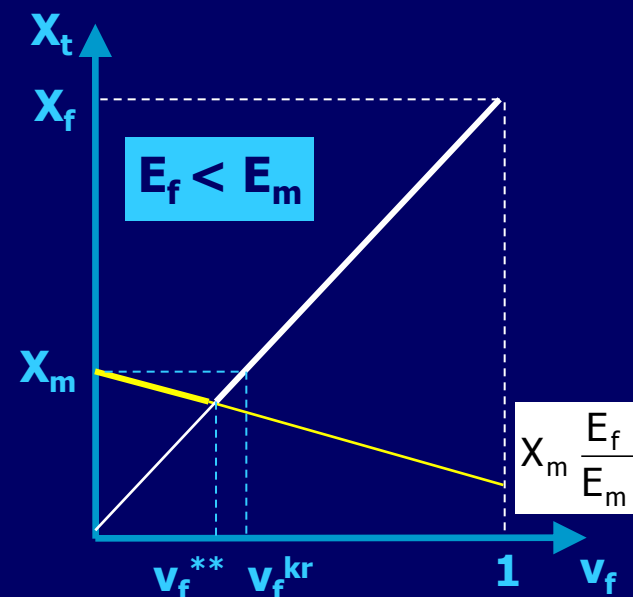
Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie



WKpM | **WKpW**



WKpM | **WKpW**





Model włókien równej wytrzymałości (7)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

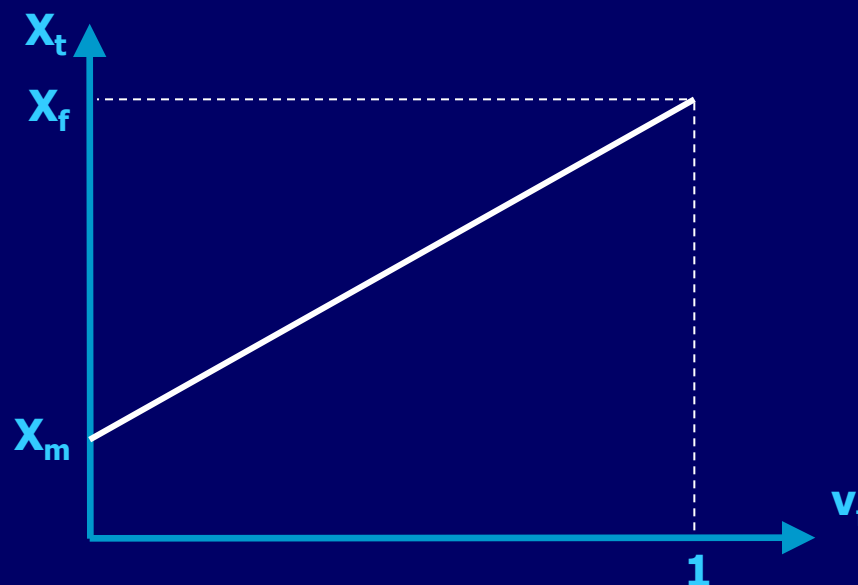
Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

Zniszczenie typu „matryca i włókna jednakowo kruche”



$$X_t = X_m v_m + X_f v_f \quad \text{dla } 0 \leq v_f \leq 1$$

zasada mieszanin dla wytrzymałości warstwy kompozytowej





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (8)

TEMATY

Wytrzymałość na rozciąganie typowych kompozytów

Wytrzymałości podłużne, moduły sprężystości, odkształcenia niszczące dla typowych włókien i matrycy epoksydowej

	włókna							matryca
	grafit UHM	szkło „E”	grafit HM	kevlar 49	kevlar 29	grafit HS	szkło „S”	epoxy
X_f, X_m [MPa]	1030	1700	1790	2270	2270	2480	2500	65
X_f / X_m	15.8	26.2	27.5	34.9	34.9	38.2	38.5	-
E_f, E_m [GPa]	520	72	370	124	83	230	87	3.5
E_f / E_m	148.6	20.6	105.7	35.4	23.7	65.7	24.9	-
$\varepsilon_f^*, \varepsilon_m^*$ [%]	0.2	2.36	0.48	1.83	2.73	1.08	2.87	1.86
v_f^* [%]	5.33	-	2.62	0.04	-	1.09	-	-
v_f^{**} [%]	-	15.2	-	-	8.2	-	6.8	-
v_f^{kr} [%]	5.68	0	2.71	0.042	0	1.12	0	-

war. kruchej matrycy

war. kruchych włókien

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie



Model włókien równej wytrzymałości (9)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

Efektywność włókien

❖ Czynniki określające efektywność włókien

- typ włókien
- objętościowy udział włókien
- długość włókien





TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

TEMATY Wytrzymałość warstwy na ściskanie (1)

Ściskanie w kierunku włókien – założenia

- zniszczenie kompozytu związane jest z wyboczeniem włókien w płaszczyźnie warstwy
- wyboczenie włókien następuje w zakresie liniowo-sprężystym
- matryca i włókna są idealnie liniowo-sprężyste
- matryca stanowi rodzaj ciągłej „podpory” dla włókien, utrudniającej ich wyboczenie
- pomijany jest efekt ścinania włókien ($G_f \gg G_m$)



TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

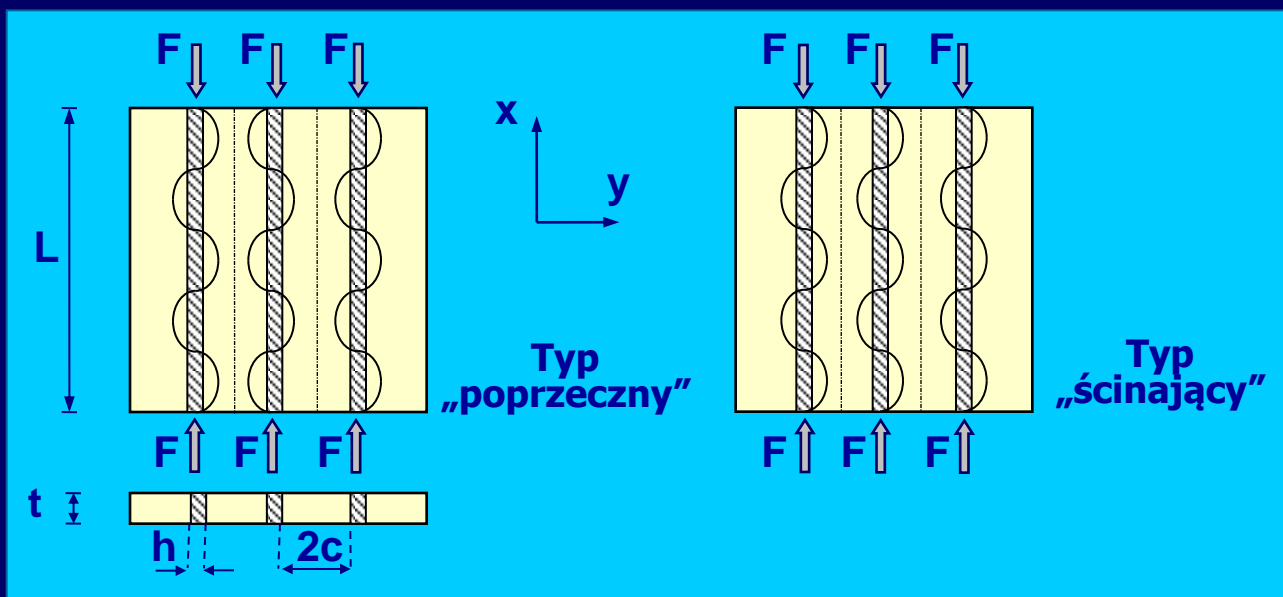
Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

TEMATY Wytrzymałość warstwy na ściskanie (2)

Ściskanie w kierunku włókien – typy wyboczenia



- dla obu typów wyboczenia włókno traktuje się jak pręt o przekroju prostokątnym $h \times t$ i długości L „zanurzony” w matrycy





TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

TEMATY

Wytrzymałość warstwy na ściskanie (3)

Ściskanie w kierunku włókien – wnioski (1)

- miarodajnym oszacowaniem wytrzymałości warstwy jest mniejsza z wartości uzyskanych dla obu typów wyboczenia
- wytrzymałość warstwy na ściskanie określona jest naprężeniem krytycznym dla włókien przy ich wyboczeniu
- wytrzymałość na ściskanie przy wyboczeniu „poprzecznym” zdeterminowana jest głównie ugięciem włókien
- wytrzymałość na ściskanie przy wyboczeniu „ścinającym” związana jest głównie ze ścinaniem matrycy





TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

TEMATY

Wytrzymałość warstwy na ściskanie (4)

Ściskanie w kierunku włókien – wnioski (2)

- w zależności od typu wyboczenia, wytrzymałość warstwy kompozytu na ściskanie X_c wynosi:

$$X_c = \begin{cases} X_c^{\text{poprz}} = 2 \sqrt{\frac{v_f E_f E_m}{3(1-v_f)}} \left[v_f + \frac{E_m}{E_f} (1-v_f) \right] & \text{dla } 0 \leq v_f \leq \bar{v}_f \\ X_c^{\text{ścín}} = \frac{G_m}{1-v_f} & \text{dla } \bar{v}_f \leq v_f \leq 1 \end{cases}$$

- o typie wyboczenia decyduje objętościowy udział włókien v_f . Wartość graniczną określa warunek $X_c^{\text{poprz}} = X_c^{\text{ścín}}$. Ogólnie akceptowanym przybliżeniem (po uwzględnieniu $G_m \ll E_f$) jest zależność:

$$\bar{v}_f = 0.66 \sqrt[3]{G_m/E_f}$$



TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

TEMATY Wytrzymałość warstwy na ściskanie (5)

Ściskanie w kierunku włókien – wnioski (3)

- Przykład: kompozyt epoksyd/włókno szklane „E”.
Stałe materiałowe: $E_f=72$ GPa, $E_m=3.5$ GPa, $\nu_m=0.4$,
 $G_m=E_m/[2(1+\nu_m)]=1.25$ GPa.





TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

PODSUMOWANIE (1)

w kompozytach o matrycy polimerowej zbrojonych typowymi włóknami zawsze zachodzą relacje:
 $E_f > E_m$; $X_f > X_m$

objętościowy udział włókien v_f w rzeczywistych kompozytach wynosi 45-70%

- objętości graniczne i krytyczne włókien nie mają znaczenia przy wyborze relacji określającej wytrzymałość warstwy na rozciąganie w kierunku włókien
- im stosunek wytrzymałości włókien do wytrzymałości matrycy jest większy, tym włókna są bardziej efektywne z punktu widzenia wzrostu wytrzymałości warstwy kompozytowej
- niemal całą siłę podłużną w warstwie kompozytowej przenoszą włókna



PODSUMOWANIE (2)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

w kompozytach o matrycy „plastycznej” zbrojonych typowymi włóknami zawsze zachodzą relacje:
 $E_f > E_m$; $X_f > X_m$

objętościowy udział włókien v_f w rzeczywistych kompozytach wynosi 45-70%

- wytrzymałość warstwy kompozytu przy rozciąganiu w kierunku włókien określają relacje:

$$X_t = \begin{cases} X_f [v_f + (E_m/E_f)(1 - v_f)] & \text{jeżeli } E_m/E_f < X_m/X_f \\ X_f v_f + X_m v_m & \text{jeżeli } E_m/E_f = X_m/X_f \\ X_f v_f & \text{jeżeli } E_m/E_f > X_m/X_f \end{cases}$$





PODSUMOWANIE (3)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

- **najbardziej efektywne pod względem wytrzymałościowym jest zbrojenie matrycy jednokierunkowymi włóknami ciągłymi**
- **wytrzymałość warstw zbrojonych włóknami krótkimi o losowym rozkładzie w matrycy jest silnie ograniczona i trudna do oszacowania (nie więcej niż 25% włókien jest „ustawionych” na kierunku obciążenia rozciągającego)**
- **o wytrzymałości warstwy kompozytowej na ściskanie decyduje typ wyboczenia włókien, zależny od ich udziału objętościowego**
- **w większości przypadków o wytrzymałości warstwy na ściskanie decyduje efekt ścinania matrycy**





INNOVATEX 2016

Łódź 12-13 października 2016

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie





INNOVATEX 2016

Łódź 12-13 października 2016

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (10)

TEMATY

Unormowana wytrzymałość warstwy dla różnych typów włókien

Czynniki determinujące analizę

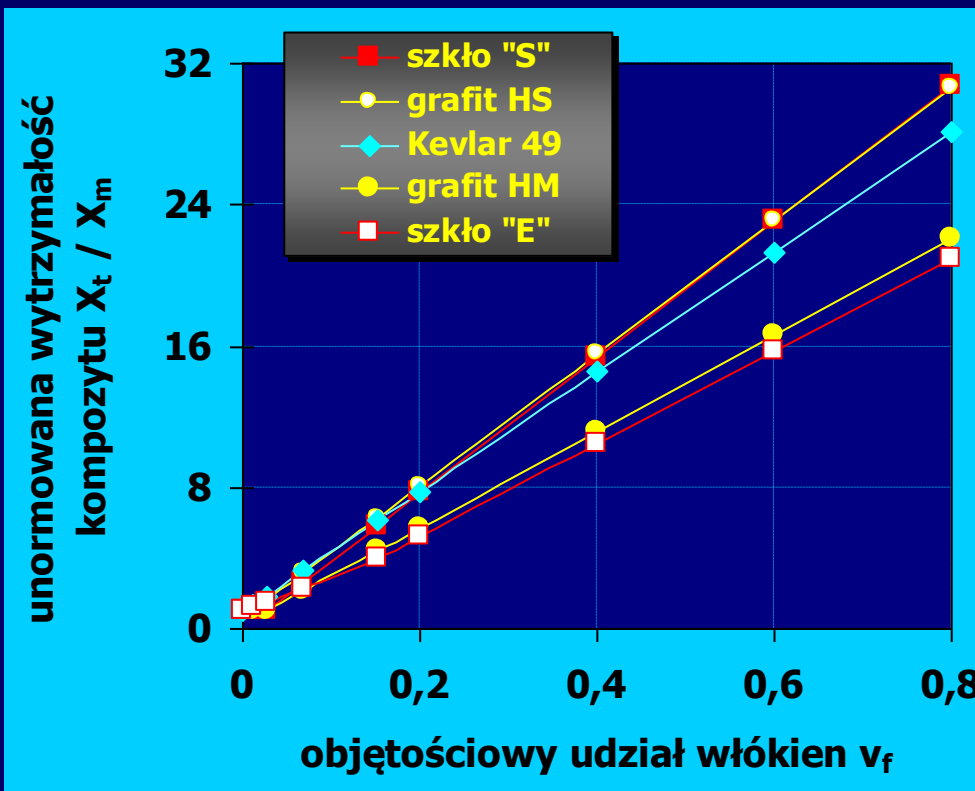
Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie



Włókno	X_f / X_m
szkło „S”	38.5
grafit HS	38.2
kevlar 49	34.9
grafit HM	27.5
szkło „E”	26.2



TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (11)

TEMATY

Redystrybucja obciążenia w funkcji objętościowego udziału włókien

Czynniki determinujące analizę

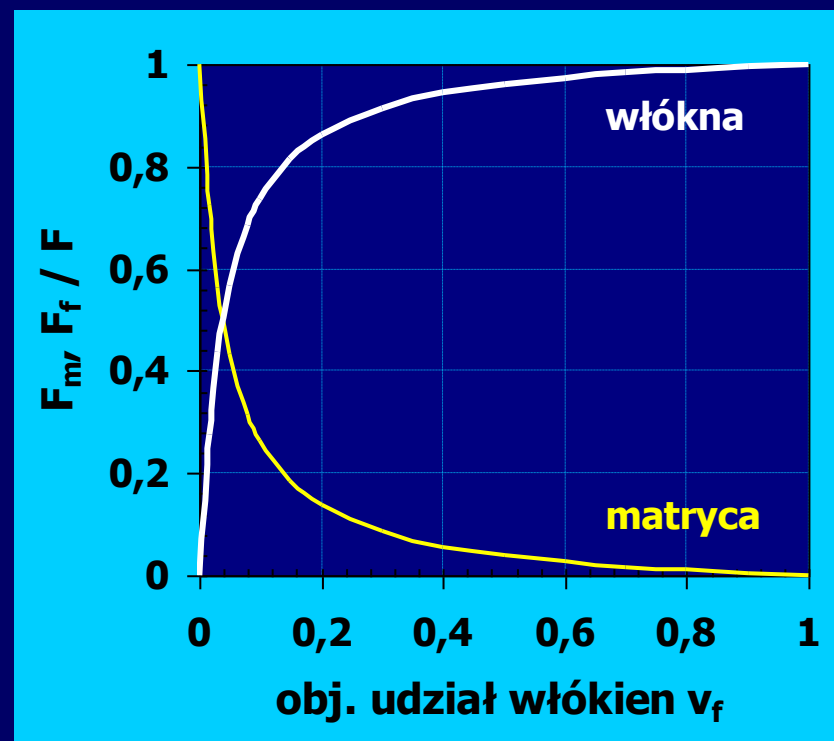
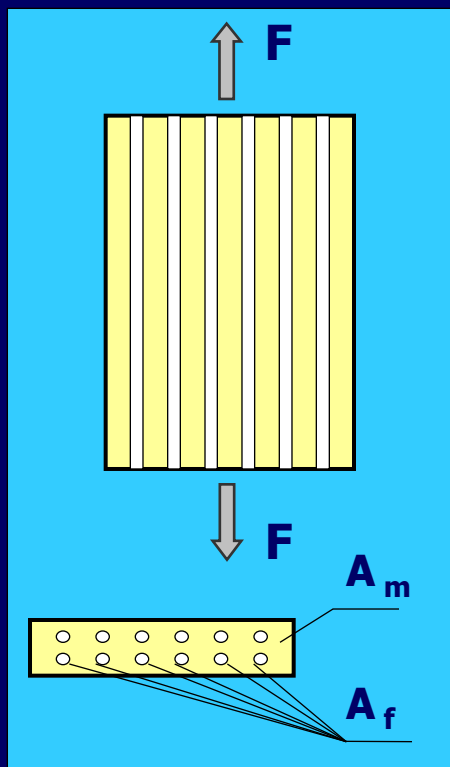
Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie





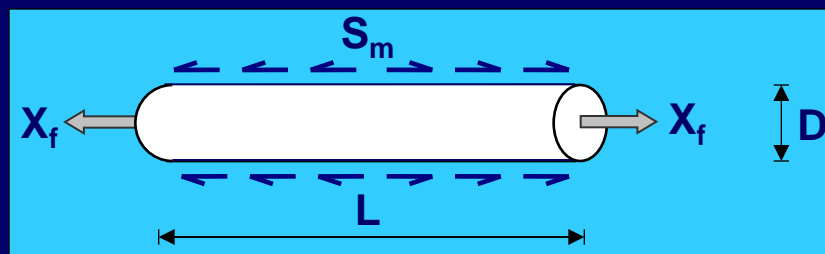
Model włókien równej wytrzymałości (12)

TEMATY

Wpływ długości włókien na wytrzymałość kompozytu

❖ Założenia

- obciążenie przekazywane jest przez matrycę do włókien przez powierzchnię styku obu faz
- dystrybucja obciążenia do włókna zależy od jego średnicy D i wytrzymałości połączenia „włókno-matryca”, za którą przyjmuje się wytrzymałość matrycy na ścinanie S_m
- powierzchnie końcowe włókien nie uczestniczą w przenoszeniu obciążenia



Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie



Model włókien równej wytrzymałości (13)

TEMATY

Wpływ długości włókien na wytrzymałość kompozytu

❖ Efektywna długość włókna (1)

Siła F przekazywana przez matrycę na włókno w odległości x od dowolnego jego końca

$$F = \int_0^x \pi D S_m dx = \pi D S_m x$$

Maksymalna siła F_f jaką może przenieść włókno

$$F_f = \left(\pi D^2 / 4 \right) X_f$$



Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie



Model włókien równej wytrzymałości (14)

TEMATY

Wpływ długości włókien na wytrzymałość kompozytu

❖ Efektywna długość włókna (2)

Włókno jest w pełni wykorzystane, gdy $F=F_f$. Warunek jest spełniony dopiero w odległości x_{kr} od końca włókna

$$x_{kr} = \frac{D}{4} \frac{X_f}{S_m}$$

Włókno efektywnie poprawia wytrzymałość kompozytu, jeśli jego długość osiąga tzw. długość krytyczną

$$L_{kr} = 2 x_{kr} = \frac{D}{2} \frac{X_f}{S_m}$$



Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie



TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (15)

TEMATY

Wpływ długości włókien na wytrzymałość kompozytu

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

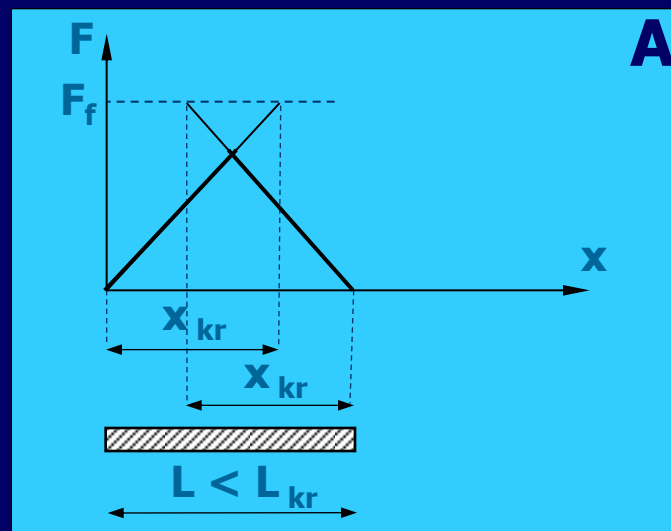
Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

- ❖ Rozkład siły osiowej przekazywanej na włókno przez matrycę (A)





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (16)

TEMATY

Wpływ długości włókien na wytrzymałość kompozytu

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

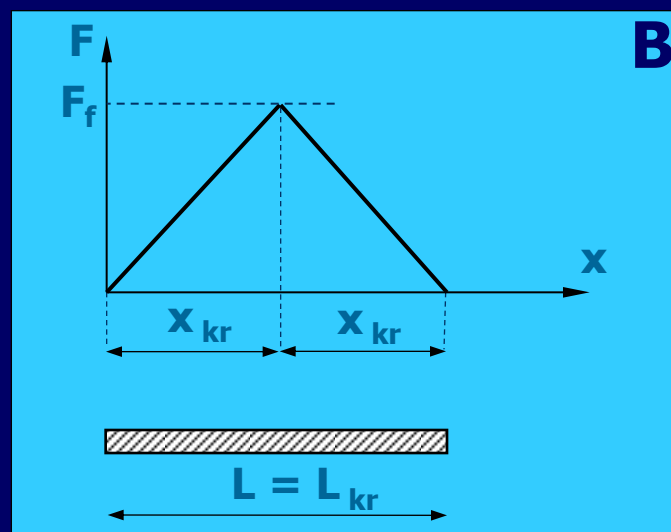
Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

- ❖ Rozkład siły osiowej przekazywanej na włókno przez matrycę (B)





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (17)

TEMATY

Wpływ długości włókien na wytrzymałość kompozytu

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

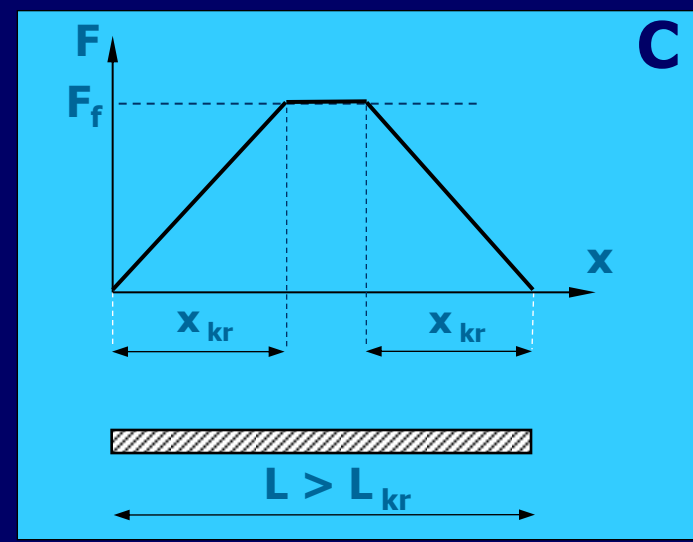
Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

- ❖ Rozkład siły osiowej przekazywanej na włókno przez matrycę (C)



Włókna ciągłe

$$L > 15 L_{kr}$$



powrót



TEMATY Poziomy obserwacji (1.1)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

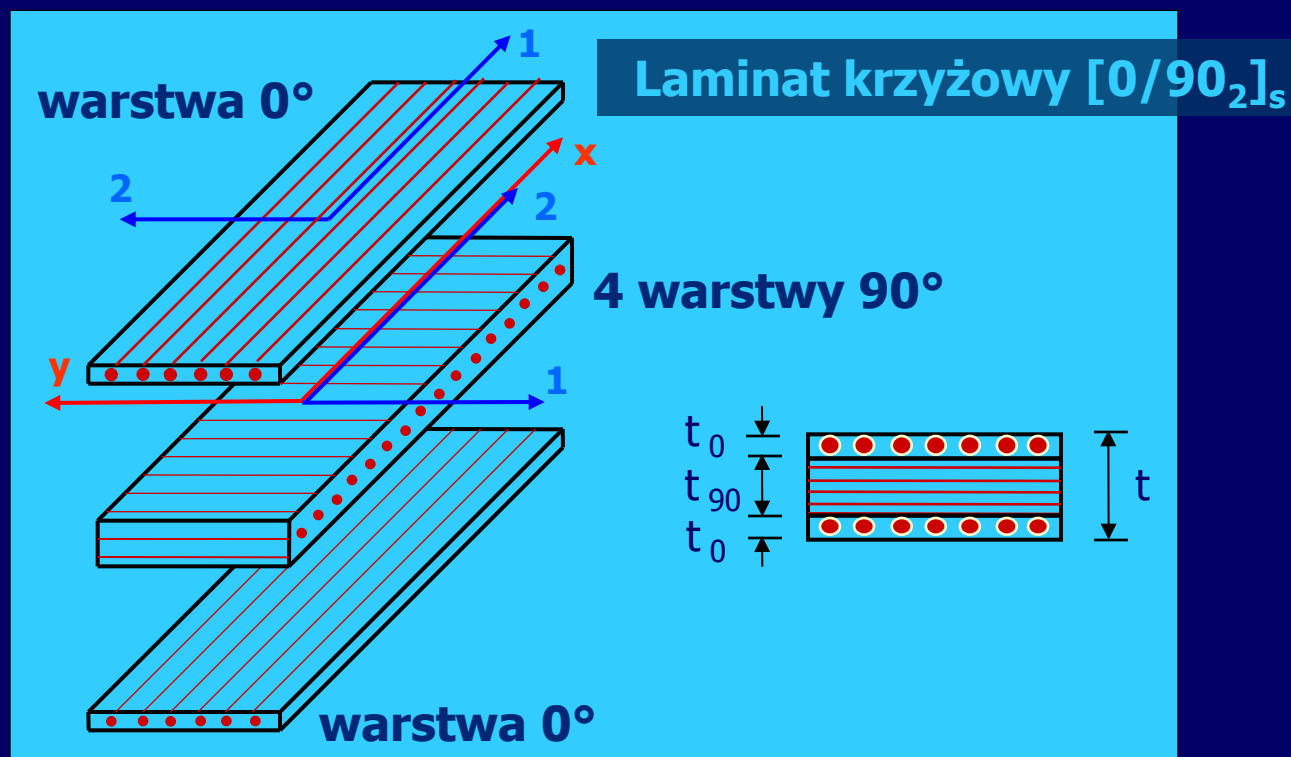
Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

Poziomy makroskopowy





TEMATY Poziomy obserwacji (2.1)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

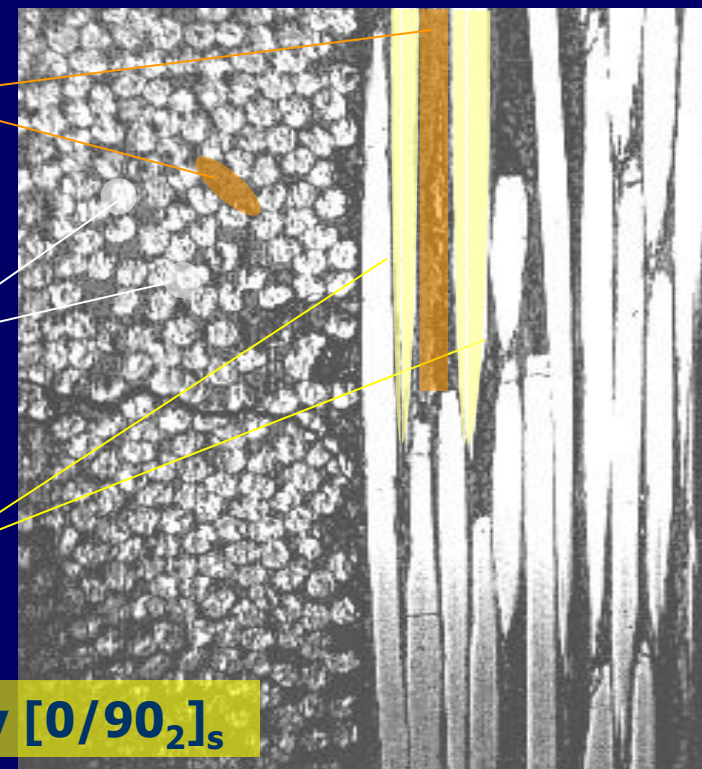
Poziom mikroskopowy

matryca epoksydowa

włókna 90°

włókna 0°

Laminat krzyżowy $[0/90_2]_s$





Model włókien równej wytrzymałości (18)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

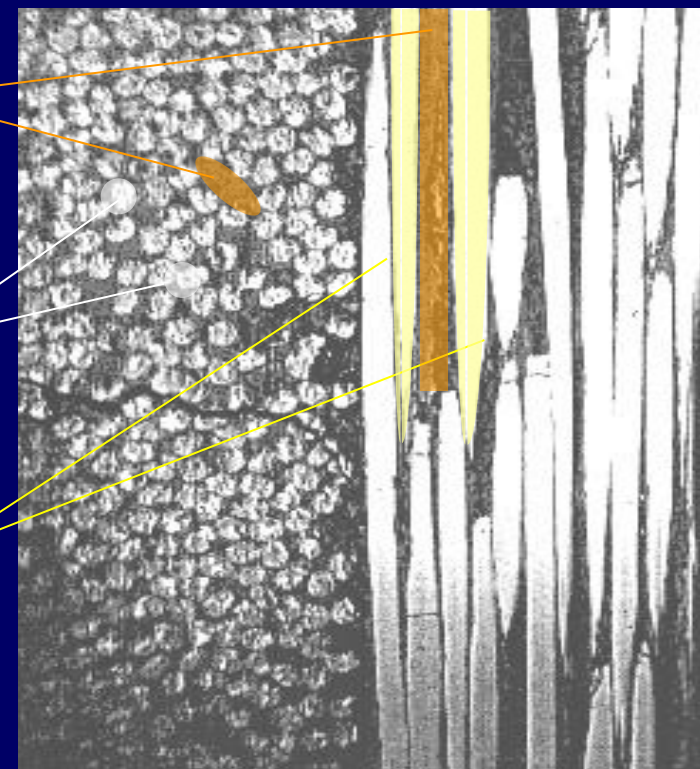
Podsumowanie

Włókna ciągłe w kompozycie

matryca epoksydowa

włókna 90°

włókna 0°



**TEMATY****Model włókien równej wytrzymałości (5.1)****TEMATY****Zniszczenie typu „kruche włókna – ciągliwa matryca”**

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

$$X_t = \begin{cases} X_m(1 - v_f) & \text{dla } 0 \leq v_f \leq v_f^* \\ X_f[v_f + (E_m/E_f)(1 - v_f)] & \text{dla } v_f^* \leq v_f \leq 1 \end{cases}$$



**TEMATY****Model włókien równej wytrzymałości (5.2)****TEMATY****Zniszczenie typu „kruche włókna – ciągliwa matryca”**

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

$$X_{tmin} = \frac{X_f}{1 - (X_f / X_m)(E_m / E_f) + (X_f / X_m)}$$



**TEMATY****Model włókien równej wytrzymałości (5.3)****TEMATY****Zniszczenie typu „kruche włókna – ciągliwa matryca”**

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

$$V_f^{kr} = \frac{(X_m/X_f) - (E_m/E_f)}{1 - (E_m/E_f)}$$



**TEMATY****Model włókien równej wytrzymałości (5.4)****TEMATY****Zniszczenie typu „kruche włókna – ciągliwa matryca”**

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

$$V_f^* = \frac{1 - (X_f/X_m)(E_m/E_f)}{1 - (X_f/X_m)(E_m/E_f) + (X_f/X_m)}$$



**TEMATY****Model włókien równej wytrzymałości (6.1)****TEMATY****Zniszczenie typu „krucha matryca – ciągłe włókna”**

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

$$X_t = \begin{cases} X_m [1 - v_f (1 - E_f / E_m)] & \text{dla } 0 \leq v_f \leq v_f^{**} \\ X_f v_f & \text{dla } v_f^{**} \leq v_f \leq 1 \end{cases}$$





TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (6.2)

Zniszczenie typu „krucha matryca – ciągłe włókna”

$$V_f^{**} = \frac{1}{1 - (E_f/E_m) + (X_f/X_m)}$$





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (6.3)

TEMATY

Zniszczenie typu „krucha matryca – ciągliwe włókna”

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

$$V_f^{kr} = \frac{X_m}{X_f}$$





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (8.1)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

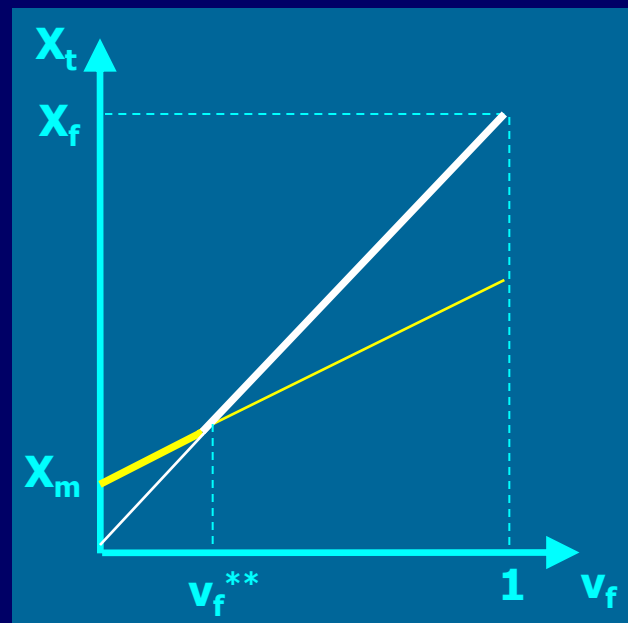
Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściszenie

Podsumowanie

Warunek kruchej matrycy

$$E_f > E_m \quad ; \quad X_f > X_m$$





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (8.2)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

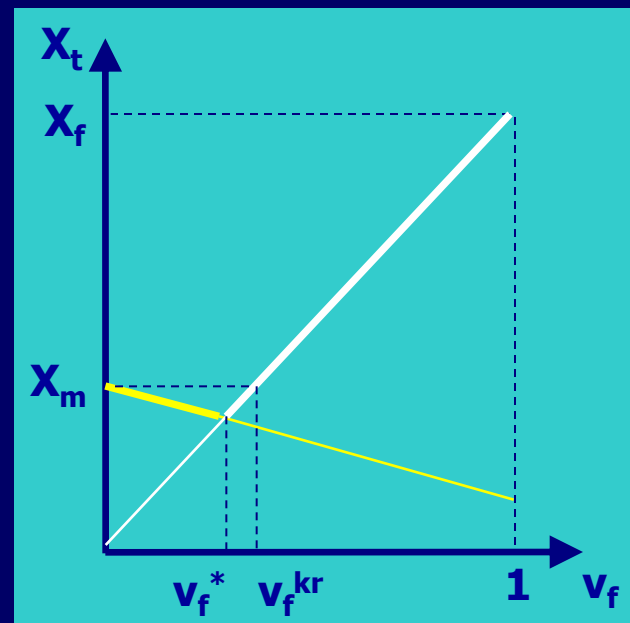
Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściszenie

Podsumowanie

Warunek kruchych włókien

$$E_f > E_m \quad ; \quad X_f > X_m$$





TEMATY

Model włókien równej wytrzymałości (8.3)

TEMATY

Obserwacje dla rzeczywistych kompozytów

$$E_f > E_m \quad ; \quad X_f > X_m$$

Czynniki determinujące analizę

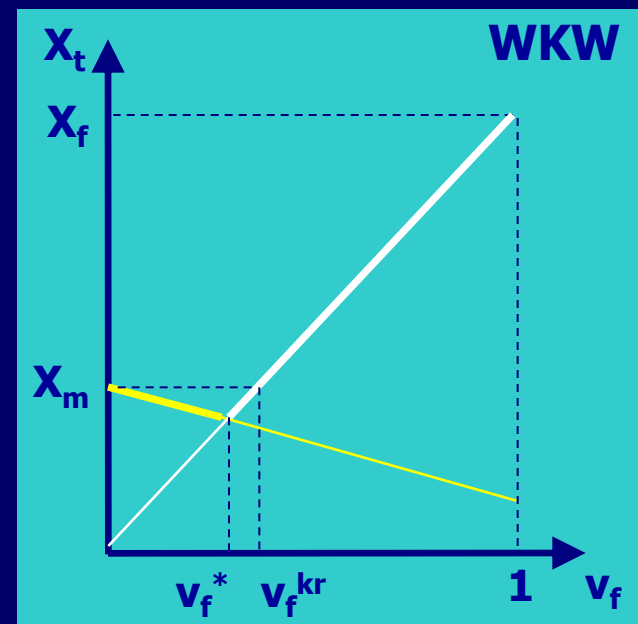
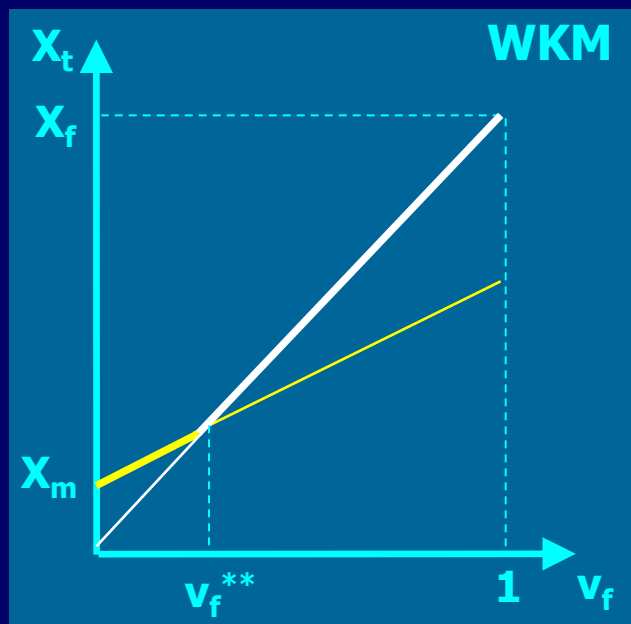
Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie





PODSUMOWANIE (1.1)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

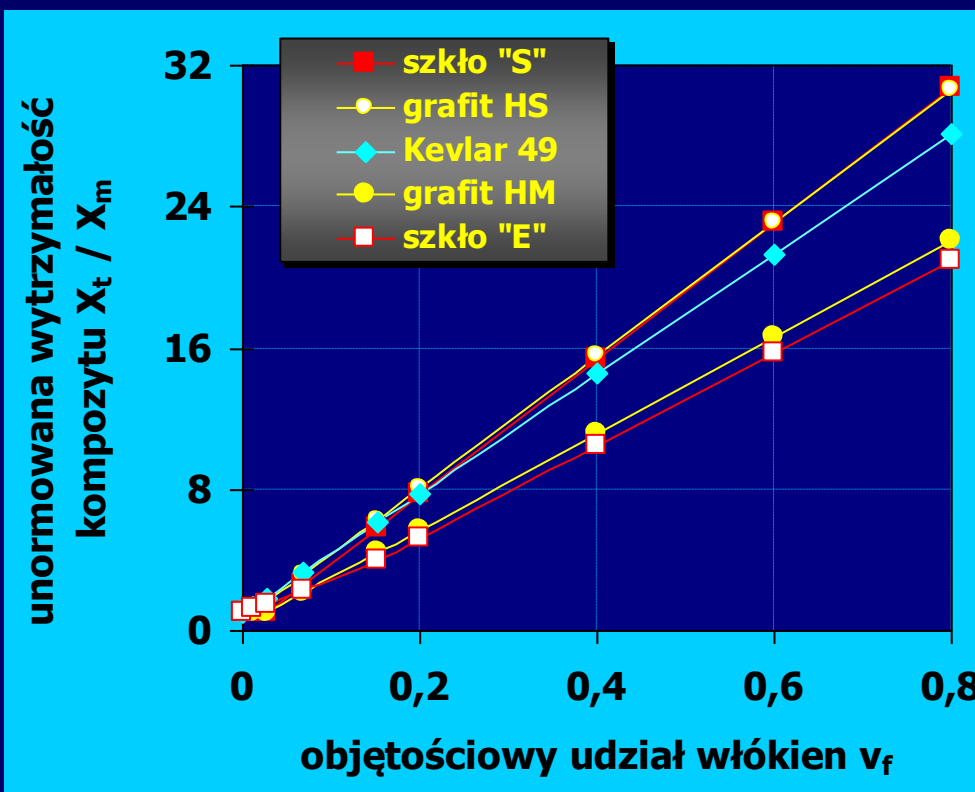
Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

Unormowana wytrzymałość warstwy dla różnych typów włókien



Włókno	X_f / X_m
szkło „S”	38.5
grafit HS	38.2
kevlar 49	34.9
grafit HM	27.5
szkło „E”	26.2



PODSUMOWANIE (2.1)

TEMATY

Czynniki determinujące analizę

Poziomy obserwacji

Podstawowe zagadnienia

Model włókien równej wytrzymałości

Wytrzymałość na ściskanie

Podsumowanie

Wytrzymałości podłużne i moduły sprężystości dla typowych włókien i matrycy epoksydowej

	włókna							matryca
	grafit UHM	szkło „E”	grafit HM	kevlar 49	kevlar 29	grafit HS	szkło „S”	epoxy
$X_{fr} X_m$ [MPa]	1030	1700	1790	2270	2270	2480	2500	65
X_m / X_f	.0633	.0382	.0364	.0287	.0287	.0262	.0260	-
$E_{fr} E_m$ [GPa]	520	72	370	124	83	230	87	3.5
E_m / E_f	.0067	.0485	.0095	.0282	.0422	.0152	.0402	-

