Praktické ukázky z analýz porušování a poškozování kompozitních konstrukcí

Tomáš Kroupa
(Hana Srbová, Jan Krystek, Tomáš Mandys)
ZČU v Plzni

Co uvidíte?

- Projdeme několik málo analýz, ve kterých jsme využili pevnostní kritéria.
- Zaměříme se na aplikace, ve kterých jsou pevnostní kritéria dostatečný nástroj pro posouzení stavu konstrukce.
- Naťukneme použití postupného porušování.
- Okrajově zmíníme poškozování a degradaci materiálových parametrů na případu delaminace.

K čemu to je?

Pevnost kompozitních materiálů je podstatná při dimenzování komponent a struktur, ve kterých jsou tyto materiály zastoupené.

- Chceme vědět „jestli to praskne“.
- Chceme vědět „kdy to praskne“.
- Chceme předejít tomu, aby „to někdy prasklo“.
- Potřebujeme vědět „jak to praská“.

Obsah

Trocha teorie
- Pevnostní kritéria
- Postupné porušování
- Poškozování materiálových vlastností

Trocha praktických ukázek
- Kompozitní lávka
- Kolíkové spoje
- Vertikální korekce TT řídítek

Obsah

Trocha teorie
- Pevnostní kritéria
- Postupné porušování
- Poškozování materiálových vlastností

Trocha praktických ukázek
- Kompozitní lávka
- Kolíkové spoje
- Vertikální korekce TT řídítek

Pevnostní kritéria

- V každém bodě struktury, komponenty, tělesa, materiálu se napěťový stav porovná s jedničkou pomocí jedné nebo více podmínek.
- Pokud není podmínka nerovnosti

$$f\left(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{X}, \boldsymbol{\alpha}\right) = \mathcal{F} < 1 \tag{1}$$

splněna, dojde k porušení.

Napětí $\sigma = \left[\sigma_1, \sigma_2, \ldots\right]^{\mathrm{T}}$

Pevnosti $\mathbf{X} = \left[X^{\mathrm{T}}, X^{\mathrm{C}}, Y^{\mathrm{T}}, Y^{\mathrm{C}}, \ldots\right]^{\mathrm{T}}$

- napětí, při kterých dojde k porušení

Termodyn. veličiny $\boldsymbol{\alpha}$

- například energie nutná pro růst trhliny

Index porušení $\mathcal{F}$

- napovídá „jak daleko jsme od porušení“

Připomenutí

Jednotlivá napětí si ukažme na stránkách *e-funda*.

Pevnosti

$X^{\mathrm{T}}, X^{\mathrm{C}}$

(1, L) – ve směru vláken
(T) – v tahu
(C) – v tlaku

$Y^{\mathrm{T}}, Y^{\mathrm{C}}$

(2, T) – příčně na vlákna
(T) – v tahu
(C) – v tlaku

$Z^{\mathrm{T}}, Z^{\mathrm{C}}$

(3, T′, Z) – příčně na vrstvu
(T) – v tahu
(C) – v tlaku

$S^{\mathrm{L}}, S_{12}, S_{\mathrm{LT}}$

smyková pevnost v rovině kompozitu

S_{13}, S_{23}

smykové pevnosti v příslušných napěťových rovinách

Maximální napětí 2D a 3D

Každé napětí má 1 podmínku a z každé řádky získáme 1 index porušení.

$$-\frac{\sigma_1}{X^{\mathrm{C}}} \leq 1, \quad \frac{\sigma_1}{X^{\mathrm{T}}} \leq 1 \tag{2}$$

$$-\frac{\sigma_2}{Y^{\mathrm{C}}} \leq 1, \quad \frac{\sigma_2}{Y^{\mathrm{T}}} \leq 1 \tag{3}$$

$$\frac{S_{12}}{|\tau_{12}|} \leq 1 \tag{4}$$

$$\tag{5}$$

Pro 3D případ navíc

$$-\frac{\sigma_3}{Z^{\mathrm{C}}} \leq 1, \quad \frac{\sigma_3}{Z^{\mathrm{T}}} \leq 1 \tag{6}$$

$$\frac{S_{13}}{|\tau_{13}|} \leq 1 \tag{7}$$

$$\frac{S_{23}}{|\tau_{23}|} \leq 1 \tag{8}$$

Tsai-Wu 2D

Tento obecný zápis[1]

$$f_i\sigma_i + f_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1, \quad i,j = 1,2,6 \tag{9}$$

lze pro rovinnou napjatost zapsat ve tvaru

$$\begin{aligned}\left(\frac{1}{X^{\mathrm{T}}} - \frac{1}{X^{\mathrm{C}}}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y^{\mathrm{T}}} - \frac{1}{Y^{\mathrm{C}}}\right)\sigma_2 + \ldots \\ \ldots + \frac{\sigma_1^2}{X^{\mathrm{T}}X^{\mathrm{C}}} + \frac{\sigma_2^2}{Y^{\mathrm{T}}Y^{\mathrm{C}}} + \ldots \\ \ldots + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \ldots \\ \ldots + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1.\end{aligned} \tag{10}$$

Tenzor f_{12} lze určit s použitím ekvibiaxiálních testů, odhadnout, nebo vynulovat.

[1] Poznámka: $\sigma_6 = \tau_{12}$

Tsai-Wu 3D

Tento obecný zápis[2]

$$f_i\sigma_i + f_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1, \quad i,j = 1,2,3,4,5,6 \tag{11}$$

lze pro prostorovou napjatost zapsat ve tvaru

$$\begin{aligned}\left(\frac{1}{X^{\mathrm{T}}} - \frac{1}{X^{\mathrm{C}}}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y^{\mathrm{T}}} - \frac{1}{Y^{\mathrm{C}}}\right)\sigma_2 + \left(\frac{1}{Z^{\mathrm{T}}} - \frac{1}{Z^{\mathrm{C}}}\right)\sigma_3 + \ldots \\ \ldots + \frac{\sigma_1^2}{X^{\mathrm{T}}X^{\mathrm{C}}} + \frac{\sigma_2^2}{Y^{\mathrm{T}}Y^{\mathrm{C}}} + \frac{\sigma_3^2}{Z^{\mathrm{T}}Z^{\mathrm{C}}} + \ldots \\ \ldots + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} + \ldots \\ \ldots + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2f_{13}\sigma_1\sigma_3 + 2f_{23}\sigma_2\sigma_3 = 1.\end{aligned} \tag{12}$$

Tenzory f_{12}, f_{13}, f_{23} lze určit s použitím ekvibiaxiálních testů, odhadnout, nebo vynulovat.

[2] Poznámka: $\sigma_4 = \tau_{23}$, $\sigma_5 = \tau_{13}$ a $\sigma_6 = \tau_{12}$

Hashin 2D

- Porušení vláken v tahu při $\sigma_1 \geq 0$

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^{\mathrm{T}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1 \tag{13}$$

- Porušení vláken v tlaku při $\sigma_1 < 0$

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^{\mathrm{C}}}\right)^2 = 1 \tag{14}$$

- Porušení matrice v tahu při $\sigma_2 \geq 0$

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y^{\mathrm{T}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1 \tag{15}$$

- Porušení matrice v tlaku při $\sigma_2 < 0$

$$\left[\left(\frac{Y^{\mathrm{C}}}{2S_{12}}\right) - 1\right]\left(\frac{\sigma_2}{Y^{\mathrm{C}}}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 = 1 \tag{16}$$

Hashin 3D

- Porušení vláken v tahu při $\sigma_1 \geq 0$

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^{\mathrm{T}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 = 1 \tag{17}$$

- Porušení vláken v tlaku při $\sigma_1 < 0$

$$\left(\frac{\sigma_1}{X^{\mathrm{C}}}\right)^2 = 1 \tag{18}$$

- Porušení matrice v tahu při $\sigma_2 \geq 0$

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y^{\mathrm{T}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 = 1 \tag{19}$$

- Porušení matrice v tlaku při $\sigma_2 < 0$

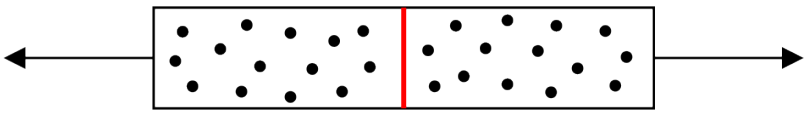
$$\left[\left(\frac{Y^{\mathrm{C}}}{2S_{12}}\right) - 1\right]\left(\frac{\sigma_2}{Y^{\mathrm{C}}}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 = 1 \tag{20}$$

LaRC04

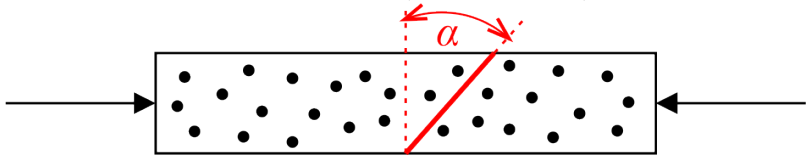
Matrice

LaRC #1, $\sigma_2 \geq 0$	$\mathcal{F}_{\mathrm{M}} = (1-g)\left(\frac{\sigma_2}{Y^{\mathrm{T}}}\right) + g\left(\frac{\sigma_2}{Y^{\mathrm{T}}}\right)^2 + \kappa$
LaRC #1, první přiblížení	$\mathcal{F}_{\mathrm{M}} = \left(\frac{\sigma_2}{Y^{\mathrm{T}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^{\mathrm{L}}}\right)^2$
LaRC #2, $\sigma_2 < 0$ nebo $\sigma_3 < 0$; $\sigma_1 \geq -Y^{\mathrm{C}}$	$\mathcal{F}_{\mathrm{M}} = \left(\frac{\tau^{\mathrm{T}}}{S^{\mathrm{T}} - \eta^{\mathrm{T}}\sigma_{\mathrm{n}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau^{\mathrm{T}}}{S^{\mathrm{L}} - \eta^{\mathrm{L}}\sigma_{\mathrm{n}}}\right)^2$
LaRC #5, $\sigma_2 < 0$ nebo $\sigma_3 < 0$; $\sigma_1 < -Y^{\mathrm{C}}$	$\mathcal{F}_{\mathrm{M}} = \left(\frac{\tau^{\mathrm{Tm}}}{S^{\mathrm{T}} - \eta^{\mathrm{T}}\sigma_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau^{\mathrm{Lm}}}{S^{\mathrm{L}} - \eta^{\mathrm{L}}\sigma_{\mathrm{n}}^{\mathrm{m}}}\right)^2$

LaRC #1



LaRC #2 (LaRC #5)



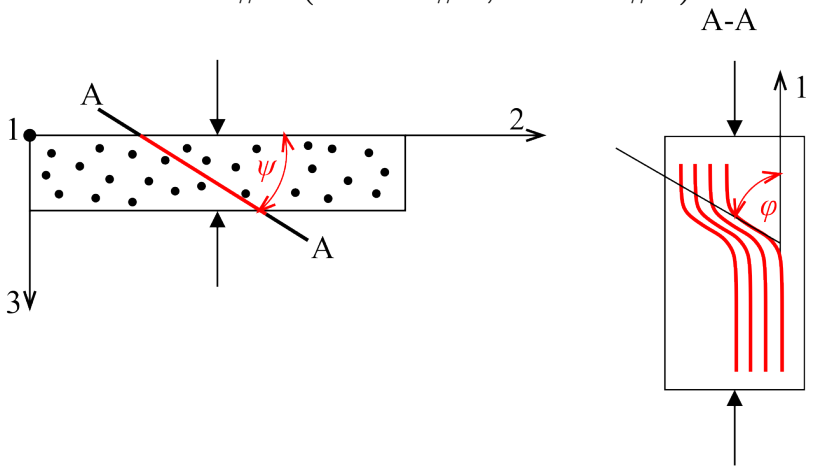
LaRC04

Vlákna

LaRC #3, $\sigma_1 \geq 0$	$\mathcal{F}_{\mathrm{F}} = \dfrac{\sigma_1}{X^{\mathrm{T}}}$
LaRC #4, $\sigma_1 < 0$; $\sigma_{2\mathrm{m}2\mathrm{m}} < 0$	$\mathcal{F}_{\mathrm{F}} = \left(\dfrac{\tau_{1\mathrm{m}2\mathrm{m}}}{S^{\mathrm{L}} - \eta^{\mathrm{L}} \sigma_{2\mathrm{m}2\mathrm{m}}} \right)^2$

LaRC #3

LaRC #4 (LaRC #5, LaRC #6)



LaRC04

Mixovaný mód

- #4 a #5 jsou také mixované, ale kdo ví, jak to autoři mysleli. ☺
- experimenty pravděpodobně potvrzují, že se roztrhá to i to.

LaRC #6, $\sigma_1 < 0$; $\sigma_{2m2m} \geq 0$	$\mathcal{F}_{FM} = (1-g)\left(\frac{\sigma_{2m2m}}{Y^T}\right) + g\left(\frac{\sigma_{2m2m}}{Y^T}\right)^2 + \kappa$
LaRC #6, první přiblížení	$\mathcal{F}_{FM} = \left(\frac{\sigma_{2m2m}}{Y^T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{1m2m}}{S^L}\right)^2$

- Pro rovinnou napjatost lze použít stejné podmínky, jen některá napětí budou nulová.
- V některých případech se hledá úhel α roviny, v níž dojde k porušení, iteračně.

Obsah

Trocha teorie
- Pevnostní kritéria
- Postupné porušování
- Poškozování materiálových vlastností

Trocha praktických ukázek
- Kompozitní lávka
- Kolíkové spoje
- Vertikální korekce TT řídítek

Proč postupné porušování?

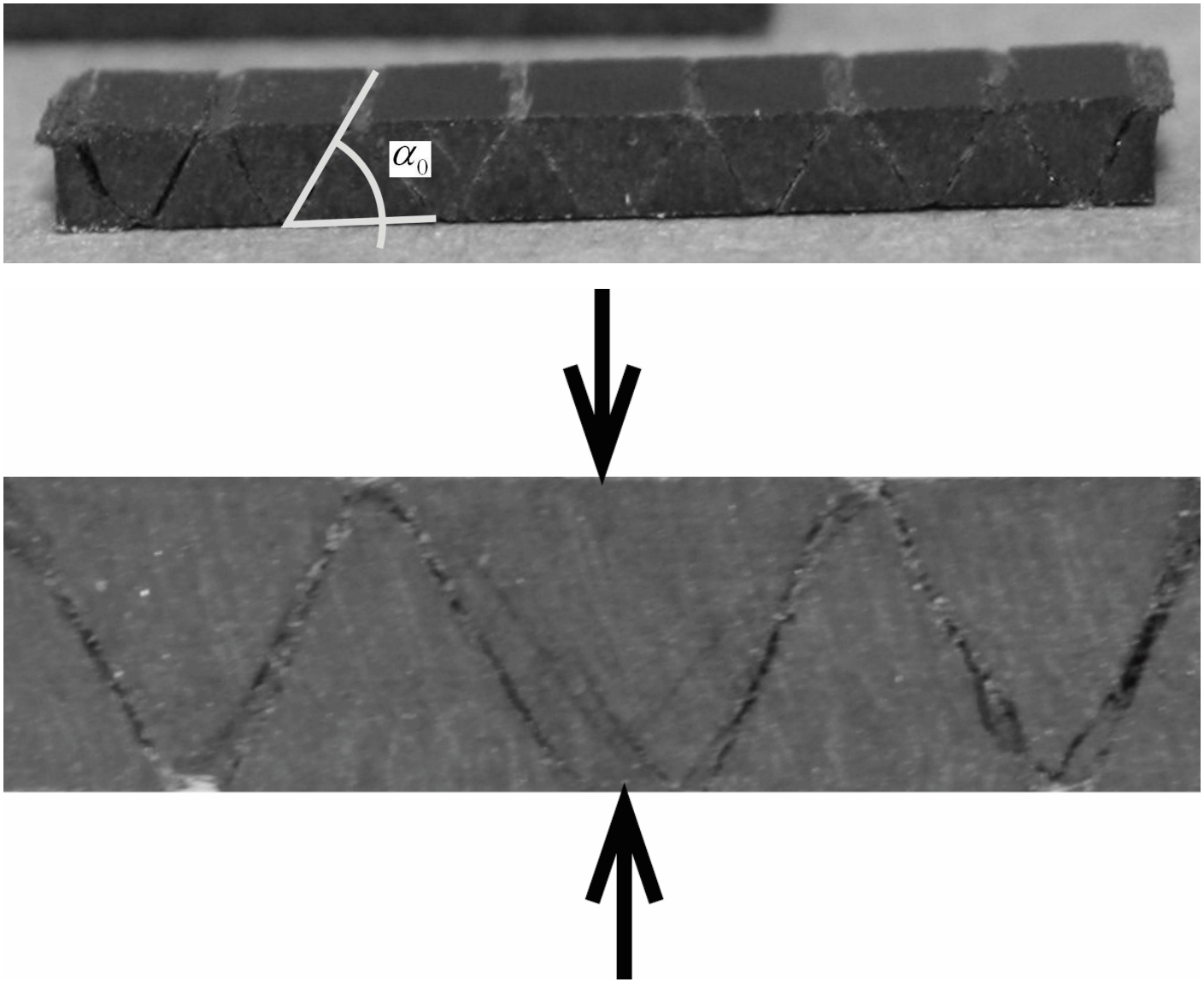
- Pokud pouhé rozhodnutí, zda je struktura bezpečná, nestačí.
- Pokud je nutné vědět, jakým způsobem se materiál porušuje.
- Pokud je dobré znát zbytkovou pevnost.
  - například u laminátu s porušenými vrstvami
- Pokud materiál praská křehce.

Princip

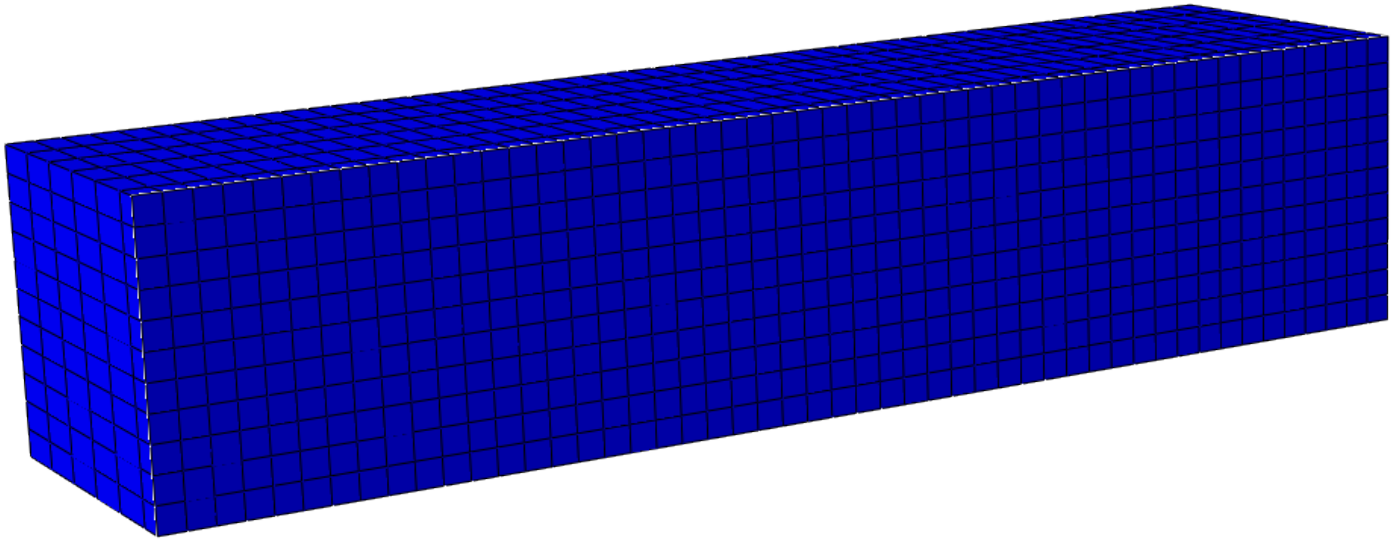
$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1(1-d_f)} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_2(1-d_m)} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_3(1-d_m)} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{23}(1-d_m)} & 0 & 0 \\ & \text{sym.} & & & \frac{1}{G_{13}(1-d_m)} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}(1-d_m)} \end{bmatrix} \tag{21}$$

- Existuje neomezené množství způsobů, jak zvolit model $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon}$ nebo $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S}\boldsymbol{\sigma}$.
- Obecně jsou d_f a d_m závislé na napěťovém stavu nebo energii nebo deformačním stavu nebo ...
- Vztah mezi d_i a veličinou, na níž je d_i závislé, je pro postupné porušování skoková funkce.
- Lze využít například i nelineární vztah ve smyku atd.
- V následující ukázce je použito kritérium Hashin.

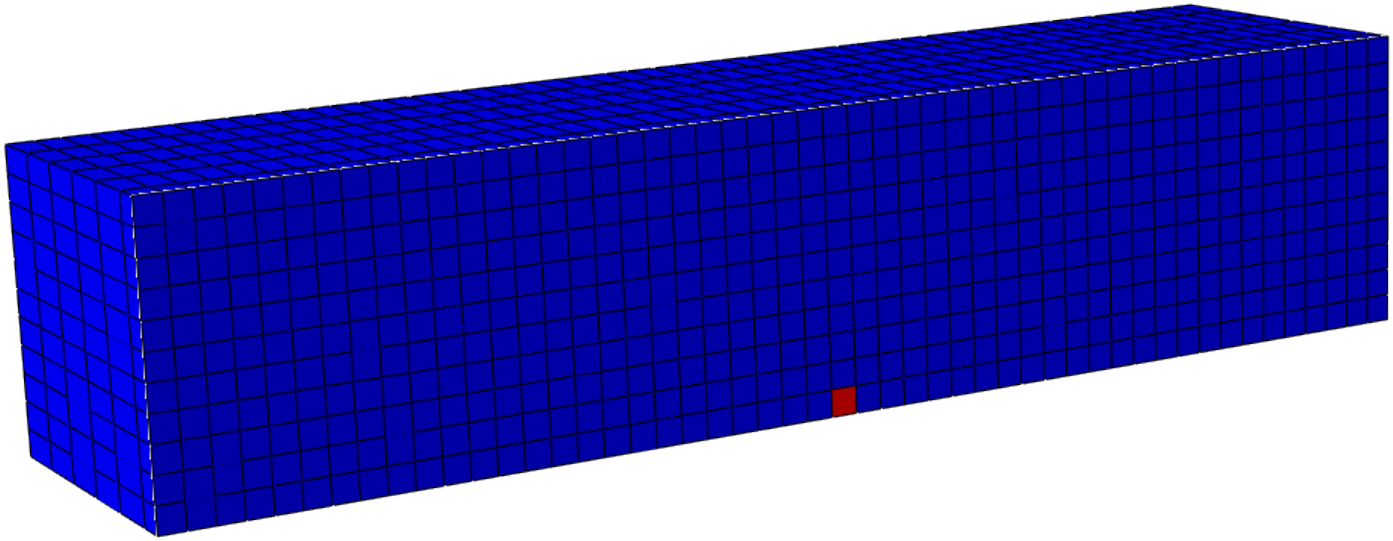
Tlaková zkouška



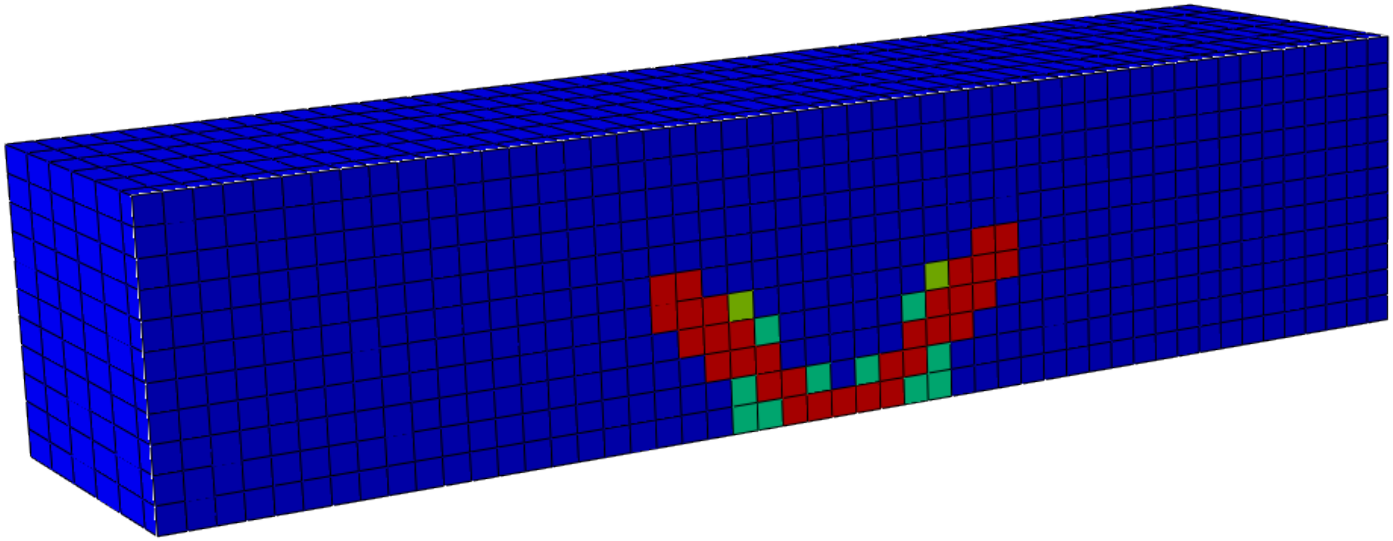
Tlaková zkouška



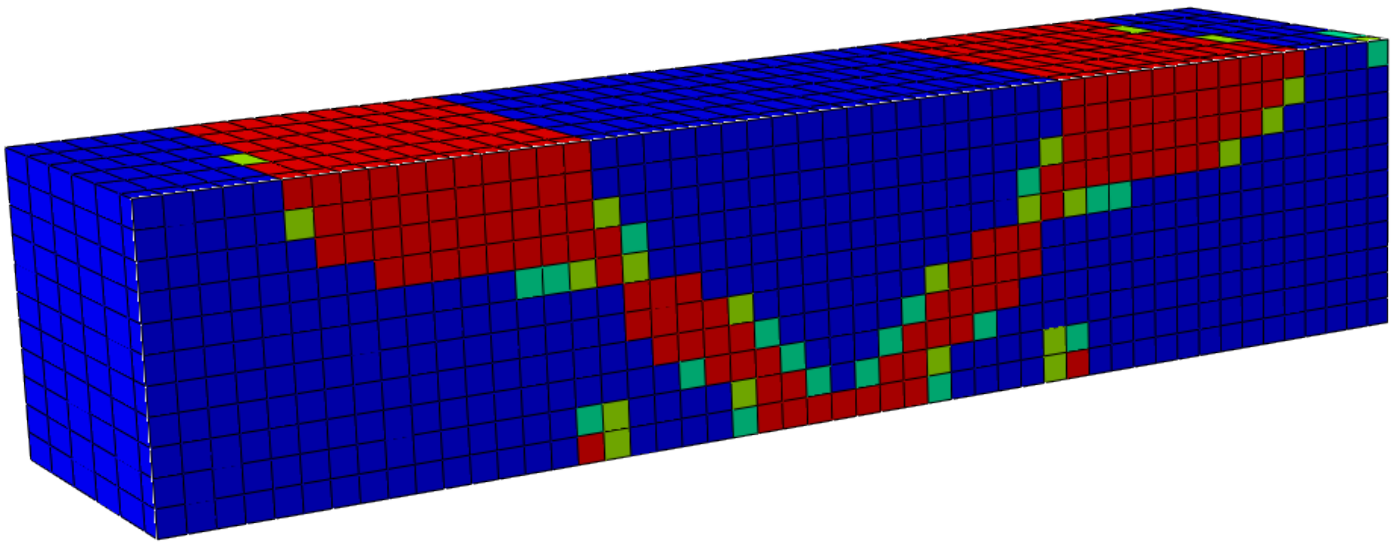
Tlaková zkouška



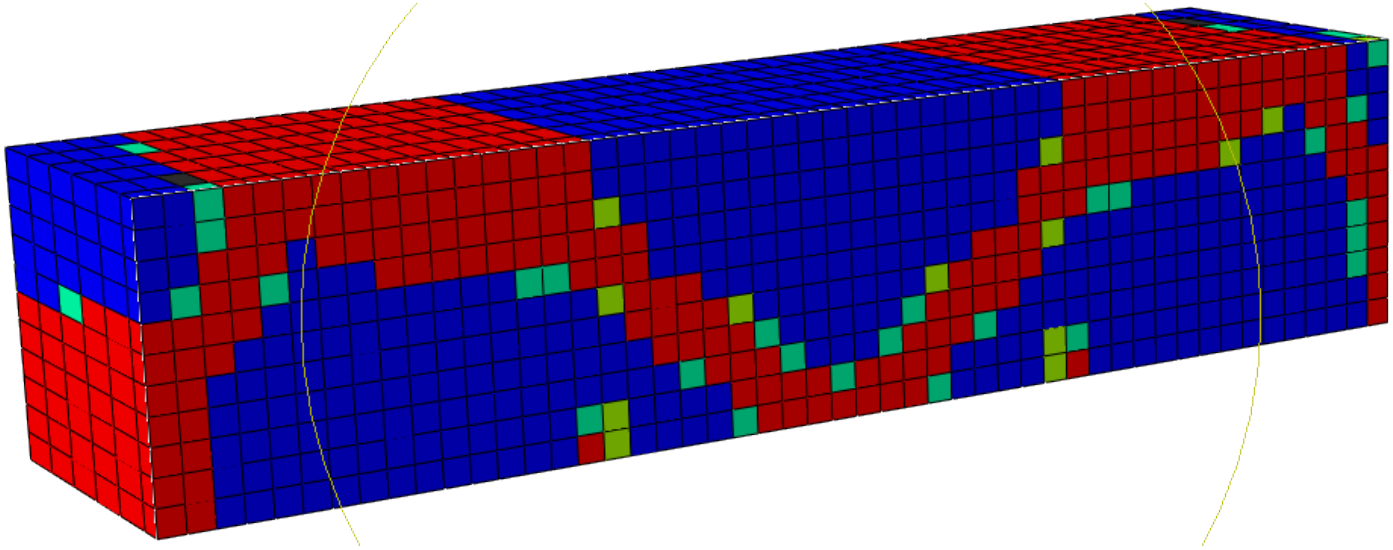
Tlaková zkouška



Tlaková zkouška



Tlaková zkouška



Obsah

Trocha teorie
- Pevnostní kritéria
- Postupné porušování
- Poškozování materiálových vlastností

Trocha praktických ukázek
- Kompozitní lávka
- Kolíkové spoje
- Vertikální korekce TT řídítek

Princip

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1(1-d_{11})} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_2(1-d_{22})} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_3(1-d_{33})} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{23}(1-d_{23})} & 0 & 0 \\ & \text{sym.} & & & \frac{1}{G_{13}(1-d_{13})} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}(1-d_{12})} \end{bmatrix} \tag{22}$$

- Ukázka
  - podobný model jako při porušování
- Rozdíl
  - Při modelování poškozování materiálových parametrů (v tomto případě modulů pružnosti) jsou d_i komplikovanější funkce energie, deformace, napětí, ...
- Při používání ještě komplikovanějších modelů (plasticita, viskoelasticita, atd.) se opět meze nekladou.

Jednoosý případ (pro představu)

Helmholtzova volná energie na jednotku hmotnosti:

$$\begin{aligned} \psi &= \psi\left(\varepsilon^{\mathrm{E}}, D, B, \beta\right) = \psi^{\mathrm{E}} + \psi^{\mathrm{D}} \\ &= \frac{1}{\rho}\left\{\frac{1}{2}E\left(1-D\right)\left(\varepsilon^{\mathrm{E}}\right)^2 + \int_0^{\beta} B\left(b\right) db\right\} \end{aligned} \tag{23}$$

Termodynamické veličiny:

$$\begin{aligned} \sigma &= \rho\frac{\partial\psi}{\partial\varepsilon^{\mathrm{E}}} = E\left(1-D\right)\varepsilon^{\mathrm{E}} \\ Y &= -\rho\frac{\partial\psi}{\partial D} = \frac{1}{2}E\left(\varepsilon^{\mathrm{E}}\right)^2 \\ B &= \rho\frac{\partial\psi}{\partial\beta} = B\left(\beta\right) \end{aligned} \tag{24}$$

Funkce poškození[3]:

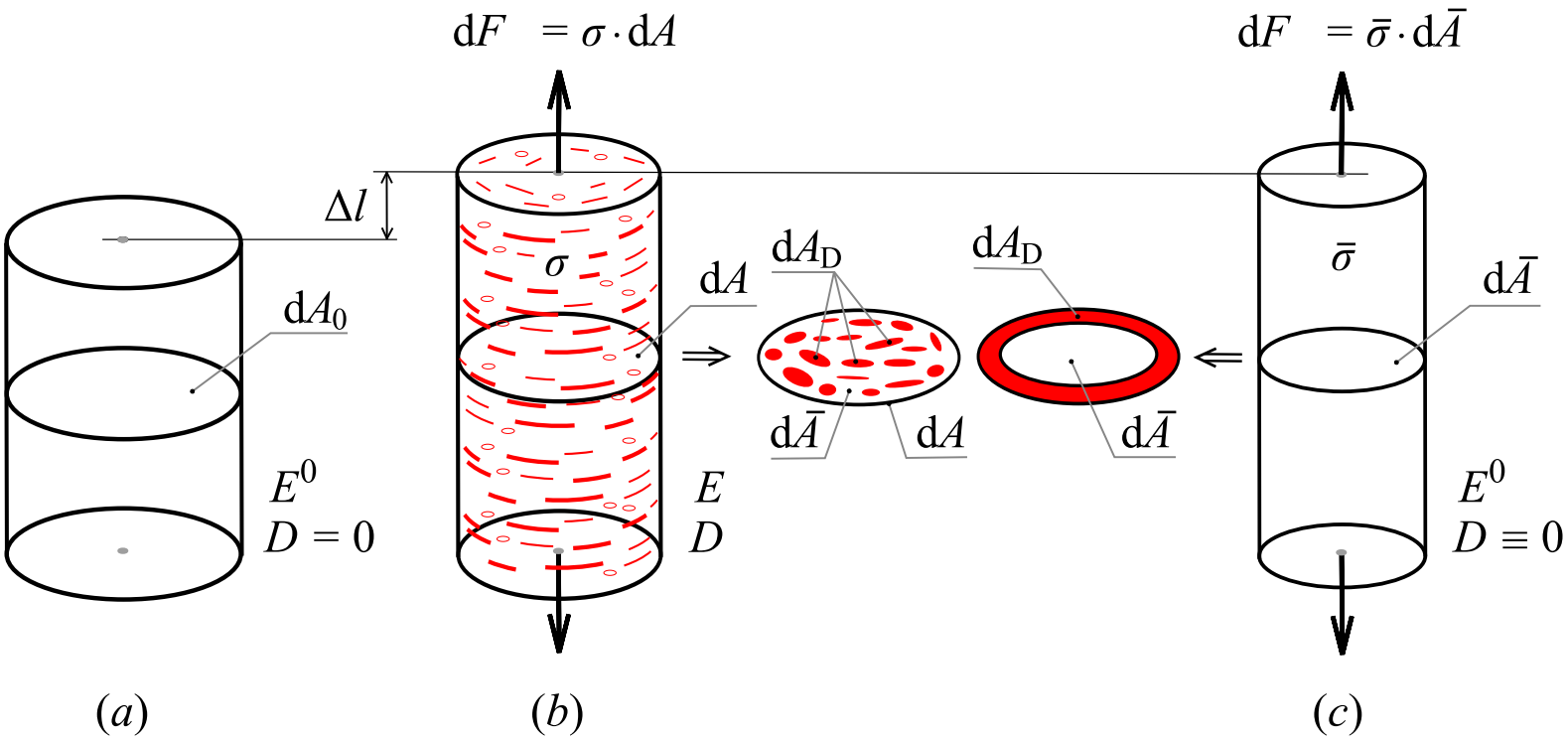
$$F^{\mathrm{D}} = Y_{\mathrm{red}} - \left(B_0 + B\left(\beta\right)\right) \leq 0 \tag{25}$$

[3] Při rozumném způsobu navržení modelu bude $\beta = D$.

Jednoosý případ (pro představu)

$$D = \frac{\mathrm{d}A_\mathrm{D}}{\mathrm{d}A} = 1 - \frac{\mathrm{d}\bar{A}}{\mathrm{d}A} \qquad (26)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} = E\varepsilon^\mathrm{E} \qquad (27)$$



Jednoosý případ (pro představu)

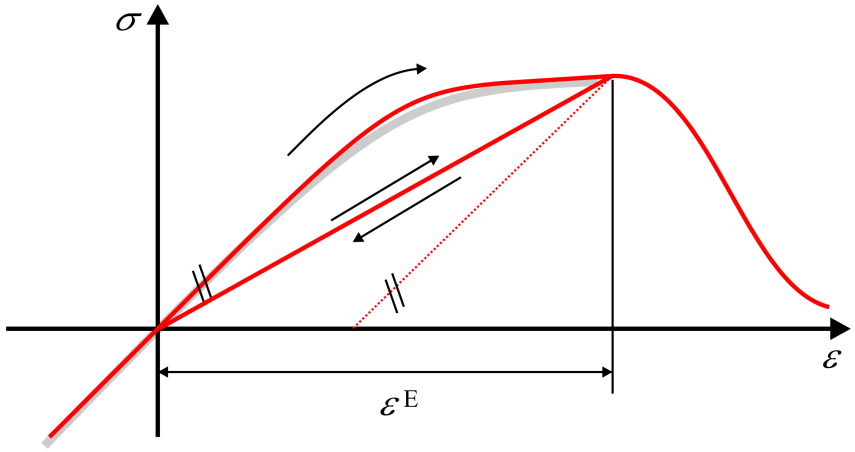
Faktor poškození D

- u kompozitů obvykle závislý na ε^{E}

$$D = D\left(\max_t \left\{\varepsilon^{\mathrm{E}}\right\}\right) \tag{28}$$

nebo celkové deformaci nebo energii ekvivalentního stavu.

- Cílem je, aby se chování modelu přiblížilo realitě.
- Pokud zcela odlehčíme, nezůstanou žádné zbytkové deformace.



Jiné chování v tahu a tlaku, pro každý směr jiné poškození, atd.

- U kohezivního modelu se (například rozhraní vrstev) uvažuje vztah

$$\tau = k\delta. \tag{29}$$

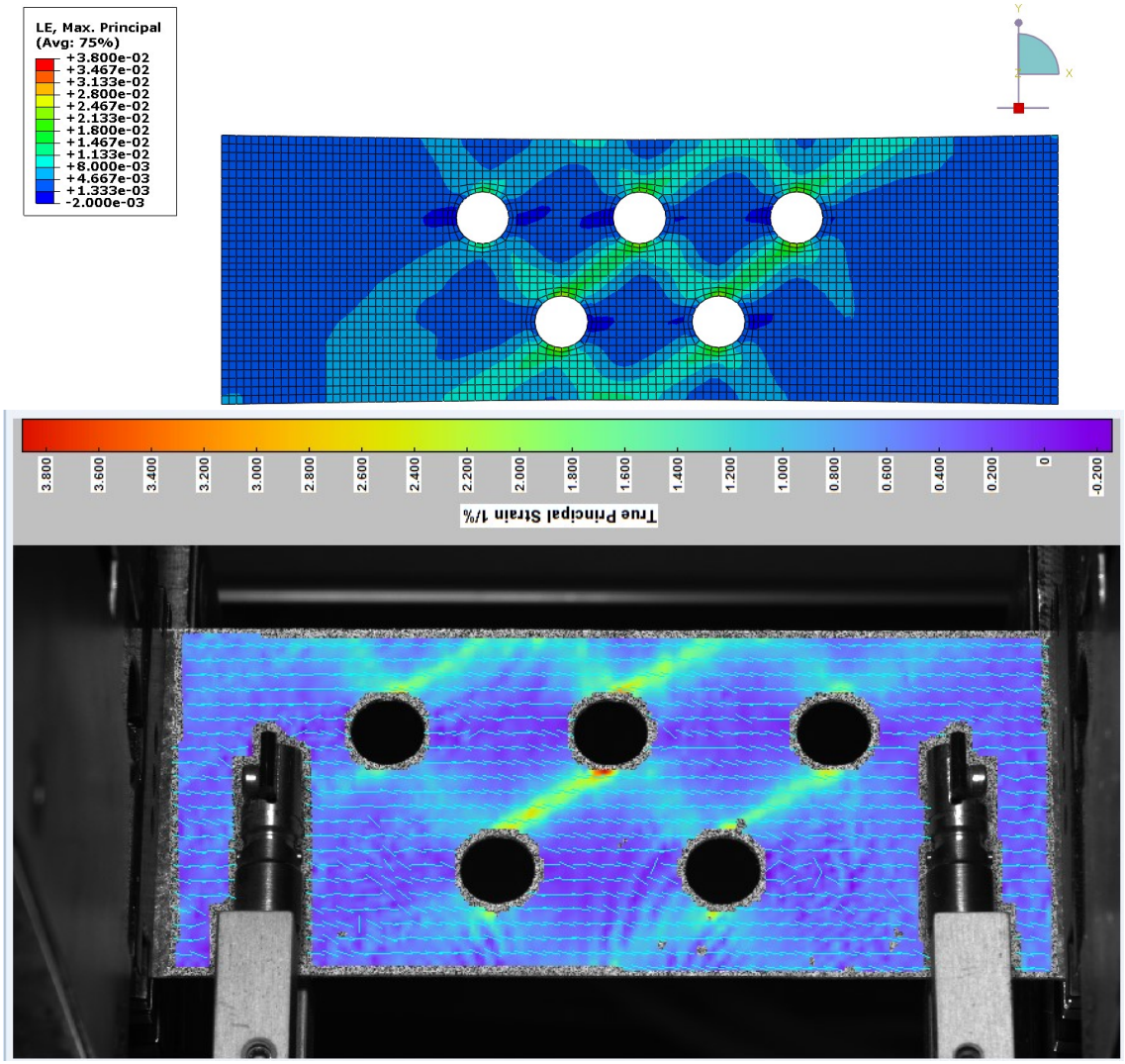
Tkaninový kompozit

Lze modelovat leccos. ☺

Ukázka
- tkaninový kompozit se skleněnými vlákny a epoxidovou pryskyřicí
- model s plasticitou
- porovnány hlavní deformace
- tahová zkouška děrovaných pásků se sklonem materiálové osnovy vzhledem k zatěžovací síle 30°
- D_{ij} závislé na $\varepsilon_{ij}^{\mathrm{E}}$

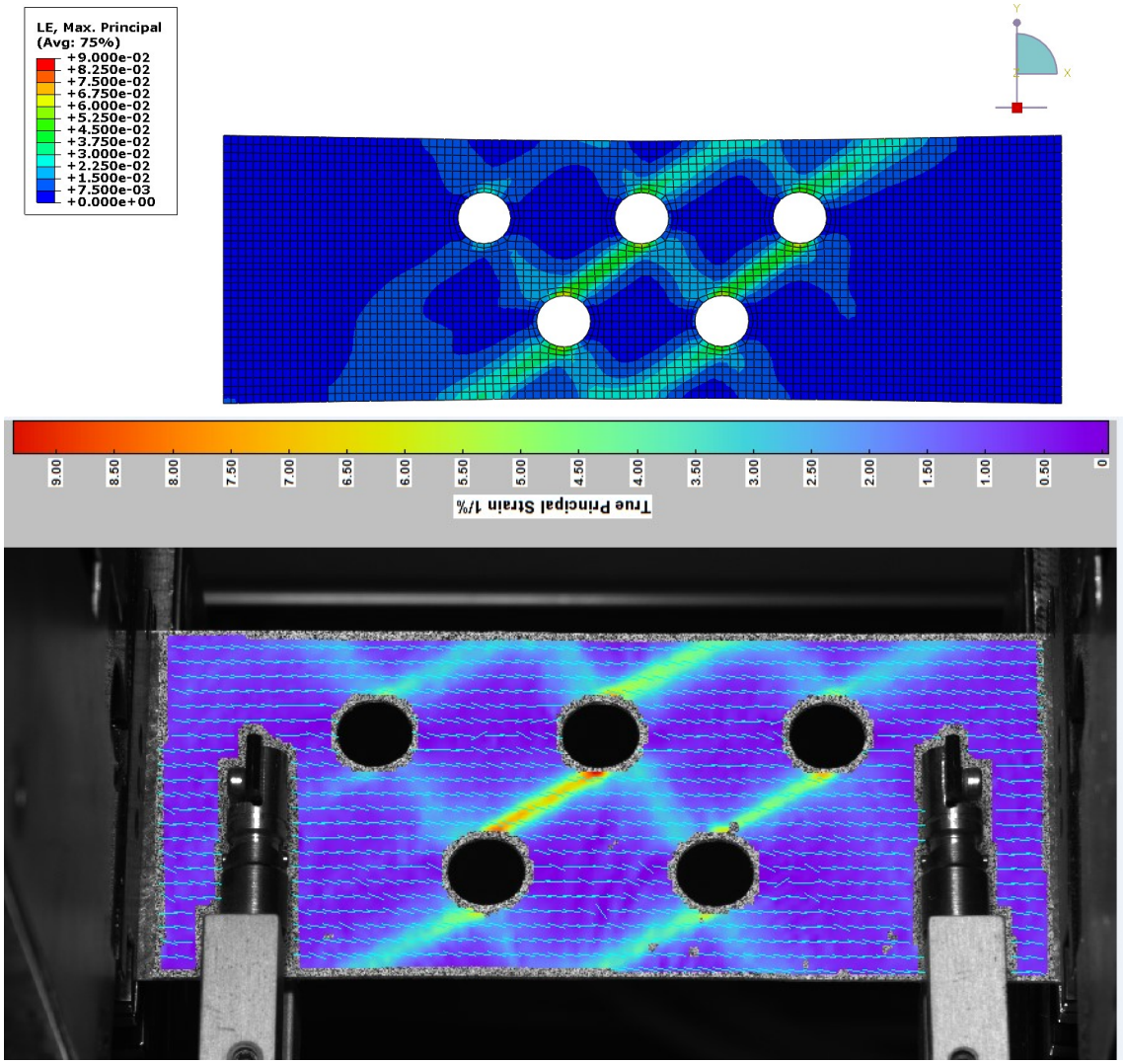
Tkaninový kompozit

Síla 2000 N



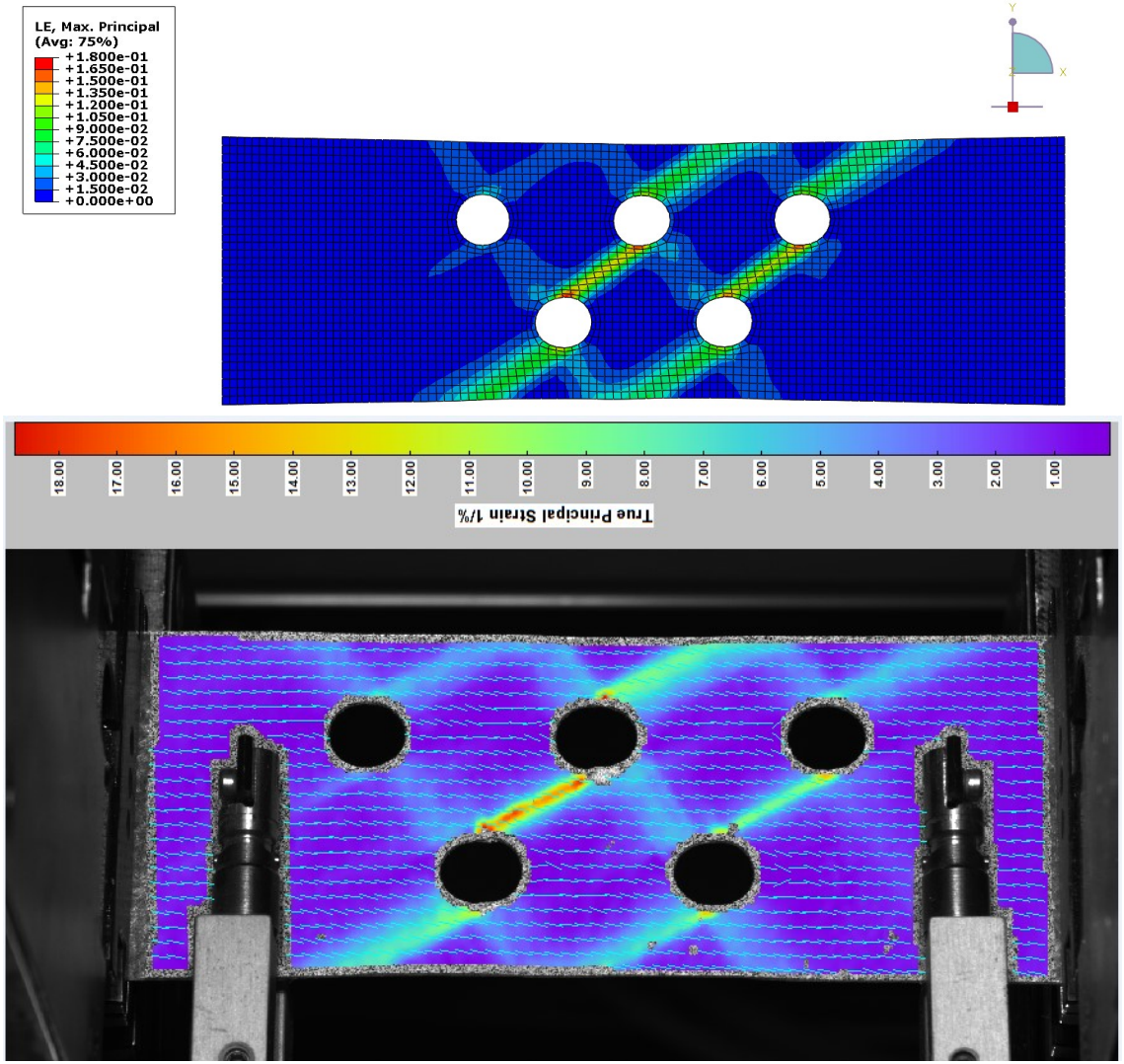
Tkaninový kompozit

Síla 2600 N



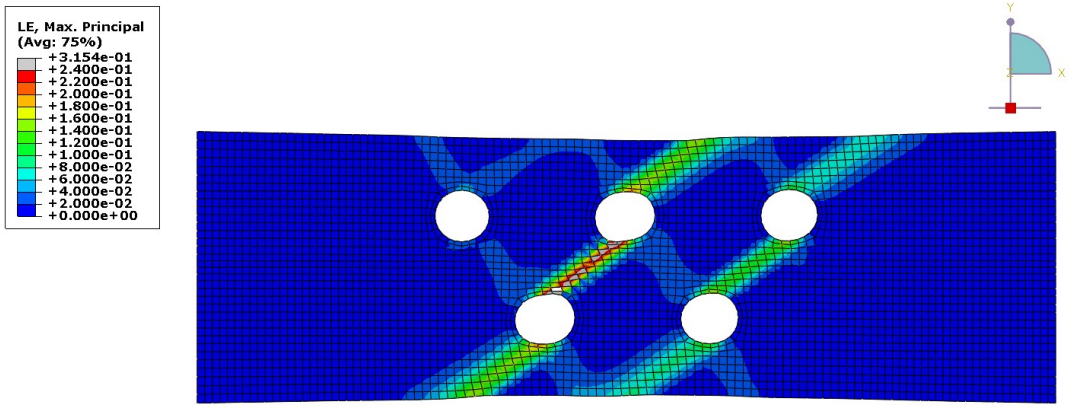
Tkaninový kompozit

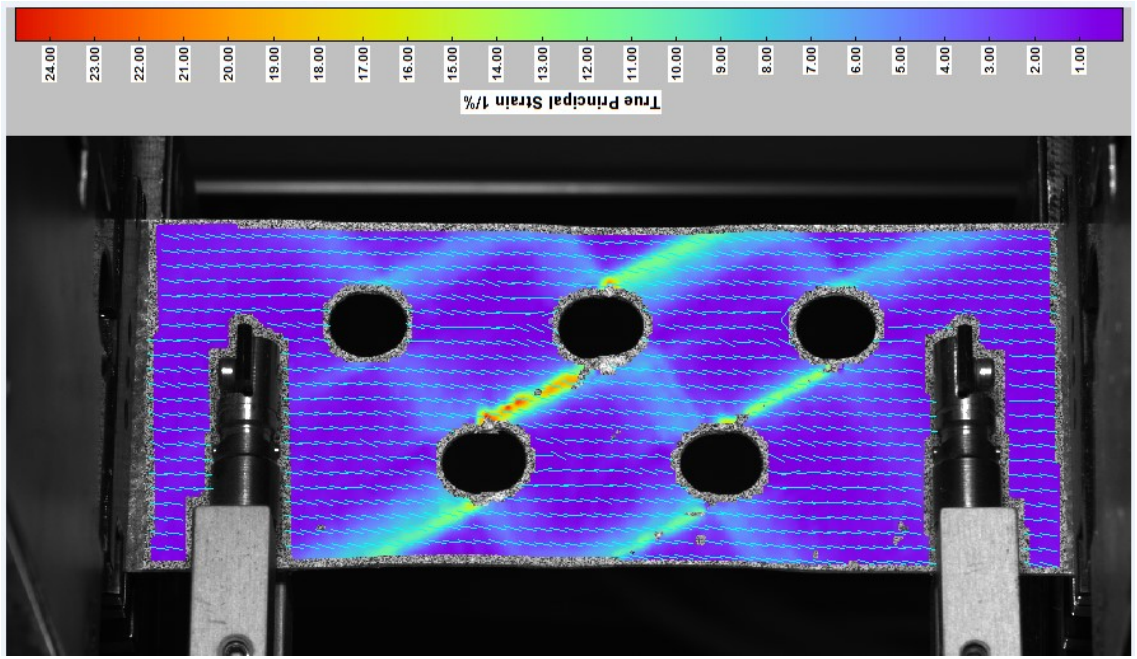
Síla 3000 N



Tkaninový kompozit

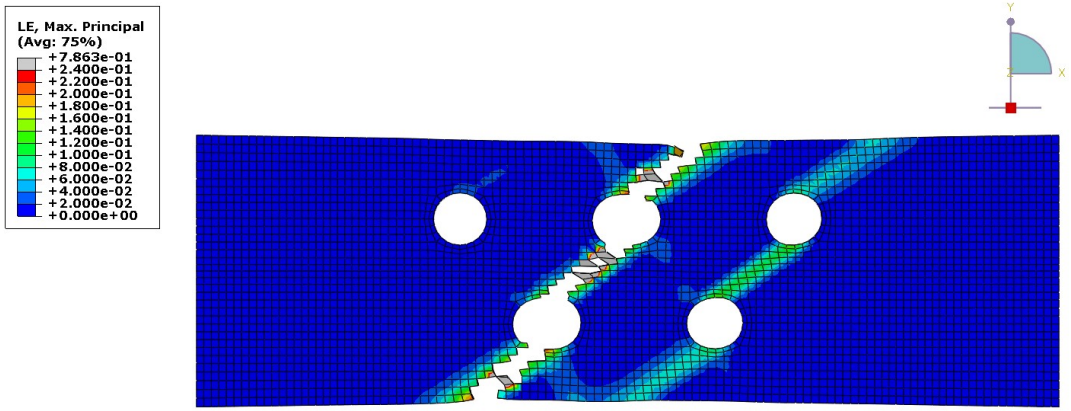
Posuv 3.0 mm

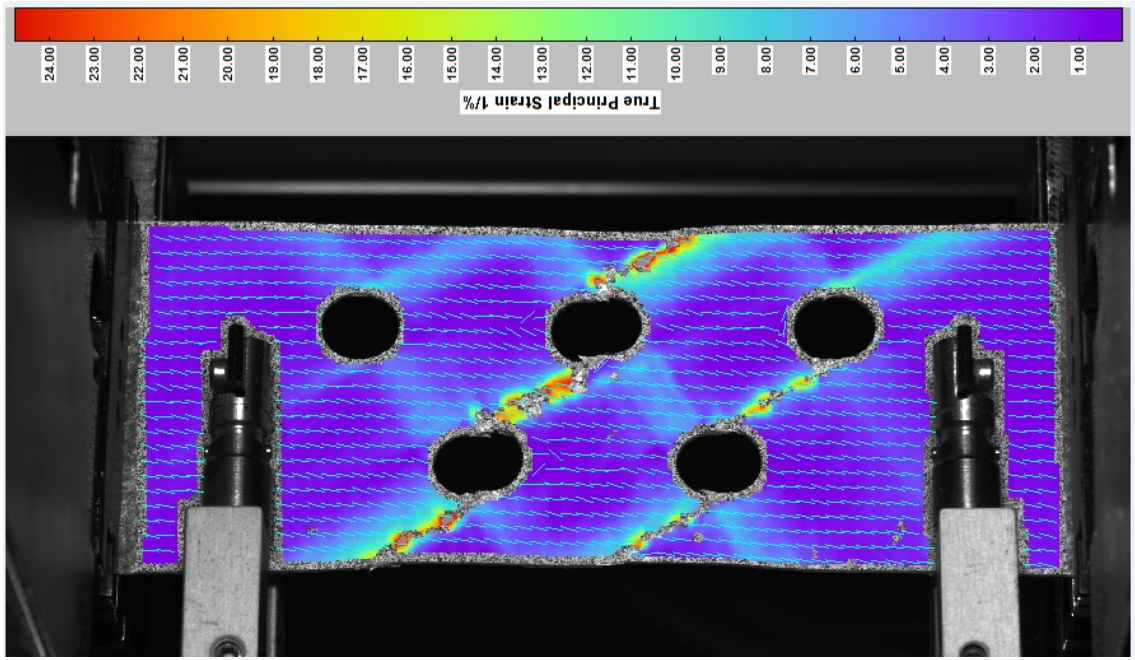




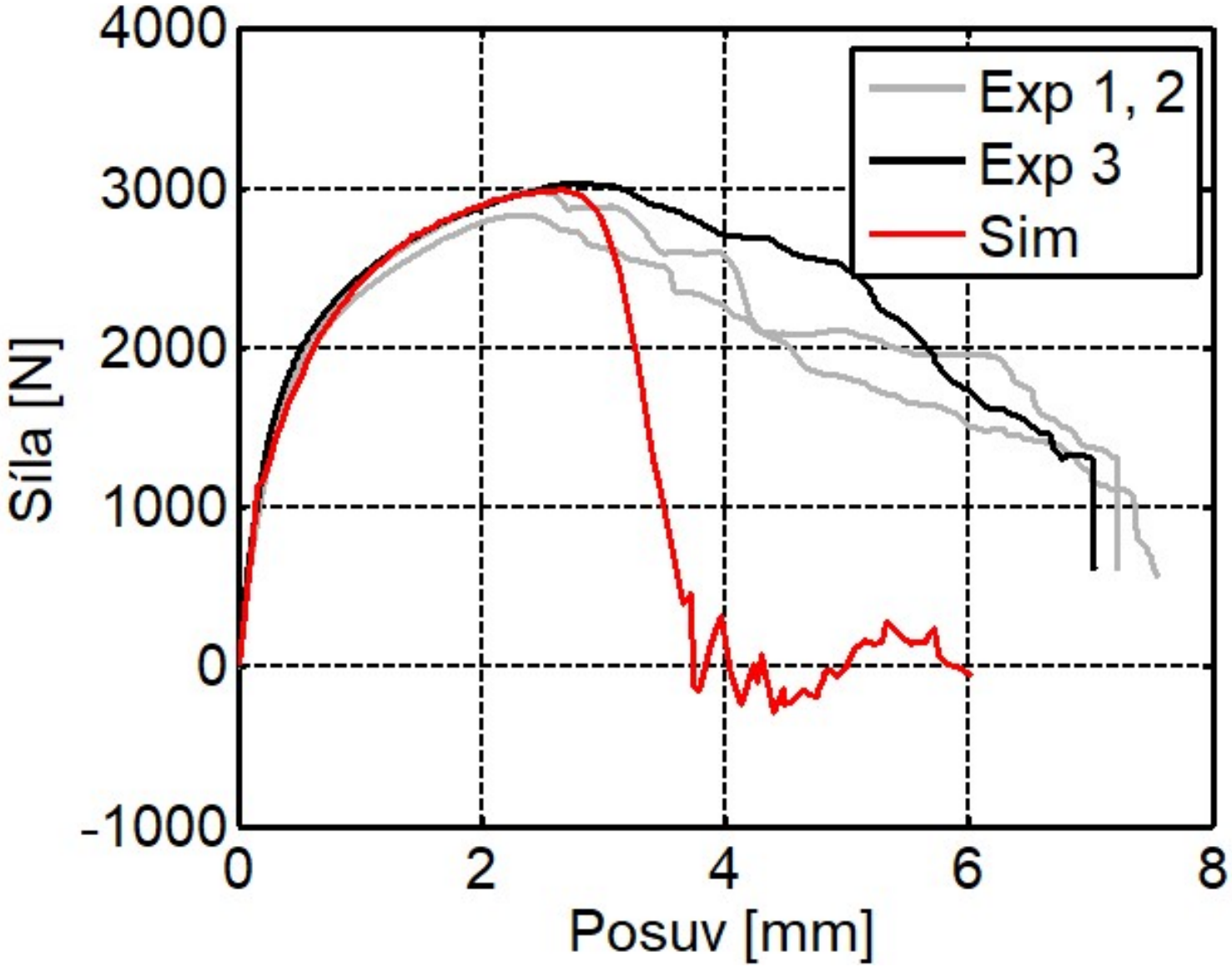
Tkaninový kompozit

Posuv 4,0 mm





Tkaninový kompozit



Obsah

Trocha teorie
- Pevnostní kritéria
- Postupné porušování
- Poškozování materiálových vlastností

Trocha praktických ukázek
- Kompozitní lávka
- Kolíkové spoje
- Vertikální korekce TT řídítek

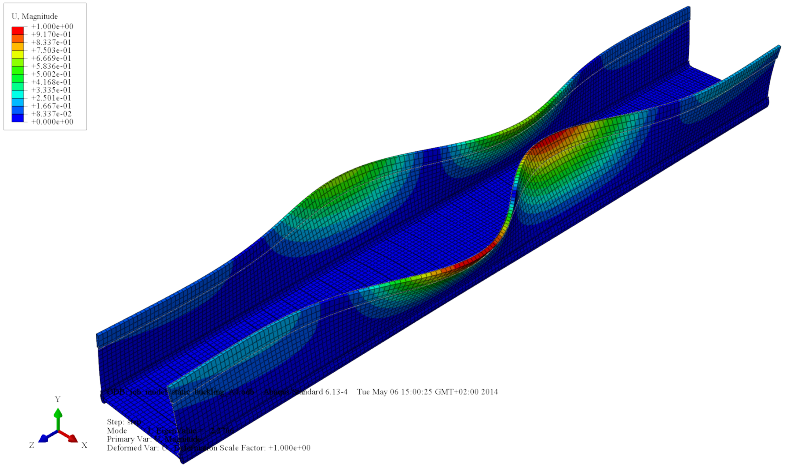
Info

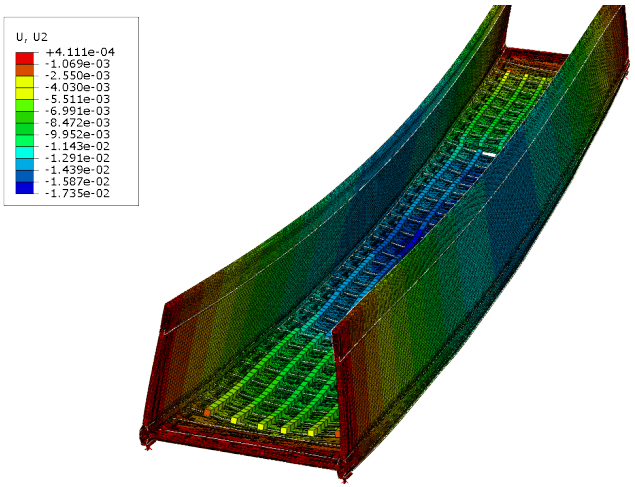
- Délka 18 m
- Pochozí šířka 2,2 m
- Dovolený průhyb cca 36 mm při zatížení na použitelnost
- Pro posouzení únosnosti (pevnosti) použita bezpečnost $k = 3$ a kritérium maximálního napětí
- Různé typy materiálu sklo/epoxid

MKP prvky

Skořepinové prvky
- Pro optimalizaci, snazší stavba modelu, automatizace.
- Skládání vrstev ve směru normály každé stěny.
- Nepřesné v místech, kde se stýkají stěny.

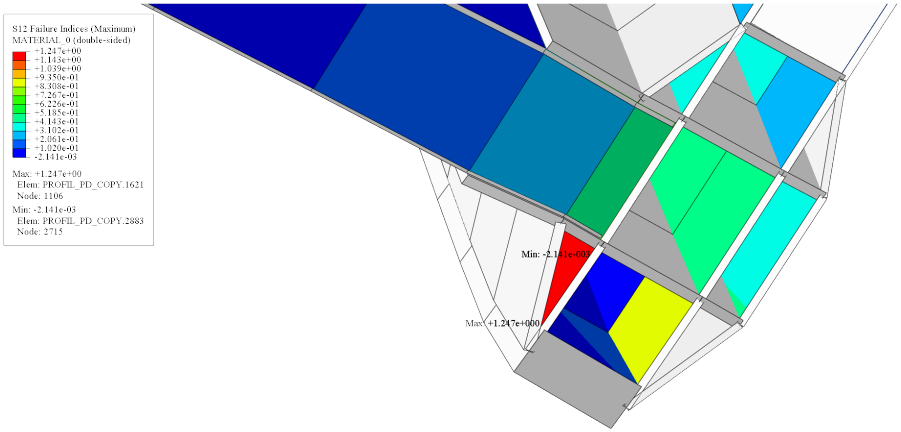
Prostorové prvky
- Detailnější model, pro srovnání s experimentem.
- Detailněji bylo modelováno uložení a trámy, na které se pokládalo zatížení (palety zámkové dlažby).
- Nepřesné v místech, kde se stýkají stěny (resp. tak přesné, jak přesně je definovaná skladba ve zmíněných místech).



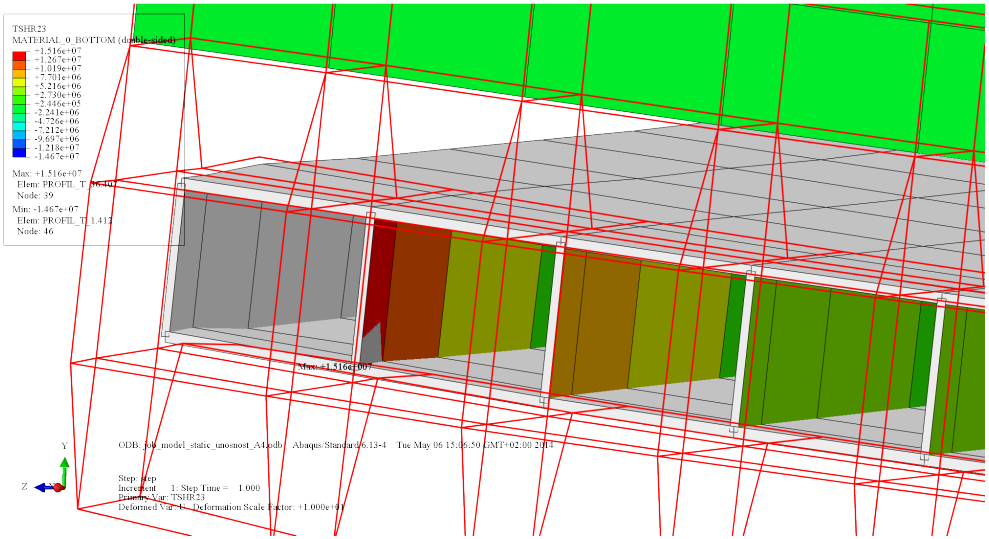


Smyková pevnost

Index porušení vzhledem k S_{12} – skořepiny, roving, nevyhovující řešení

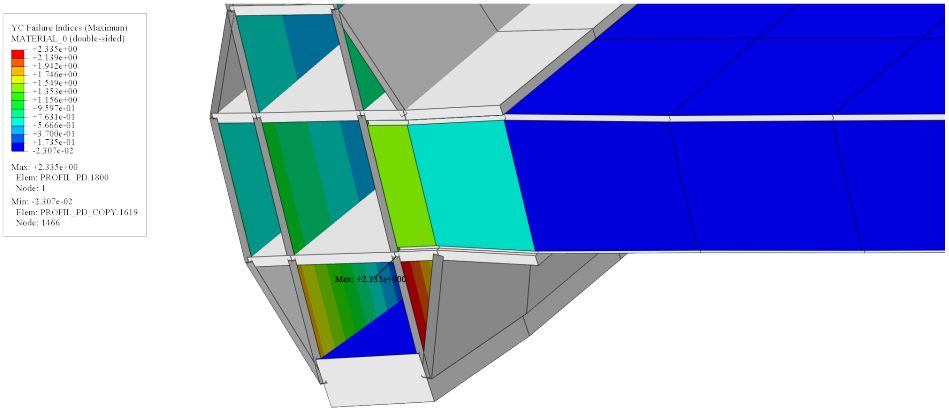


Index porušení vzhledem k S_{23} (omylem zobrazeno napětí) – skořepiny, roving, nevyhovující řešení

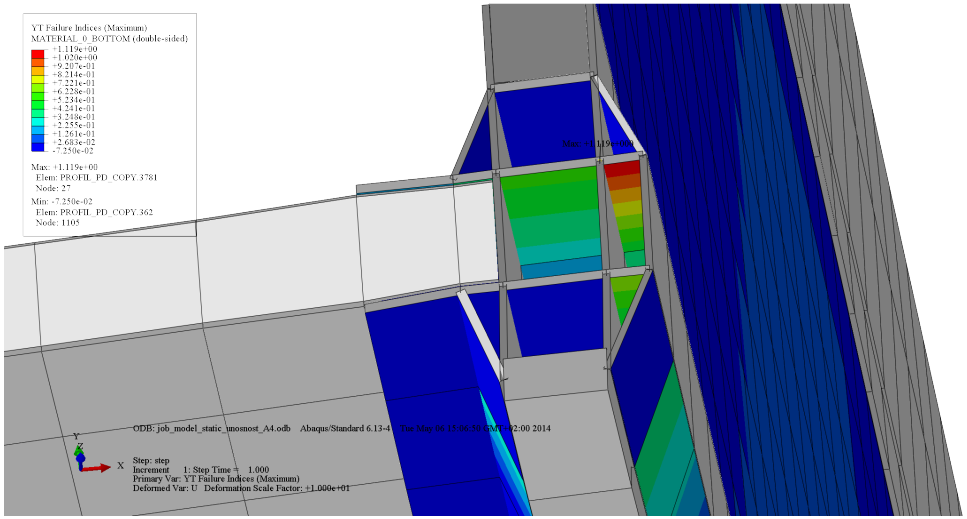


Příčně na vlákna

Index porušení vzhledem k Y^{C} – skořepiny, roving, nevyhovující řešení

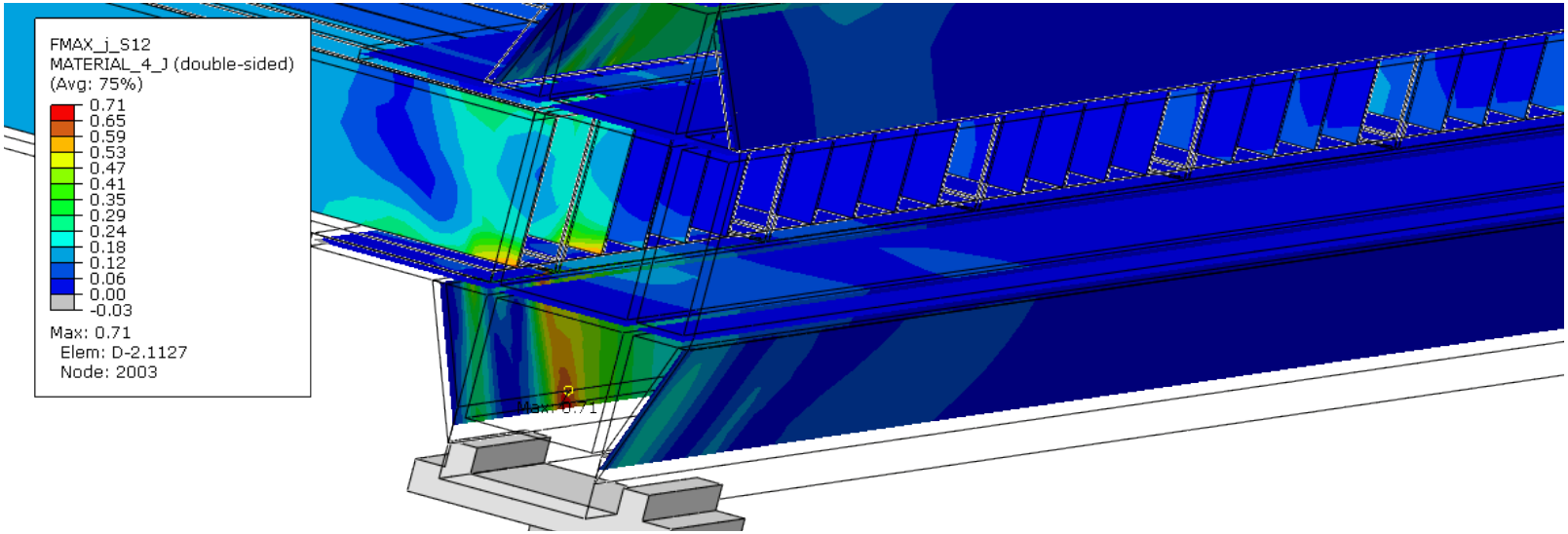


Index porušení vzhledem k Y^{T} – skořepiny, roving, nevyhovující řešení



Prostorové prvky

Index porušení vzhledem k S_{12} – roving, již vyhovující řešení, modelováno i porušení, kritické místo za uložením



Jak na to?

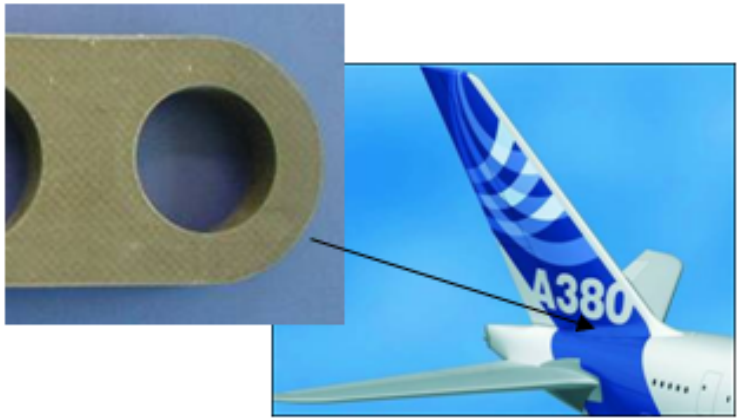
- Pokud nelze analyzovat strukturu detailněji:
  - Provedou se tahové, tlakové, ... zkoušky materiálu.
  - Poníží se stanovené pevnosti.
  - Analyzují se nepřesnosti a omezení modelu.
  - Model musí vyhovět poníženým pevnostem.
  - Doufá se, že rezerva stačí v místech, kde se model shoduje s realitou jen přibližně.
- V případě navržené lávky bylo ponížení pevností dostačující a lávka je certifikovaná.

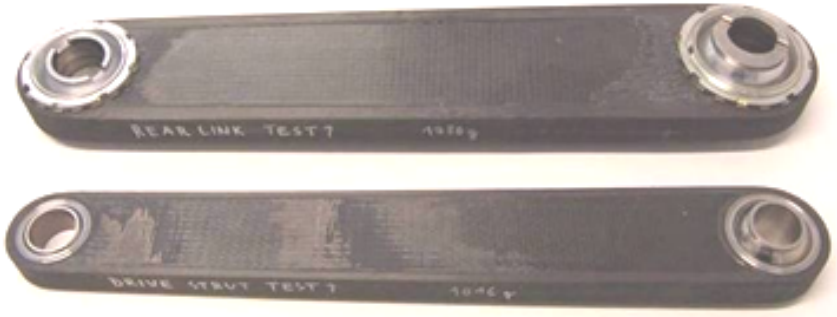
Obsah

Trocha teorie
- Pevnostní kritéria
- Postupné porušování
- Poškozování materiálových vlastností

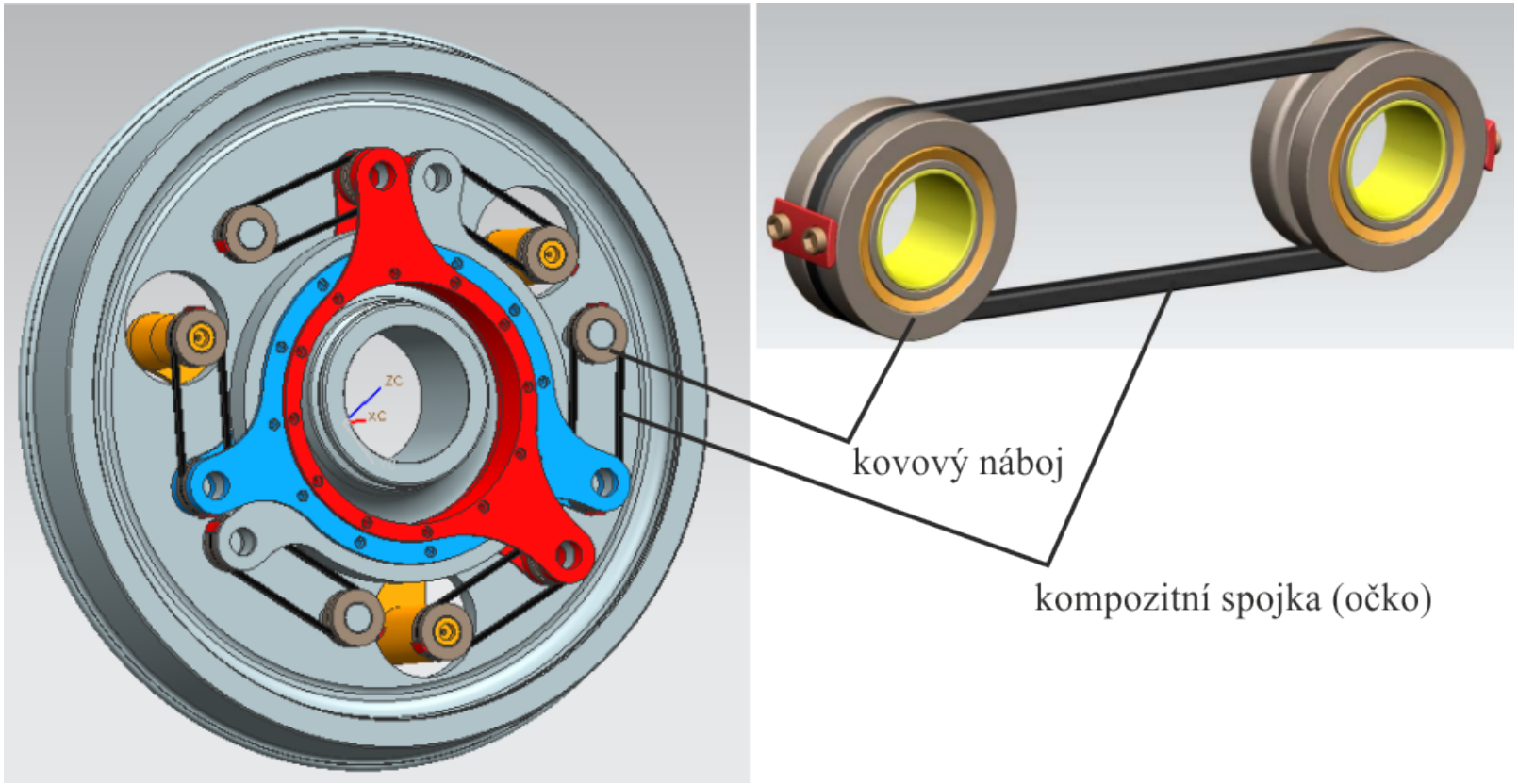
Trocha praktických ukázek
- Kompozitní lávka
- Kolíkové spoje
- Vertikální korekce TT řídítek

Co jsou to kolíkové spoje?

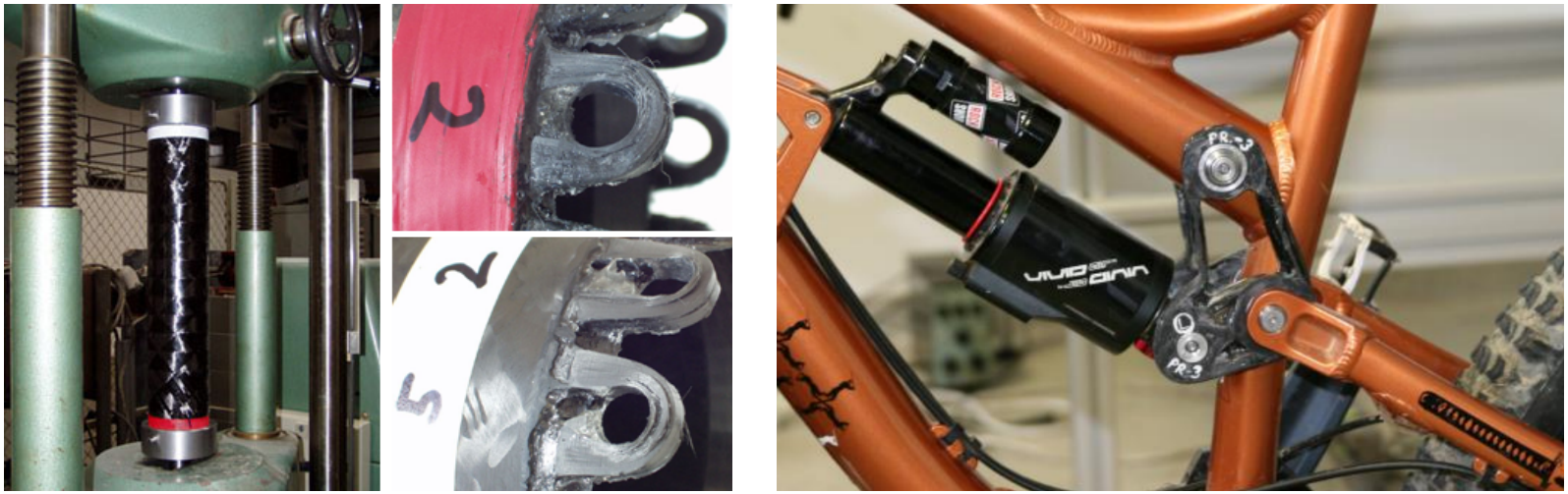




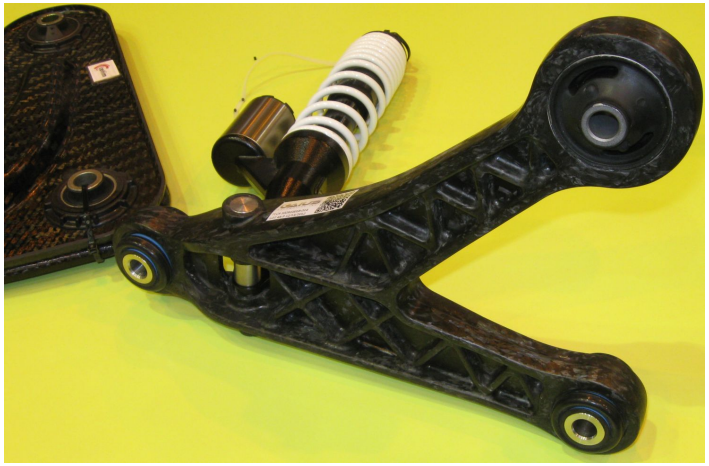
Co jsou to kolíkové spoje?

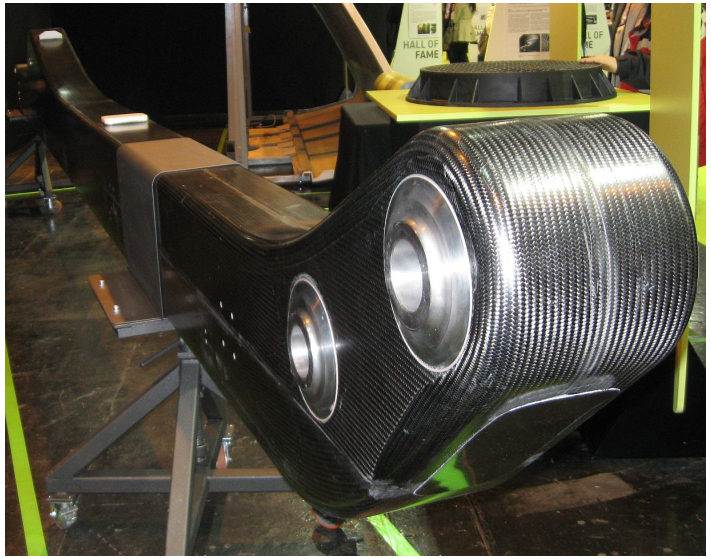


Co jsou to kolíkové spoje?



Co jsou to kolíkové spoje?





Kolíkové spoje

- Dva druhy spojů:

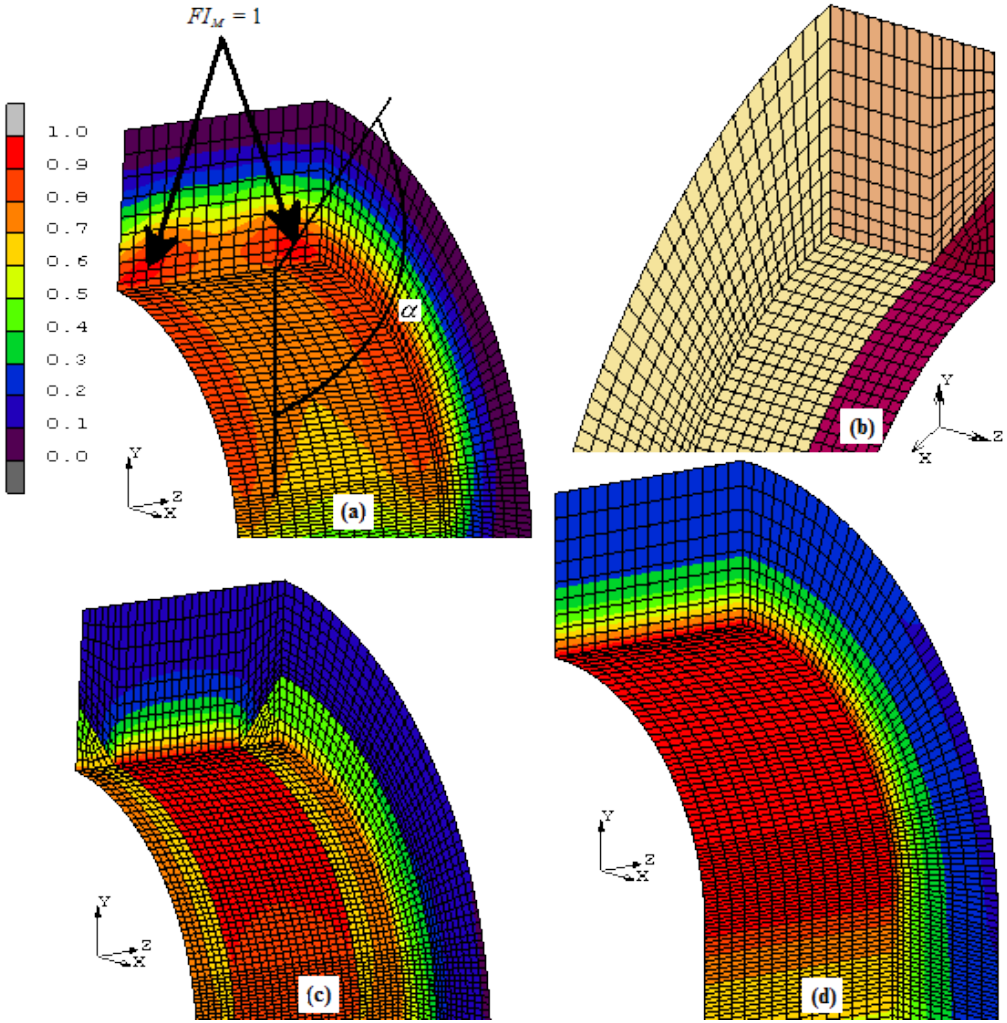
  Neovíjené – Laminát

  Ovíjené – Pevně upnutý (kompaktní průřez až do porušení), Volně upnutý (postupné oddělování kusů průřezu)

  – speciální typ namáhání:

  - tah ve směru vláken
  - tlak na vlákna
- Chování závislé na:
  - geometrických parametrech (všech)
  - materiálových parametrech (všech)
- Byl analyzován vliv vybraných parametrů.
- V následujících ukázkách je použito LaRC04 nebo jeho úprava.

Ovíjené spoje



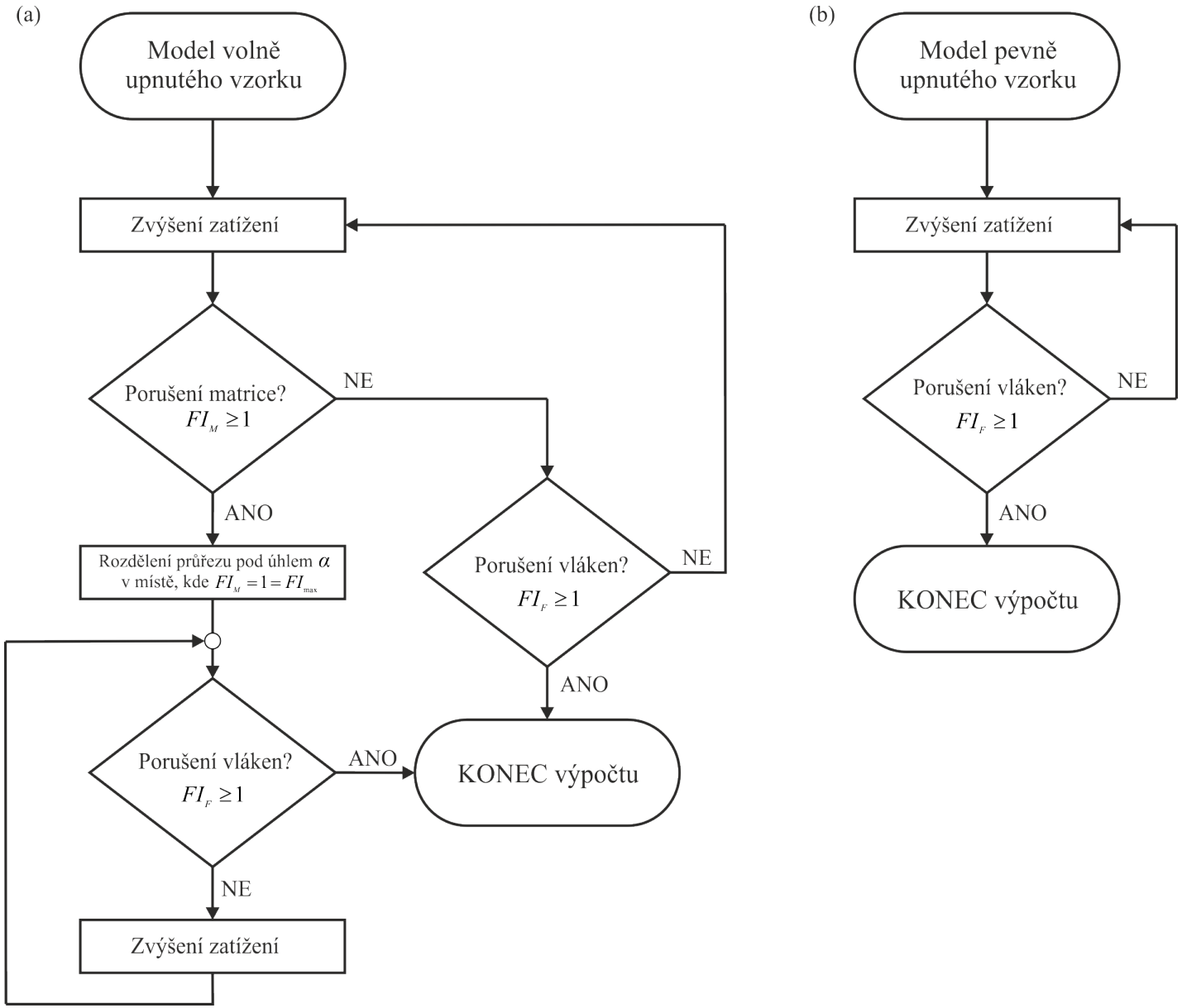
(a) Okamžik porušení matrice volně upnutého očka ($\mathcal{F}_M = 1$).

(b) Model s oddělenou částí průřezu volně upnutého očka.

(c) Rozložení indexu porušení vláken volně upnutého očka ($\mathcal{F}_F = 1$).

(d) Rozložení indexu porušení vláken pevně upnutého očka ($\mathcal{F}_F = 1$).

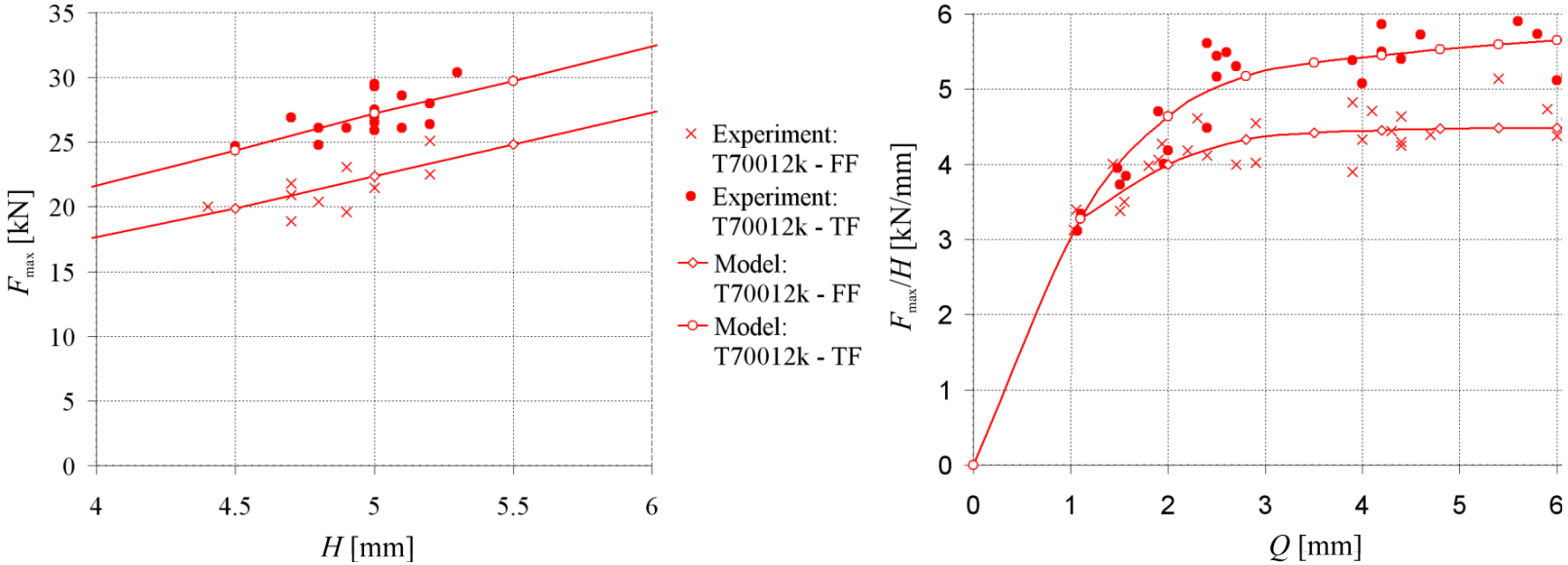
Ovíjené spoje



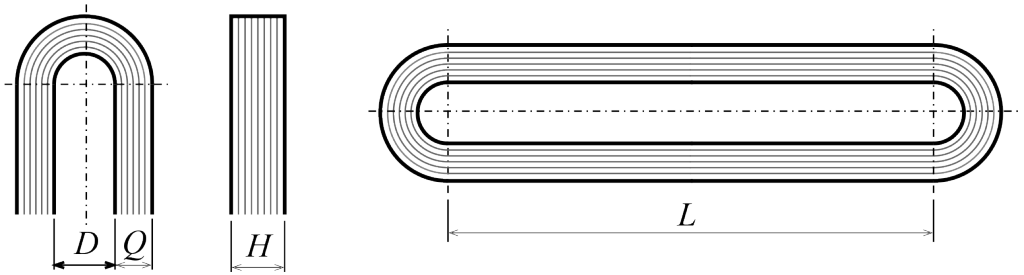
Ovíjené spoje

Modely vs. experimenty

body – pevně upnutá očka
křížky – volně upnutá očka



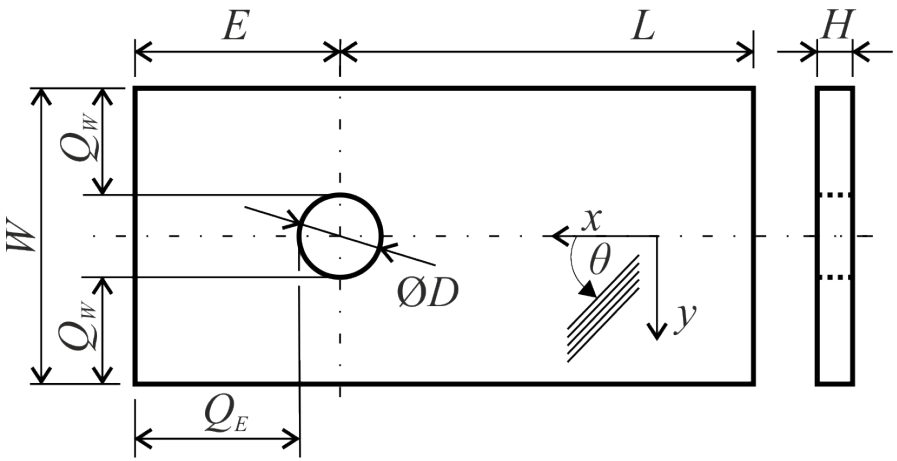
Parametry oček: D = 10mm, H = 5 mm, V_f = 0.50



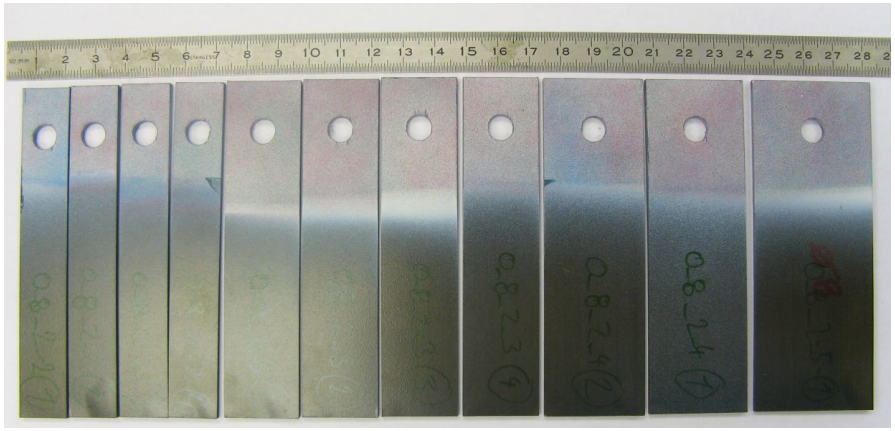
Neovíjené spoje

Vlastnosti spoje ovlivňuje:

- materiál
- rozměry
- další parametry, např. skladba vrstev

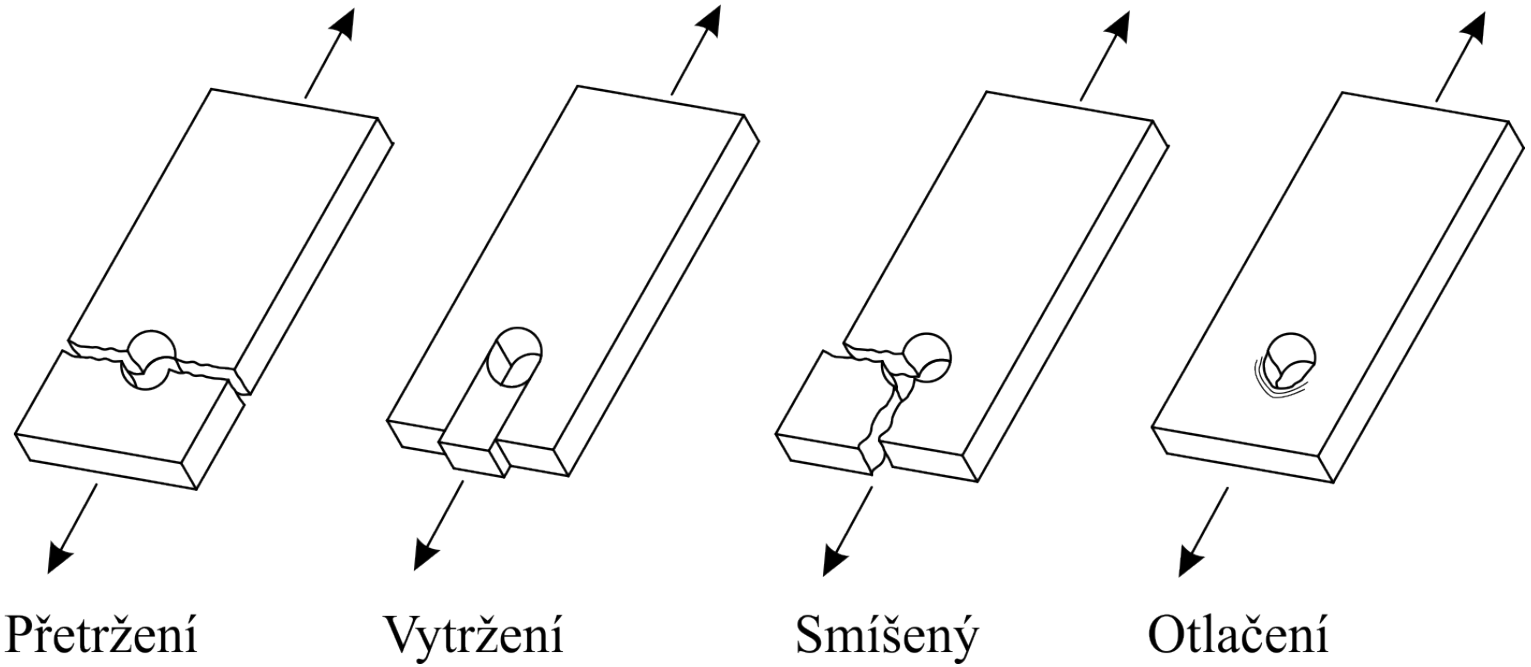


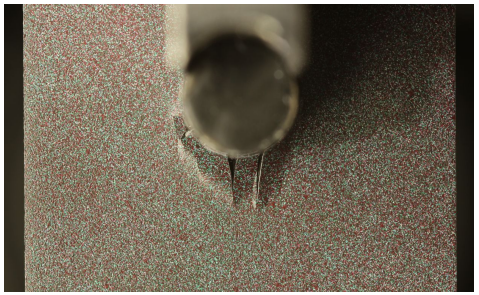
Sada vzorků



Neovíjené spoje

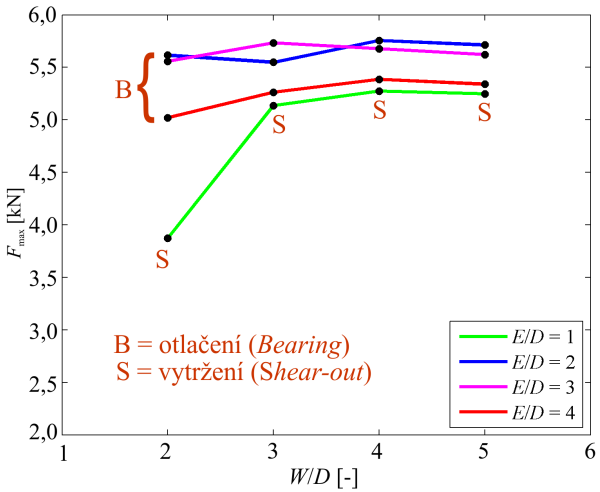
Módy porušení kolíkového spoje

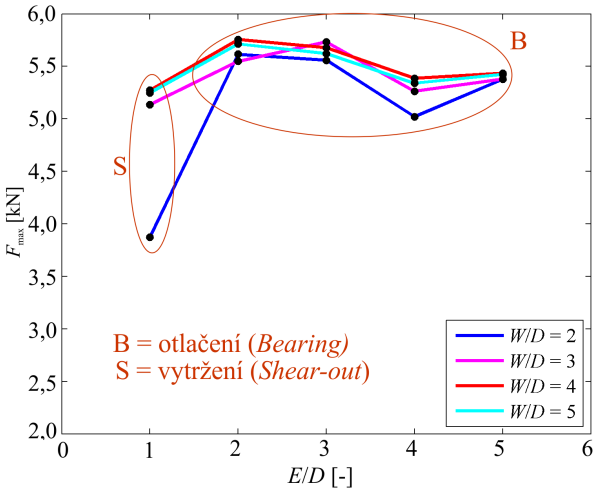


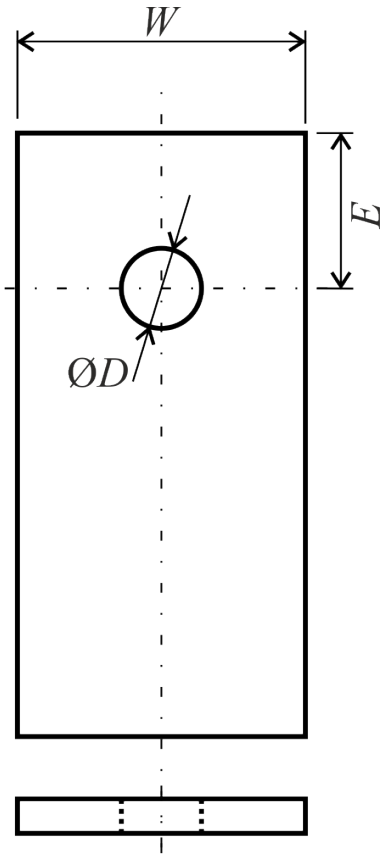


Neovíjené kolíkové spoje – výsledky experimentů

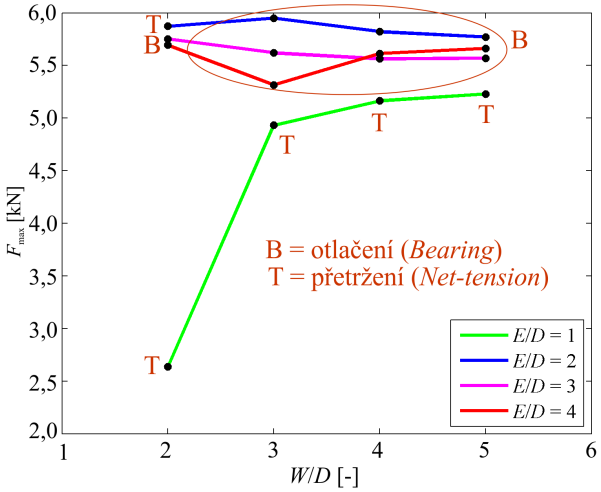
$[0_2/-45_2/45_2/90_2]_s$

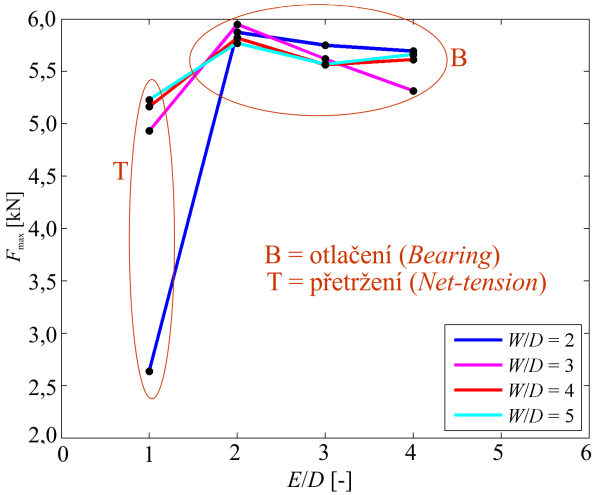




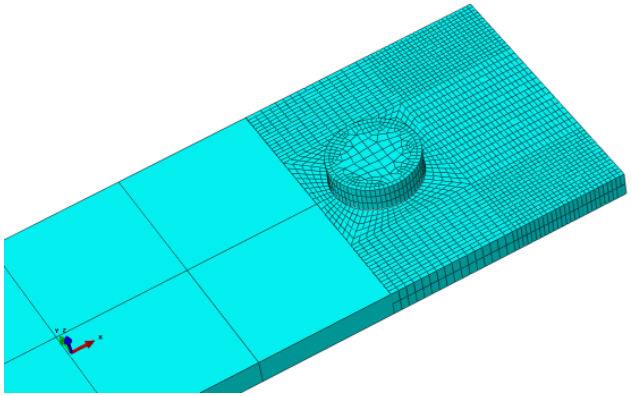


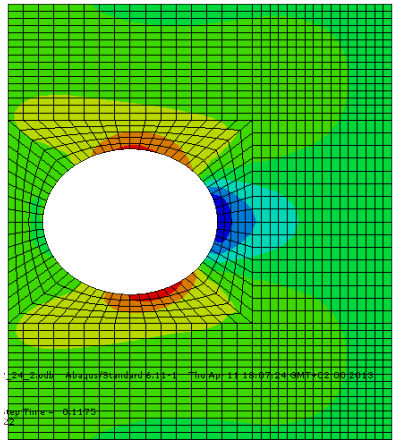
$[90_2/45_2/-45_2/0_2]_s$

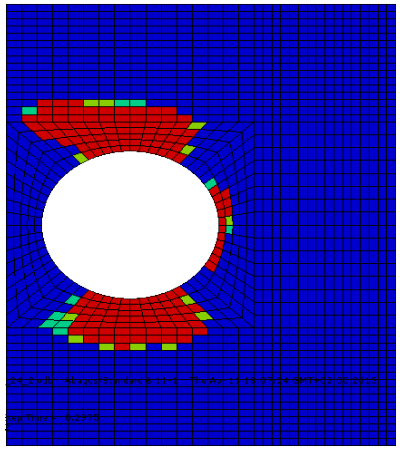


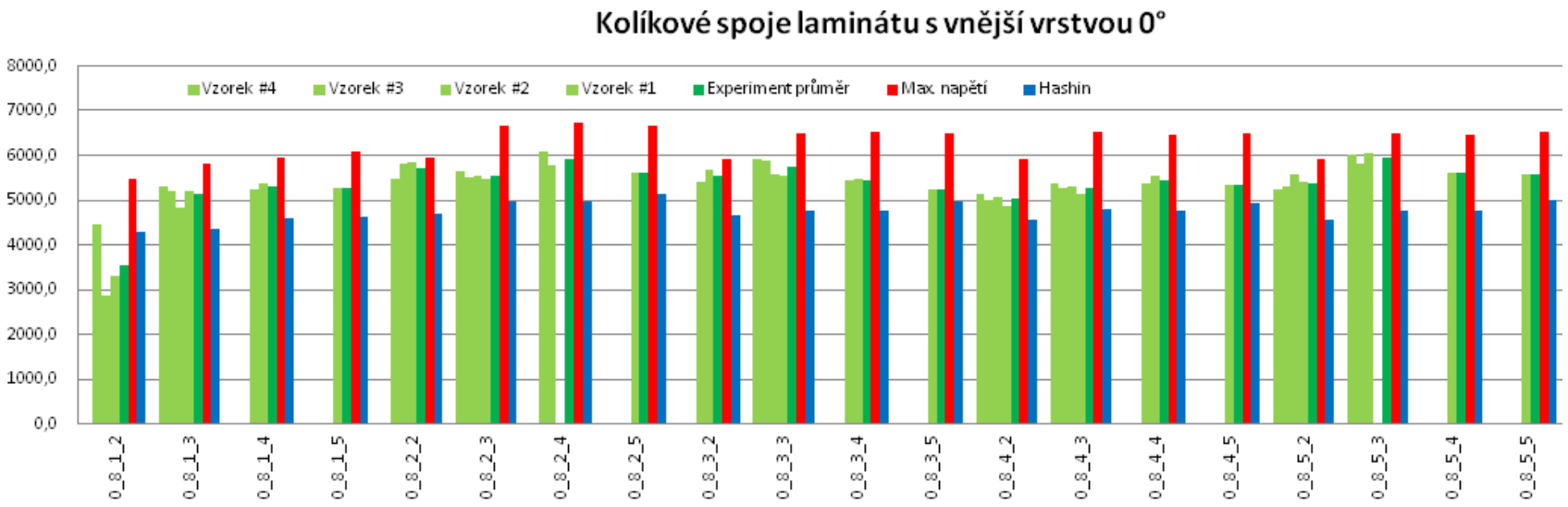


Neovíjené kolíkové spoje – numerické simulace

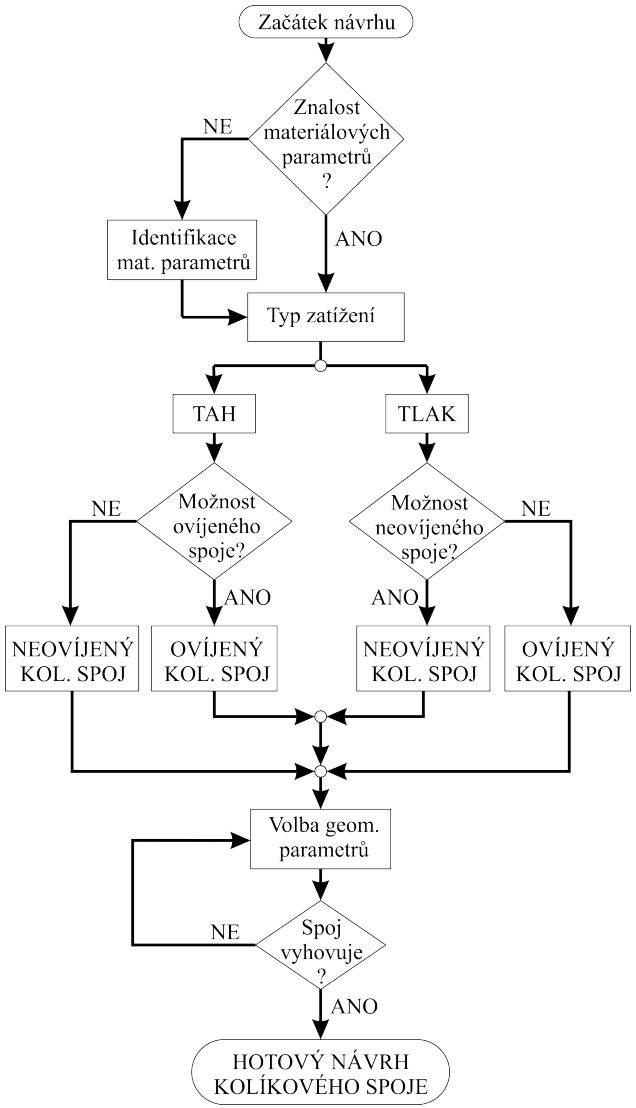


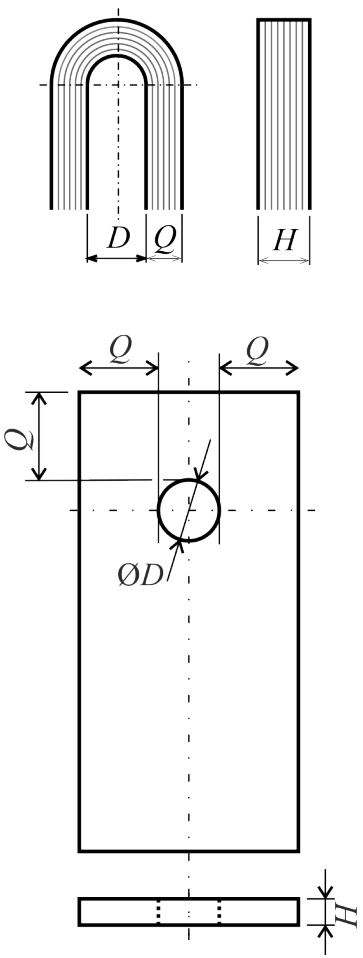


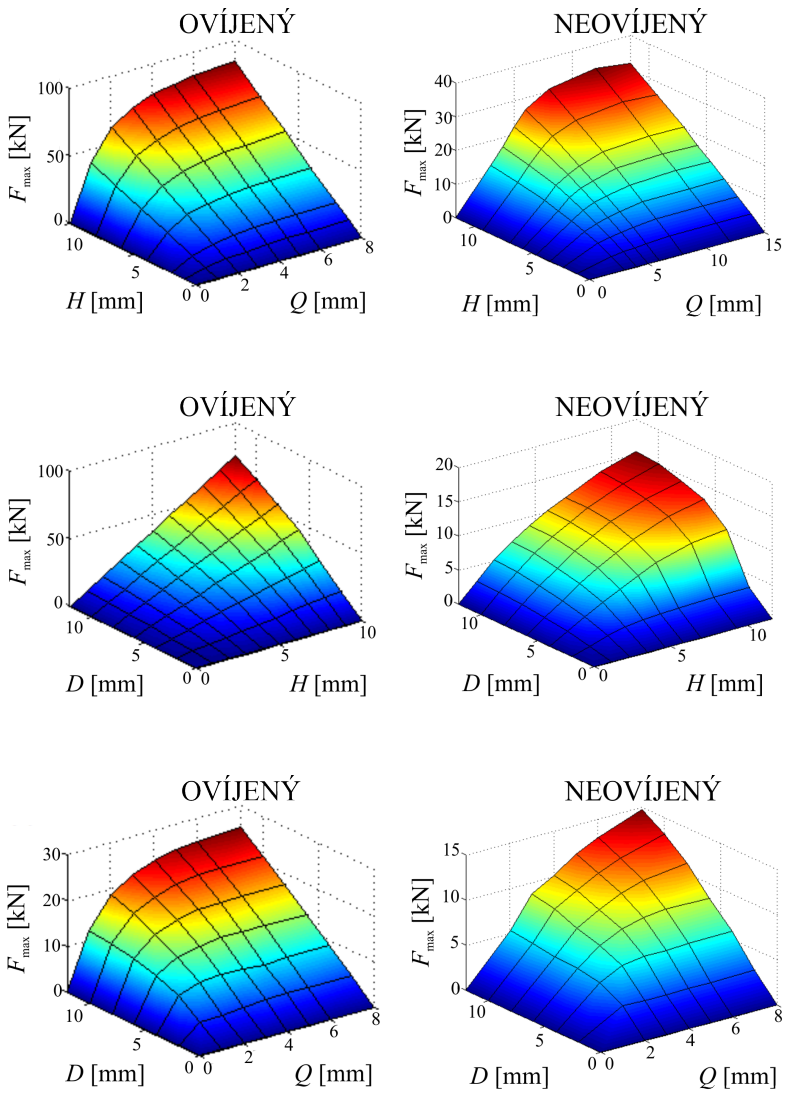




Metodika návrhu kolíkových spojů







Kolíkové spoje

- Postupné porušování pomocí kritérií:
  - Hashin
  - Maximální napětí
  - LaRC04 a jeho modifikace
- Vrstvené i „obyčejné“ prostorové prvky
- Sledováno:
  - maximální síla, kterou spoj přenese
- Cíl:
  - stanovení metodiky návrhu spojů
- Každý typ spoje potřebuje svůj přístup k návrhu.

Obsah

Trocha teorie
- Pevnostní kritéria
- Postupné porušování
- Poškozování materiálových vlastností

Trocha praktických ukázek
- Kompozitní lávka
- Kolíkové spoje
- Vertikální korekce TT řídítek

Motivace

To jsem já a ležím hóóóóódně při zemi. Což je supr na aerodynamiku, ale po 50 km to nedělá moc dobrotu...

- Bolesti zad, zadních stehenních a hýžďových svalů
- Špatné prokrvování dolních končetin
- Žaludeční potíže

Komplikace

Na kole na pedešlém slidu není komplex řídítek udělaný chytře:

- Svěrný spoj
- Nejdou výškově nastavit nástavce.

Brilantní řešení je *na videu Cervélo P5X*.

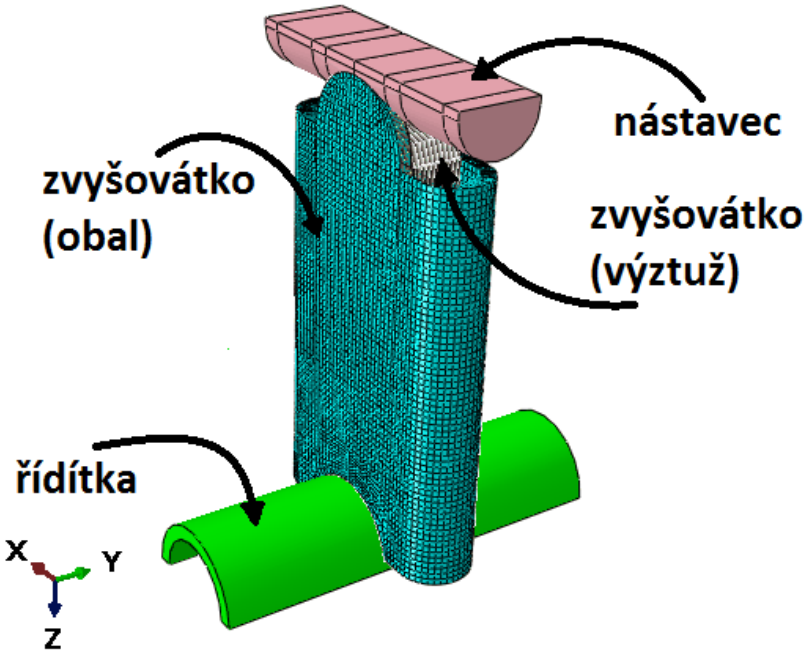
Na obrázku je sestava za cenu > 20.000 Kč s možností nastavit nástavce výškově v rozsahu několika cm.

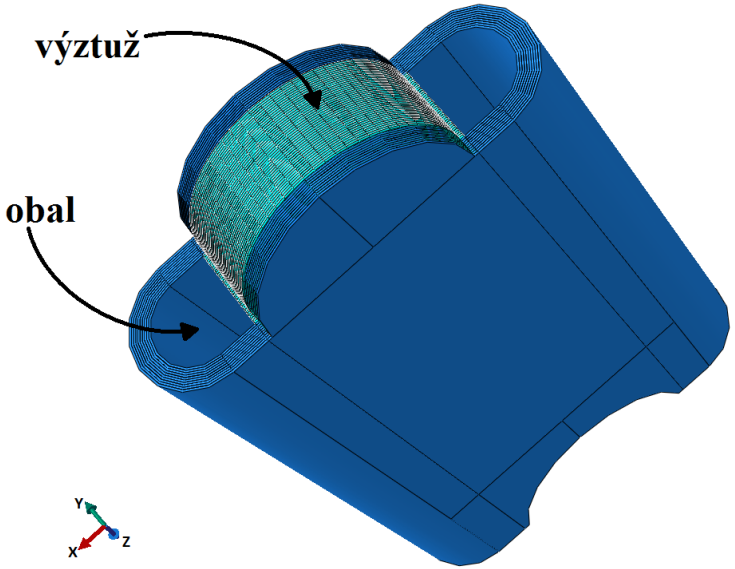
Sestava řídítek, zvyšovacího dílu a nástavců

- Komponenta modelovaná po jednotlivých vsrtvách
  - možná aplikace kohezivního kontaktu do mezivrstev (analýza delaminace)
  - V jednodušším výpočtu vrstvy spojeny vazbou tie
- Běžné prostorové hexa prvky

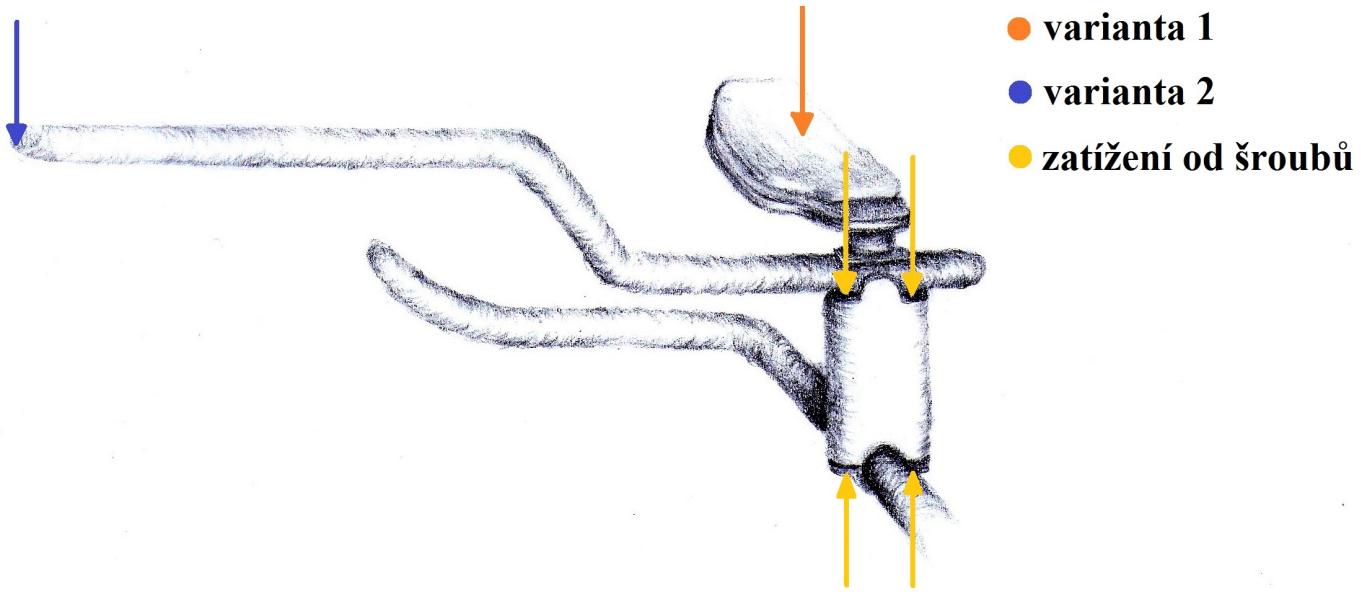
Prototyp

(předimenzovaný – blížila se expirace materiálu)





Nákres zatížení

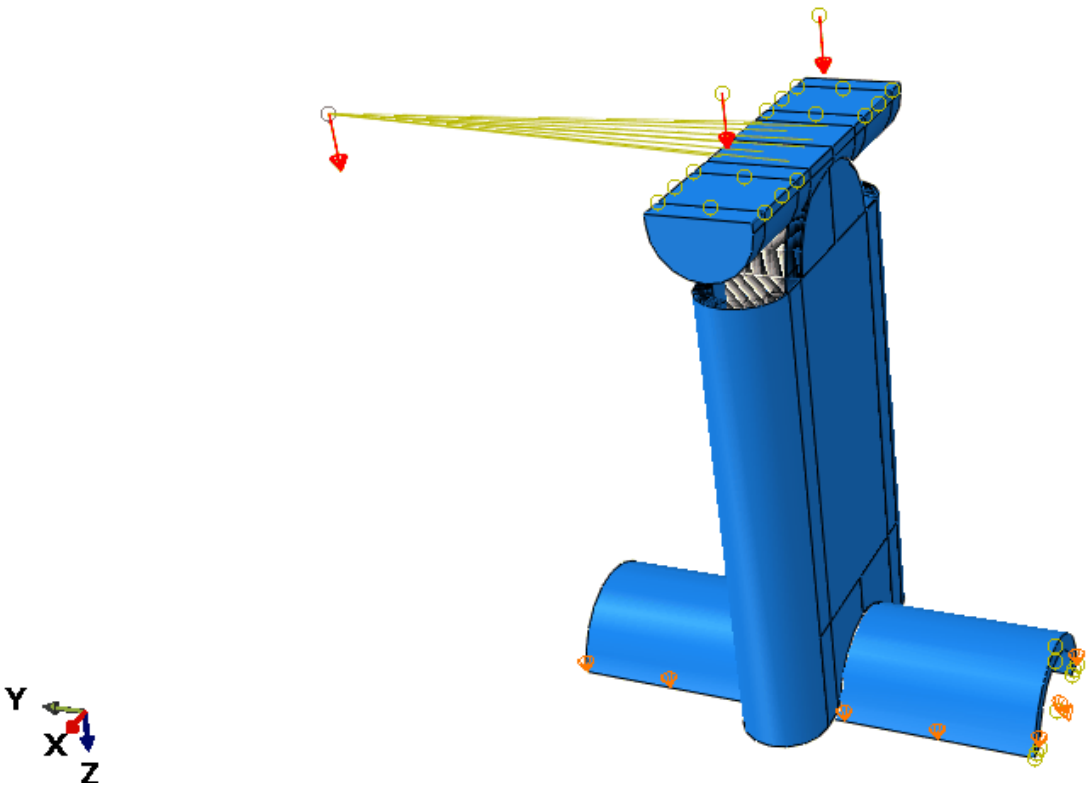


- Pod řídítky je v reálu ocelová objímka.
- Zvyšovací díl je upevněn dvěma šrouby a navíc zatížen:

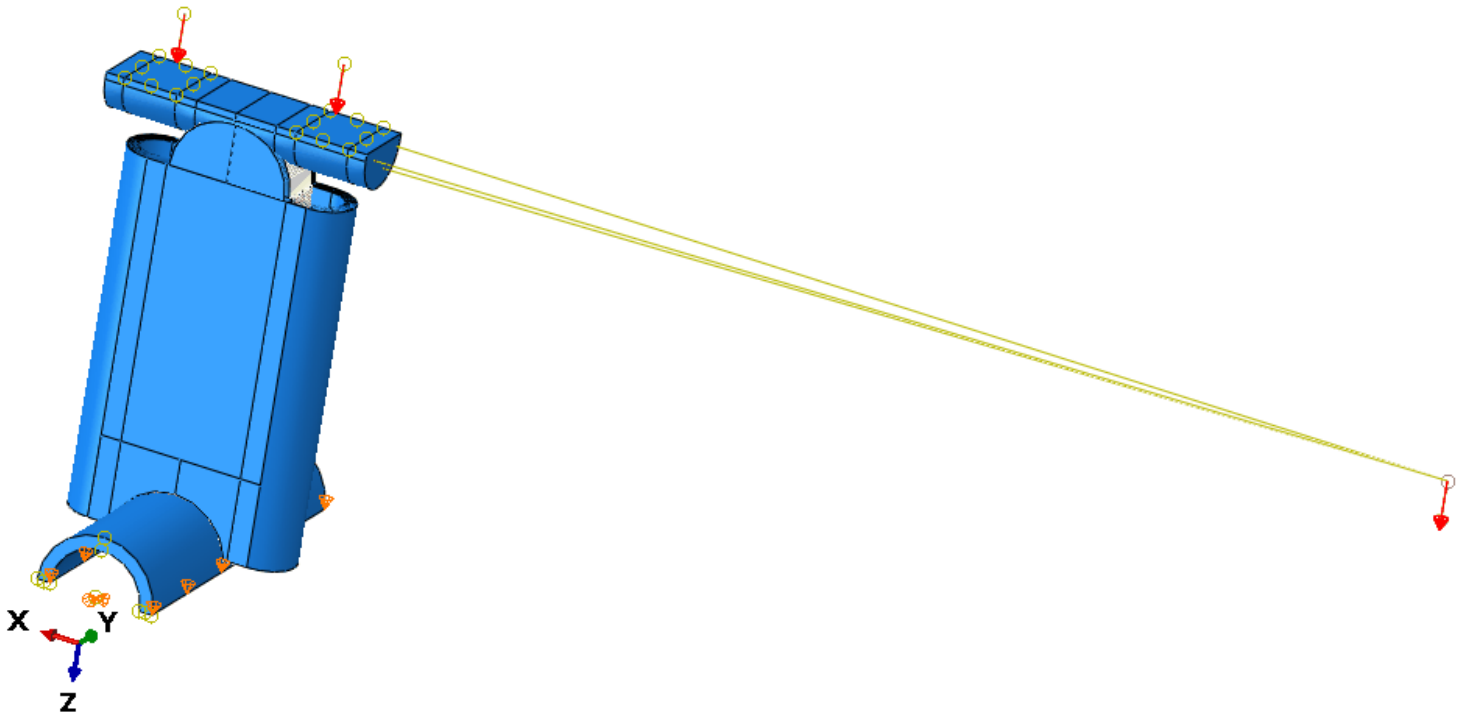
1. varianta zatížení: Člověk leží v nástavcích a opírá se loktem o podpěrku (jako na úvodním obrázku).
2. varianta zatížení: Člověk se vzepře za konce řídítek (síla z normy).

   Obvykle se zkouší při přejímce před závodem.

Zátěžný stav 1



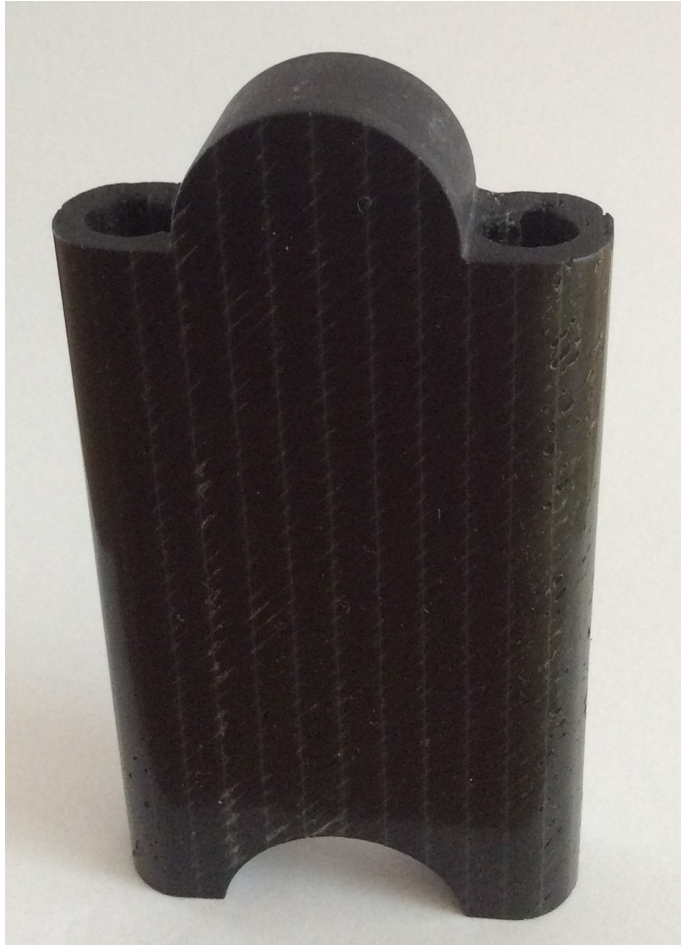
Zátěžný stav 2



Skutečný díl

Hliníkový výrobek od renomované firmy nalezený nedávno v českém e-shopu

Předimenzovaný prototyp



Zvolené materiálové modely

Izotropní materiál (hliník)

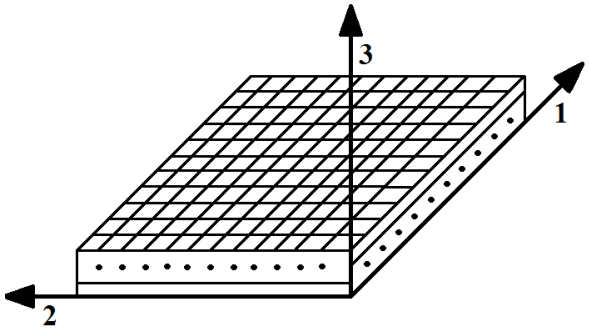
$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} \end{bmatrix} \boldsymbol{\sigma} \tag{30}$$

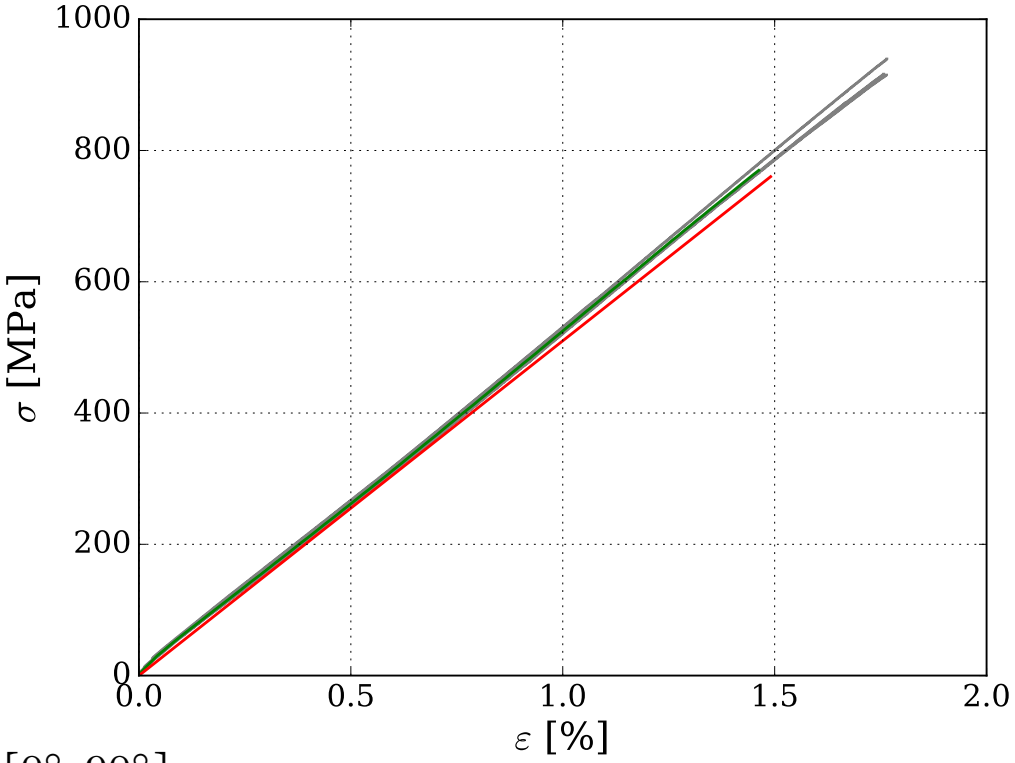
Ortotropní materiál (použitý kompozit)

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \boldsymbol{\sigma} \tag{31}$$

Materiálové zkoušky

- 4 typy vzorků – různé skladby laminátu
- provedena tahová zkouška
- prepreg, uhlík-epoxid, biaxiální vazba





$[0°, 90°]_S$

- tahová zkouška
- průměr z tahové zkoušky
- numerická analýza

Materiálové parametry

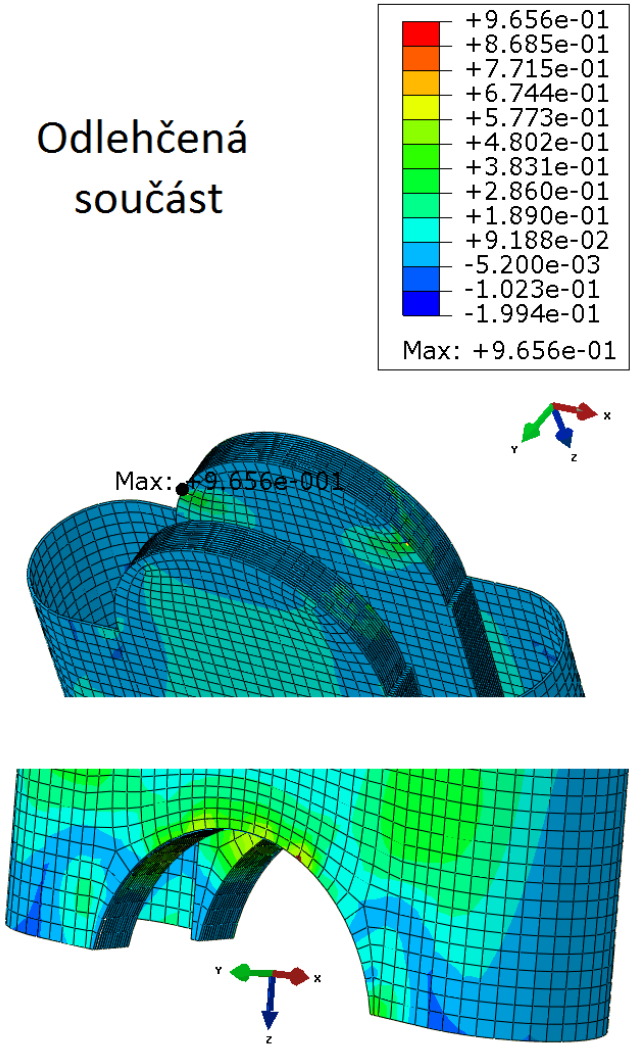
Modul pružnosti v tahu			Poissonovo číslo			Modul pružnosti ve smyku		
E_1	E_2	E_3*	ν_{12}*	ν_{13}*	ν_{23}*	G_{12}*	G_{13}*	G_{23}*
[GPa]	[GPa]	[GPa]	[-]	[-]	[-]	[GPa]	[GPa]	[GPa]
51	51	5	0,1	0,25	0,25	6	1	1

Pevnost v tahu ve směru			Pevnost v tlaku ve směru			Pevnost ve smyku v rovině		
1	2	3	1	2	3	12	13	23
X_T	Y_T	Z_T*	X_C*	Y_C*	Z_C*	S_{12}	S_{13}*	S_{23}*
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
800	800	30	450	450	100	60	60	60

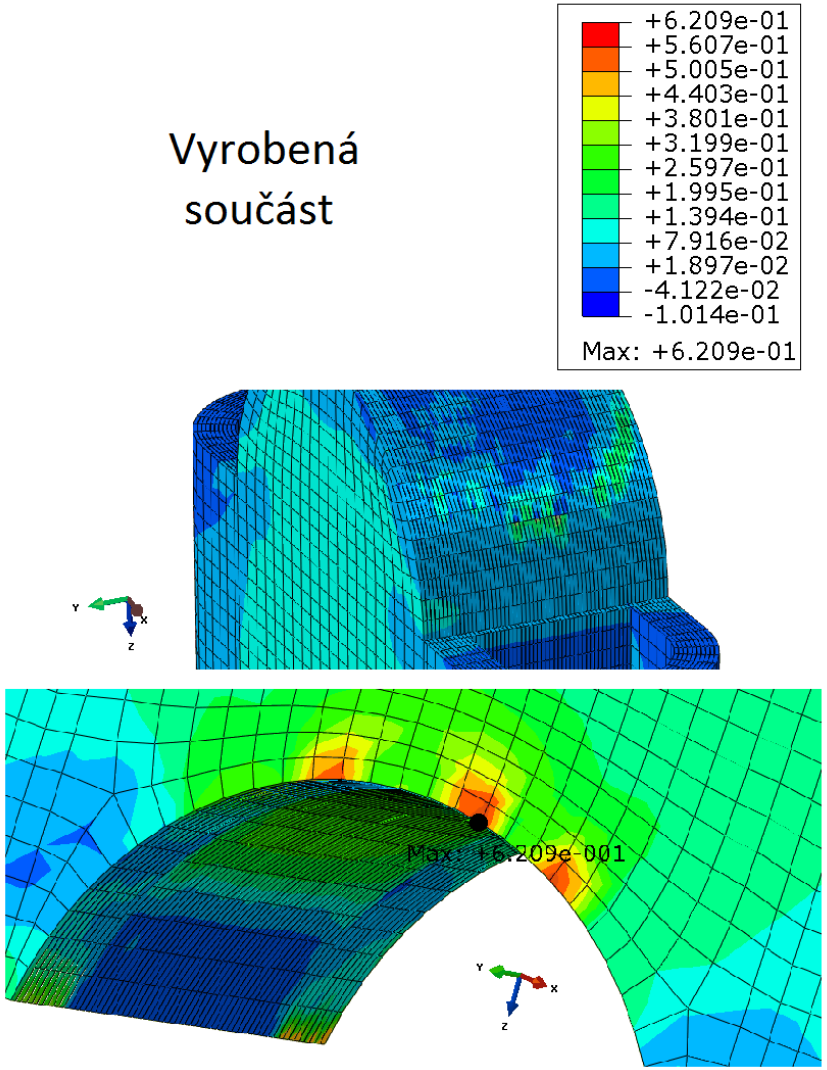
- Nejdůležitější jsou pevnosti ve smyku a tlaku, musely být odhadnuty ...jak už to tak často bývá.
- Hliník (řídítka, hrazda)
  - Modul pružnosti v tahu $E = 68,98$ [GPa]
  - Poissonovo číslo $\nu = 0.33$
  - Mez pevnosti $R_m = 210$ [MPa]

Max. napětí v rovině 12

Odlehčená součást

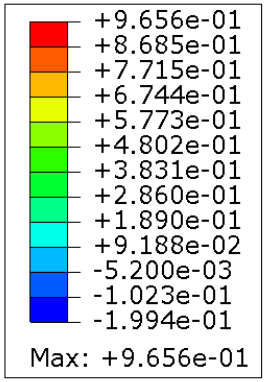


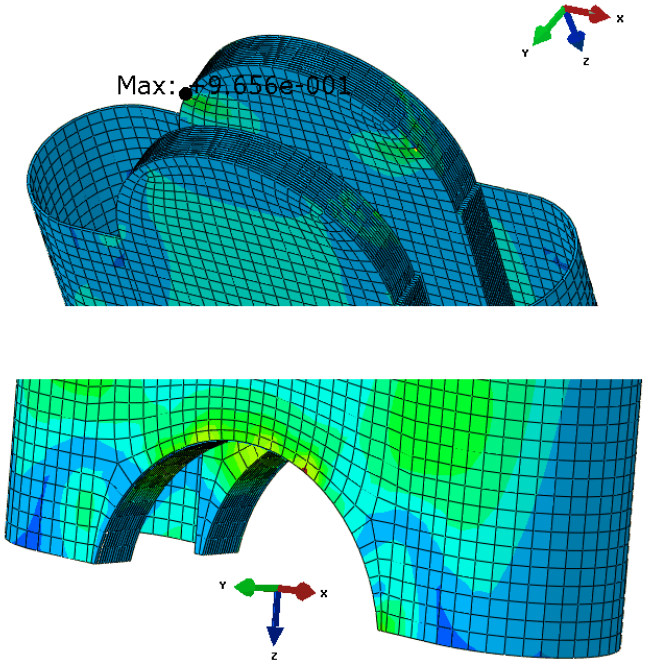
Vyrobená součást



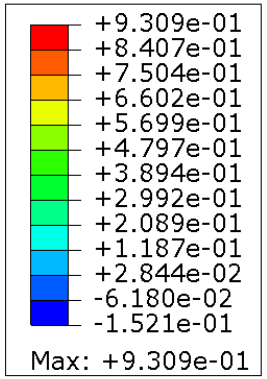
Porovnání kritérií

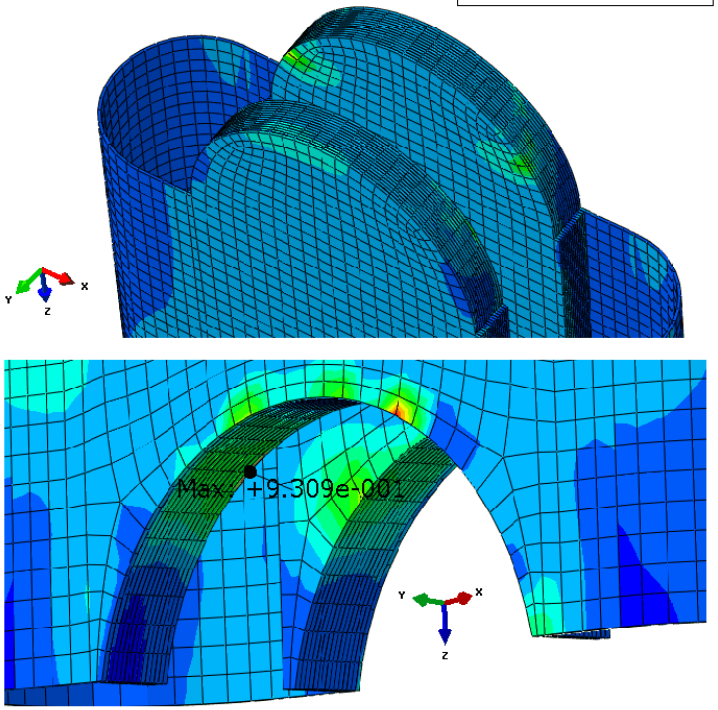
Kritérium maximálního smykového napětí v rovině 12





Kritérium Tsai-Wu





Přínos

- Zmírnění žaludečních potíží.
- Krční svalstvo je v lepším stavu.

Díl lze ještě odlehčit, až bude na skladě vhodnější materiál.

Trocha teorie

Pevnostní kritéria
Postupné porušování
Poškozování materiálových vlastností

Trocha praktických ukázek

Kompozitní lávka
Kolíkové spoje
Vertikální korekce TT řídítek

- Viděli jsme, že se člověk musí umět s problémem poprat.
- Žádný přístup není všemocný a často se musí některé věcí odhadnout popřípadě citlivě posoudit.
- Cit pro danou aplikaci je nezastupitelnou částí procesu návrhu.

Děkuji za pozornost