



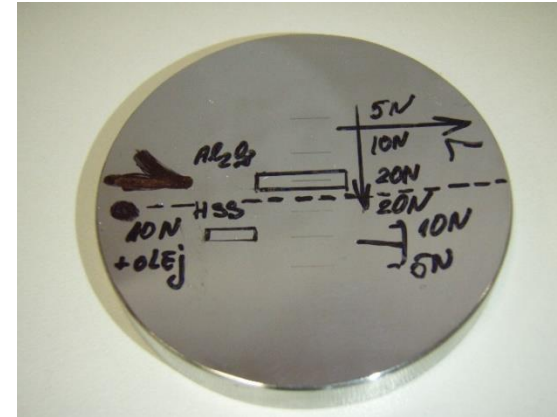
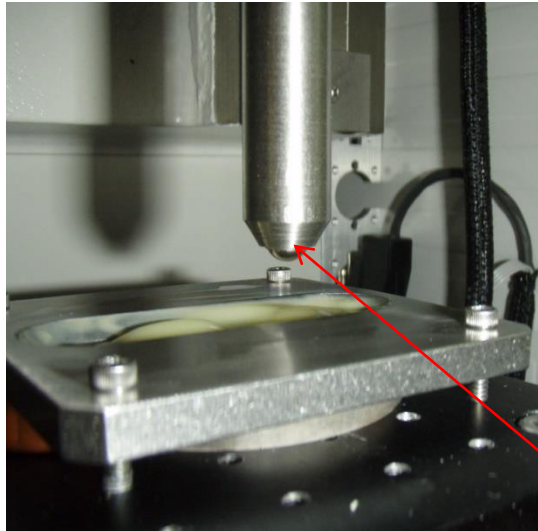
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# NUMERICKÁ SIMULACE ELASTOPLASTICKÝCH NAPĚTÍ A DEFORMACÍ PŘI TRIBOLOGICKÉ ZKOUŠCE

P. Rálek, P. Šidlof



**Tribologie:** CETR UMI Multi-Specimen Test System – Scratch Tester



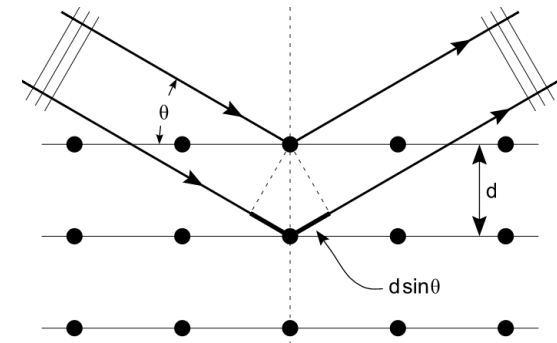
výměnný indentor – kulička o průměru 6.35mm

- definovaný nastavitelný přítlak 10 – 100N; měří sílu ve směru pohybu a **koeficient smykového tření**
- možnost dalším přístrojem vyhodnotit **profil drážky**, normalizované opotřebení (**otěr**)

**Zbytková napětí:** rentgenová difrakce

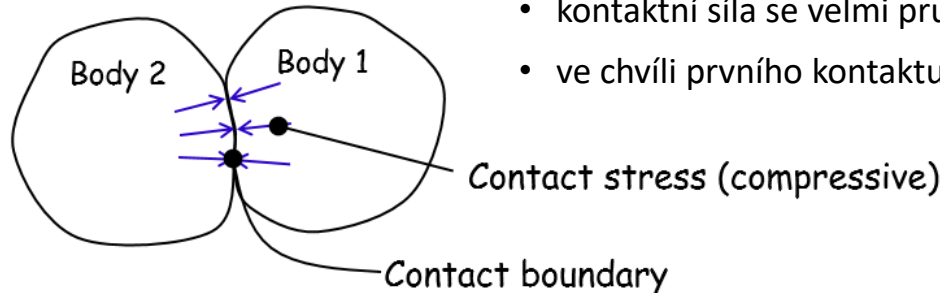
- dosah RTG: cca 2-5  $\mu\text{m}$  pod povrch
- zbytková napětí: cca 0.1 mm pod povrch
- měří elastickou deformaci; přepočítává na napětí
- stopa kuličky cca 0.1 mm, šířka záběru RTG asi 1 mm
- žíhaný stav: 10-50 MPa
- po tribologické zkoušce: 100-300 MPa

$$2 d \sin\theta = n \lambda$$



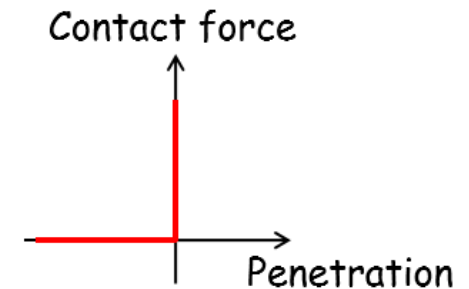
# Numerická simulace kontaktních úloh

Obrázky:  
Nam-Ho Kim,  
Finite Element Analysis of Contact Problem



## Problémy:

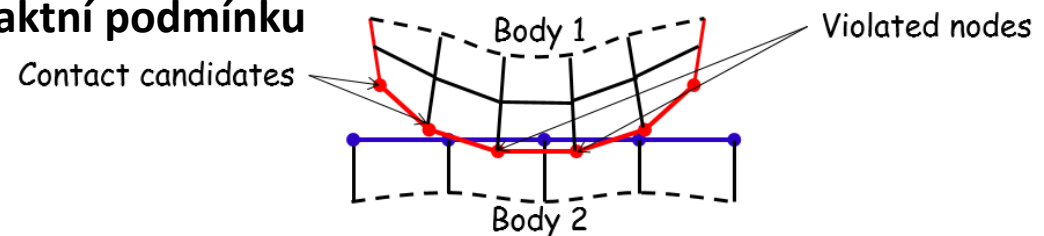
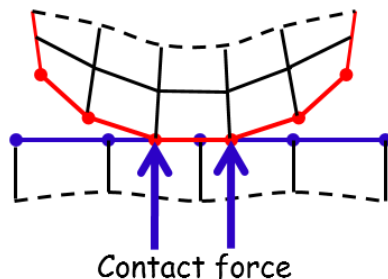
- a priori neznáme ani kontaktní plochu ani kontaktní napětí
- kontaktní síla se velmi prudce mění
- ve chvíli prvního kontaktu nelze určit sílu z posunutí



- diskretizace geometrie – hranice oblasti po částech lineární (ostré rohy)
- výpočet kontaktních sil je velmi citlivý na lokální poloměr křivosti
- řešení s třením / bez tření

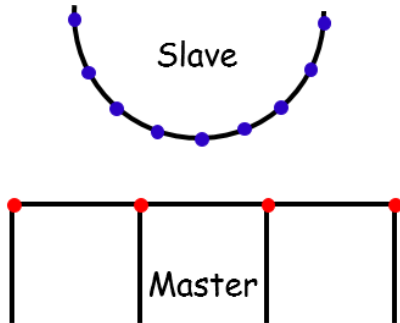
## 1. Vyhledání uzlů, které porušují kontaktní podmínku

## 2. Nastavení kontaktní síly



- Lagrangeovy multiplikátory (síla je nezávislá proměnná – multiplikátor, který zajistí neprostupnost těles)
- penalizační faktory (síla vypočtena z penetrace)

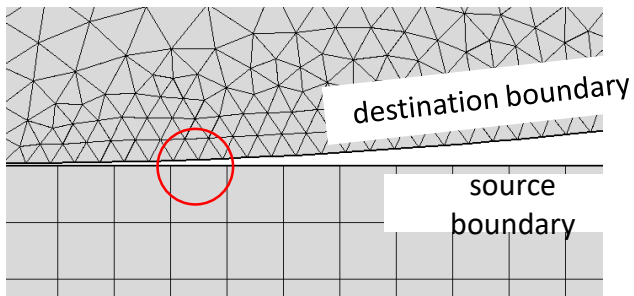
# Numerická simulace kontaktních úloh



## Přístupy:

- geometrie těles – vyznačení částí hranic, kde může dojít ke kontaktu
- master: těleso s vyšším modulem, konkávní, hrubší síť
- slave: nižší modul, konvexní, jemnější síť
- kontaktní podmínka: slave nesmí penetrovat do mastera

## COMSOL:



- master/slave vs. source/destination

## V našem případě:

- slave (indentor) - tužší
- master (podložka): měkčí, potřeba jemnější sítě kvůli postprocessingu
- fungují obě varianty nastavení...

podložka – nelineární elastoplastický model se zpevněním:

$$\sigma_k = \sigma_{k0} + \sigma_h(\epsilon_{pe})$$

$$\sigma_h(\epsilon_{pe}) = H \epsilon_{pe} + (\sigma_{ks} - \sigma_{k0})(1 - e^{-\zeta \epsilon_{pe}})$$

$\sigma_k$  ... aktuální mez kluzu

$\sigma_{k0}$  ... počáteční mez kluzu

$\epsilon_{pe}$  ... efektivní plastická deformace

$H$  ... lineární koeficient zpevnění

$\sigma_{ks}$  ... saturační mez kluzu

$\zeta$  ... saturační exponent

indentor – ideálně elastický materiál z korundu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

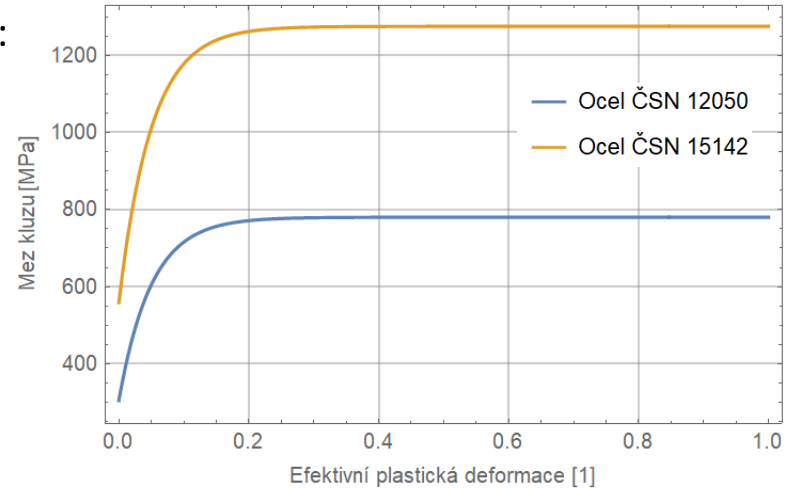
Youngův modul pružnosti  $E$        $E = 350 \text{ GPa}$

Poissonovo číslo                       $\nu = 0.23$

Mez kluzu                                       $\infty$

koeficient smykového tření  $\mu$   
mezi podložkou a indentorem:

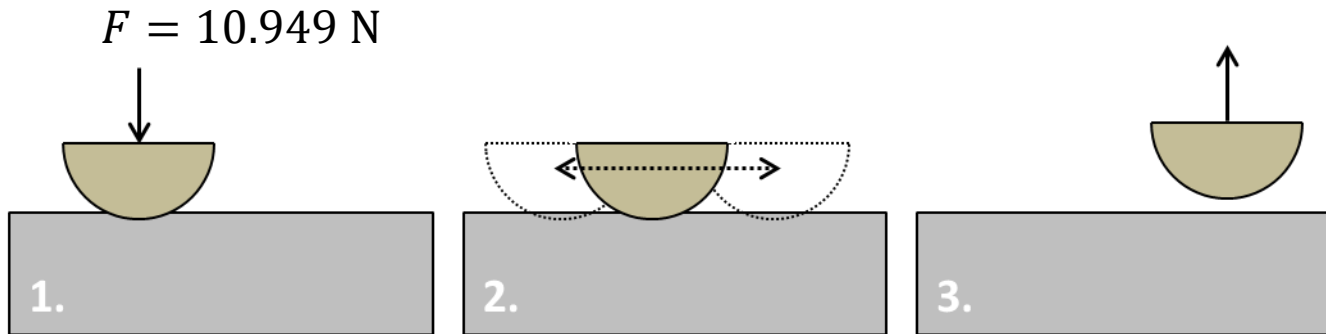
	ocel ČSN 12050	ocel ČSN 15142
suché povrchy	$\mu = 0.437$	$\mu = 0.350$
mazané povrchy	$\mu = 0.139$	$\mu = 0.134$



- křivka zpevnění pro elastoplastický materiál podložky

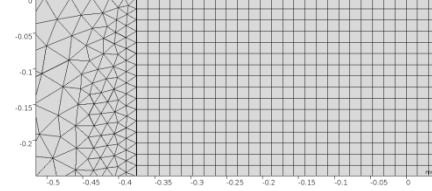
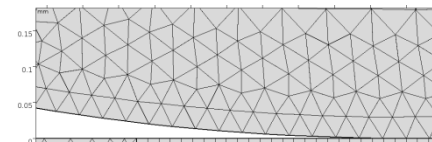
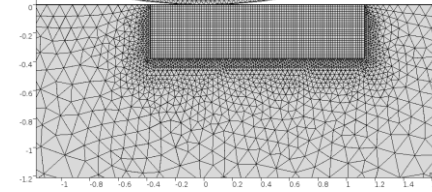
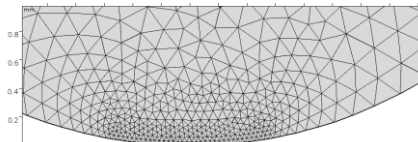
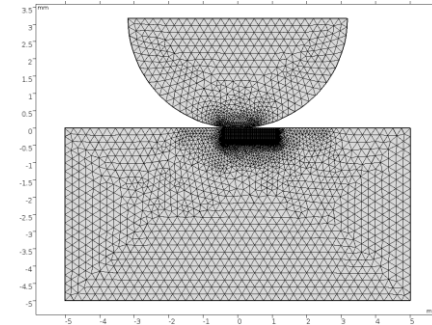
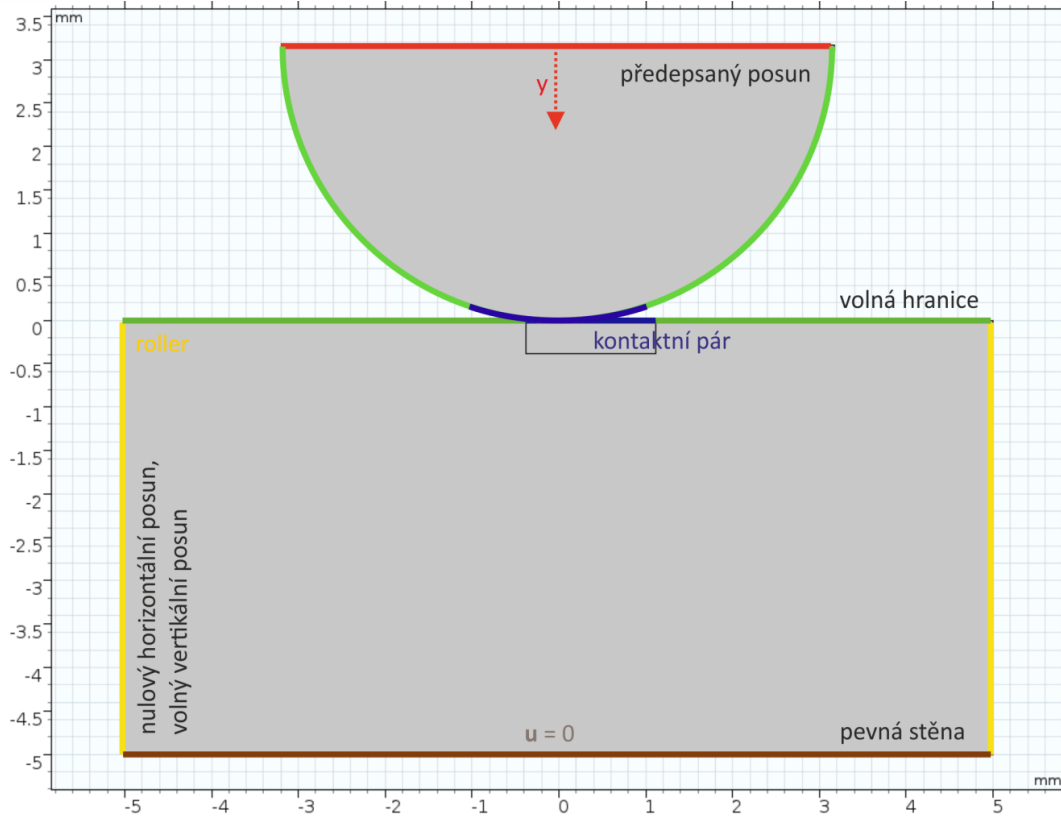
	ocel ČSN 12050	ocel ČSN 15142
Youngův modul pružnosti $E$	$E = 221 \text{ GPa}$	$E = 216 \text{ GPa}$
Poissonovo číslo	$\nu = 0.3$	$\nu = 0.3$
Počáteční mez kluzu	$\sigma_{k0} = 305 \text{ MPa}$	$\sigma_{k0} = 559 \text{ MPa}$
Lineární koeficient zpevnění	$H = 0$	$H = 0$
Saturační mez kluzu	$\sigma_{ks} = 780 \text{ MPa}$	$\sigma_{ks} = 1275 \text{ MPa}$
Saturační exponent	$\zeta = 20$	$\zeta = 20$

# Simulace tribologické zkoušky



- délka dráhy průjezdu indentoru = 0.5 mm
- odlehčení: předepsáním posunutí
- 2 modely: 2D; 3D symetrický

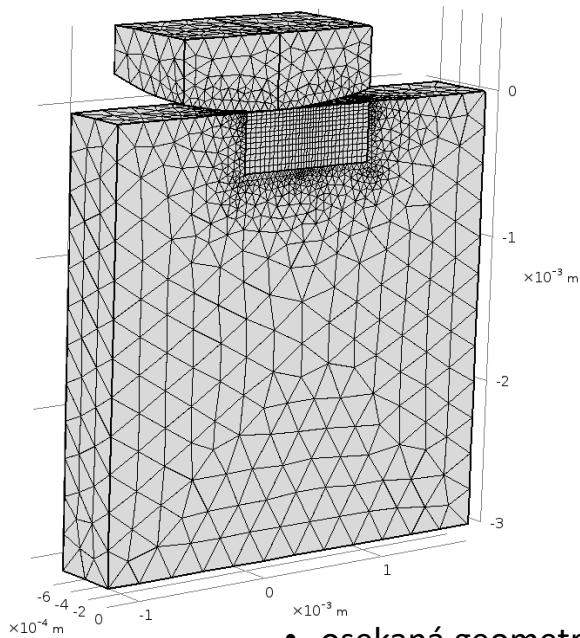
# 2D úloha



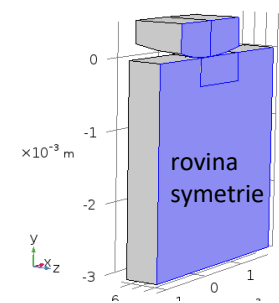
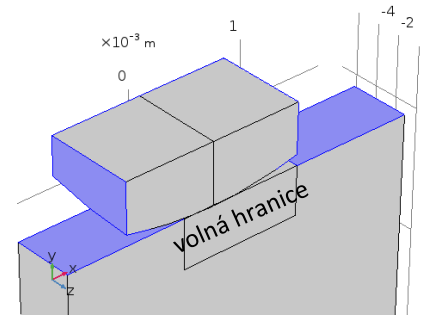
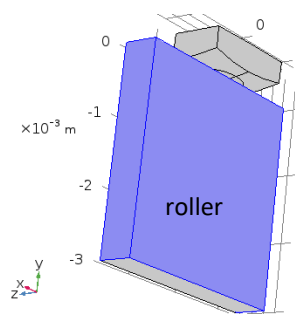
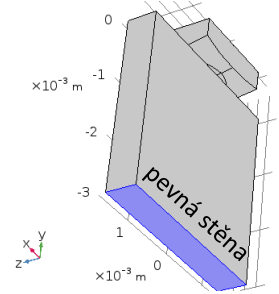
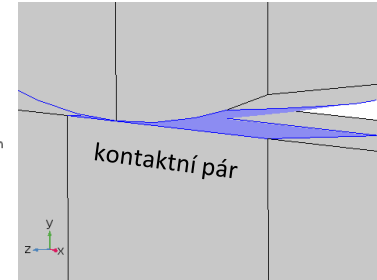
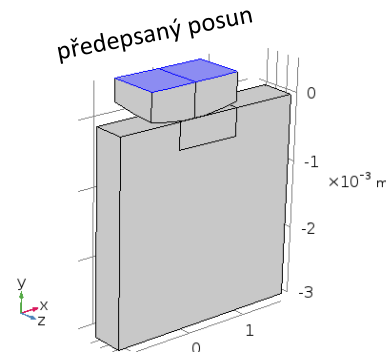
	hodnota	jednotka
poloměr indentoru	3.175	mm
šířka podložky	10	mm
výška podložky	5	mm
y indentační hloubka pro ocel ČSN 12050	2.694	μm
y indentační hloubka pro ocel ČSN 15142	2.4828	μm

- 8700 elm, 295 000 dof

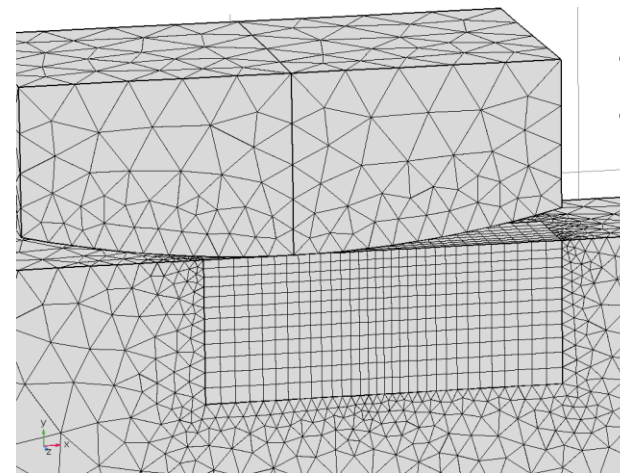
# 3D úloha



- ošekaná geometrie
- snaha snížit velikost úlohy



		hodnota	jednotka
	poloměr indentoru	3.175	mm
	šířka podložky	3	mm
	výška podložky	5	mm
	hloubka podložky (polovina)	0.5	mm
y	indentační hloubka pro ocel ČSN 12050	1.2	μm
y	indentační hloubka pro ocel ČSN 15142	1.0886	μm

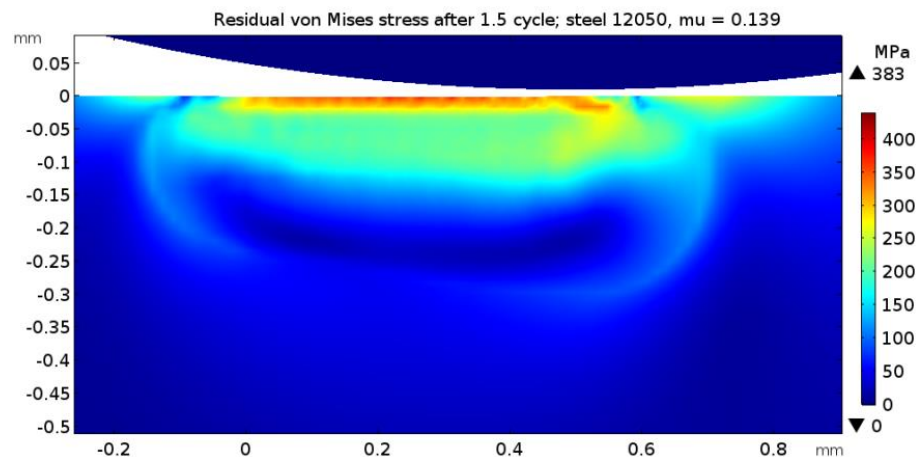
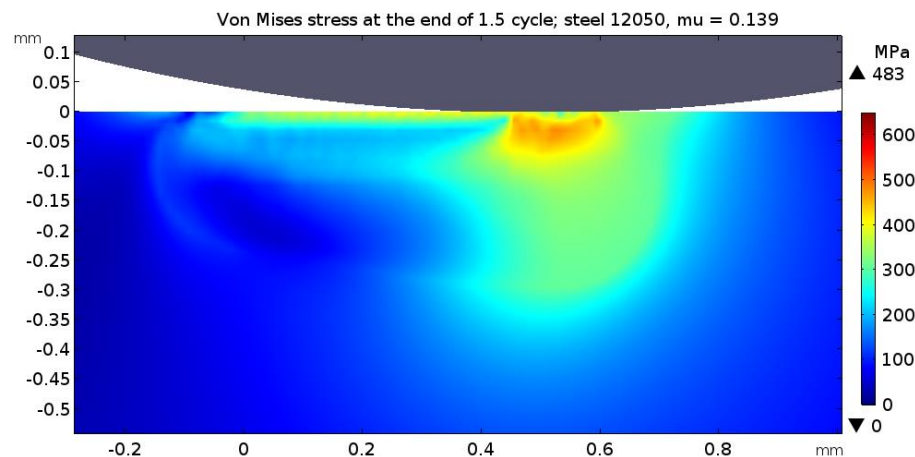
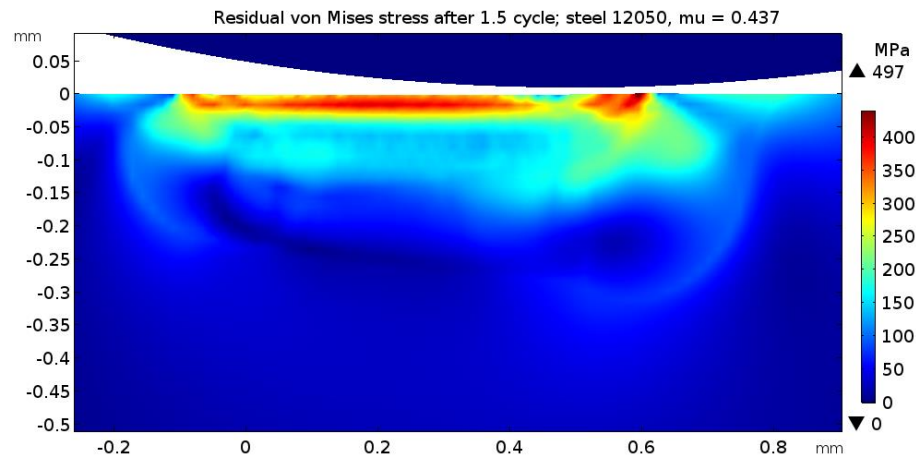
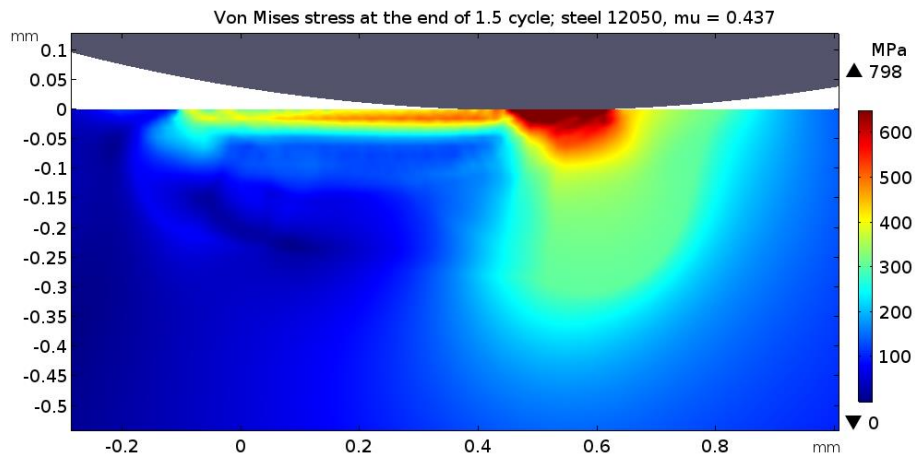


- 31 000 elm
- 2 698 000 dof



# Implementace COMSOL

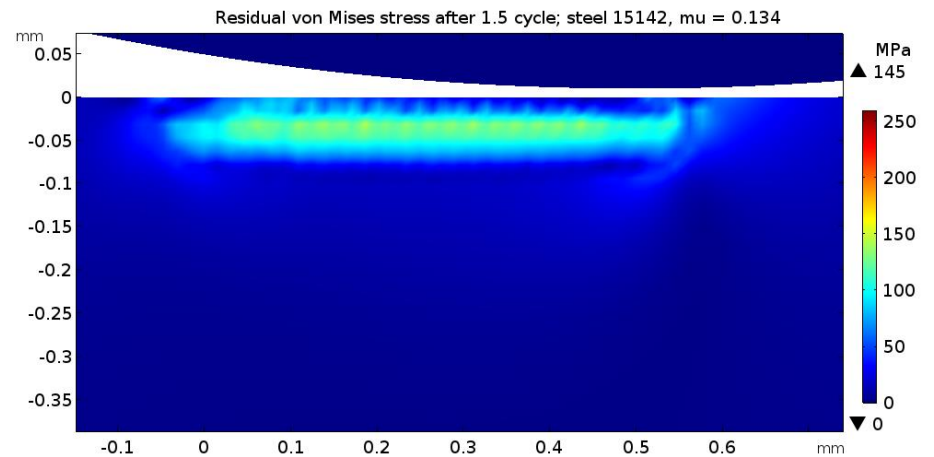
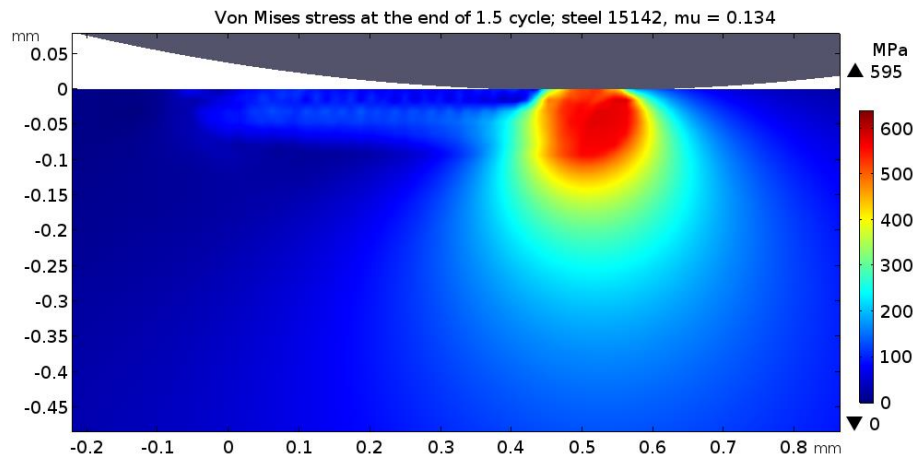
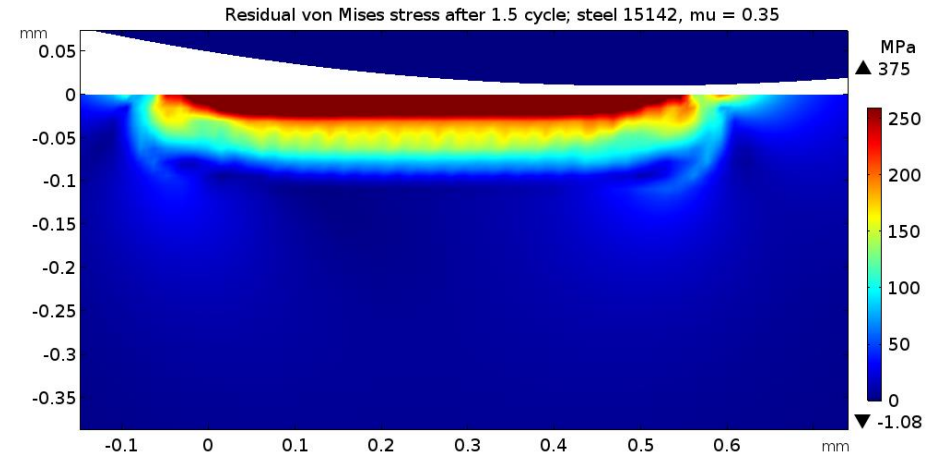
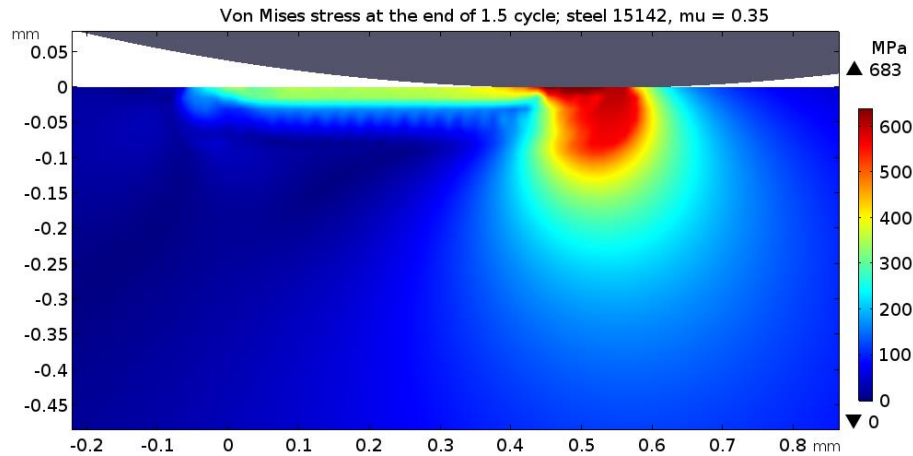
- verze 5.3a
- moduly:
  - Structural Mechanics (lineární elasticita, kontakt)
  - Nonlinear Structural Materials (plasticita, kontakt)
- délka dráhy průjezdu indentoru = 0.5 mm pomocí auxiliary sweep s krokem = 0.0025 mm
- přes veškerou snahu se nám nepodařilo přinutit variantu síla + pohyb ke konvergenci
  - nahrazení působící síly posunutím taky, aby reakční síla odpovídala požadované přitlačné síle (řešením stacionární úlohy zatlačení indentoru)
- pro řešení lineárního systému je použit přímý řešič pro řídké matice PARDISO [1] s možností OpenMP paralelizace na serverové výpočetní stanici se sdílenou pamětí
- výpočet jednoho průjezdu indentoru trvá
  - pro 2D případ na jednom jádře cca 16 minut
  - pro 3D případ s využitím 6 CPU jader 6-8 hodin
- celkem byly realizovány numerické simulace v souhrnné délce cca 1100 jádro-hodin



Von Misesovo napětí na konci 1,5 cyklu.

Zbytkové von Misesovo napětí po odlehčení na konci 1,5 cyklu.

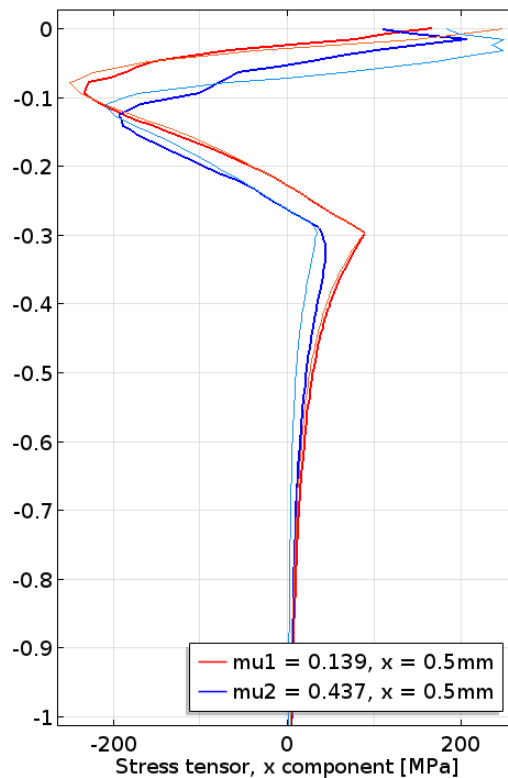
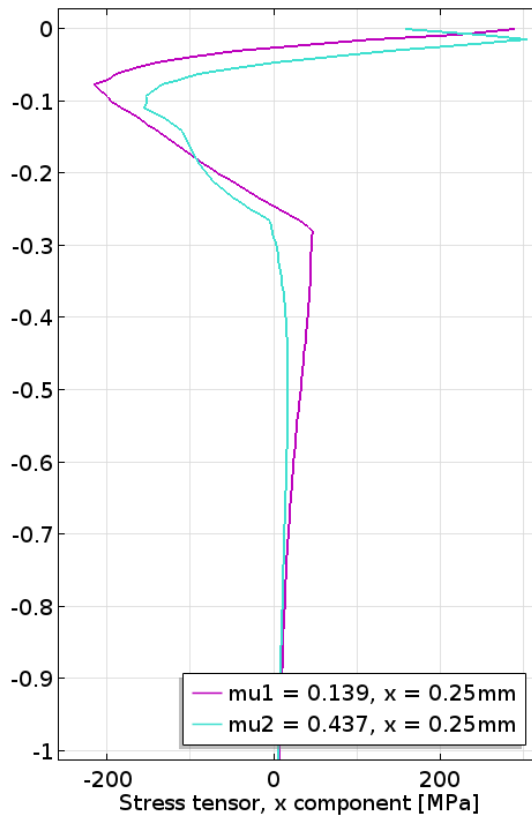
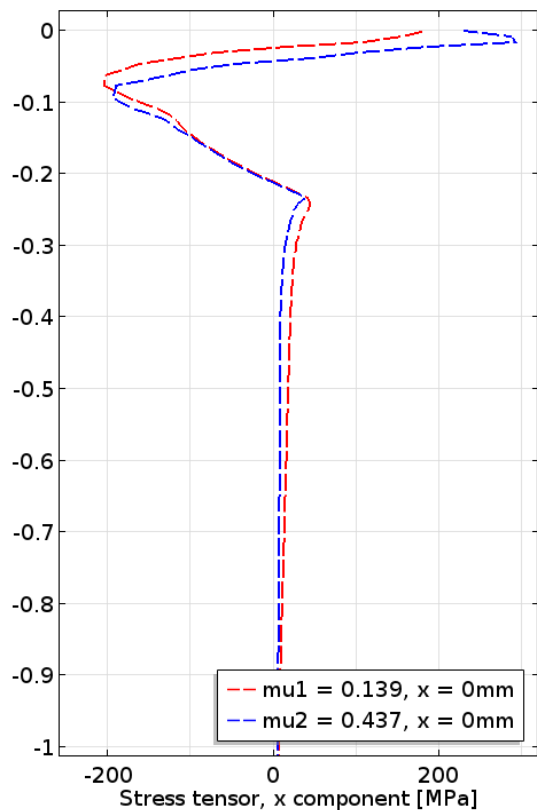
*Nahoře: pro suchý povrch. Dole: pro mazaný povrch.*



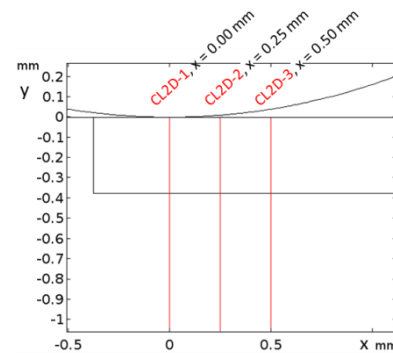
Von Misesovo napětí na konci 1,5 cyklu.

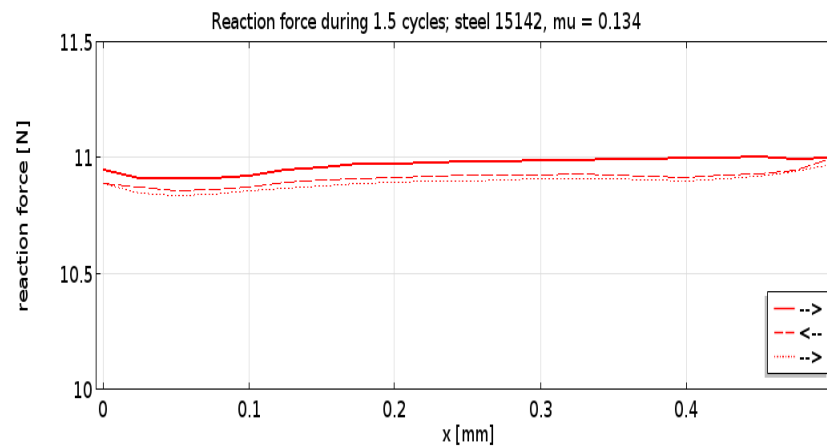
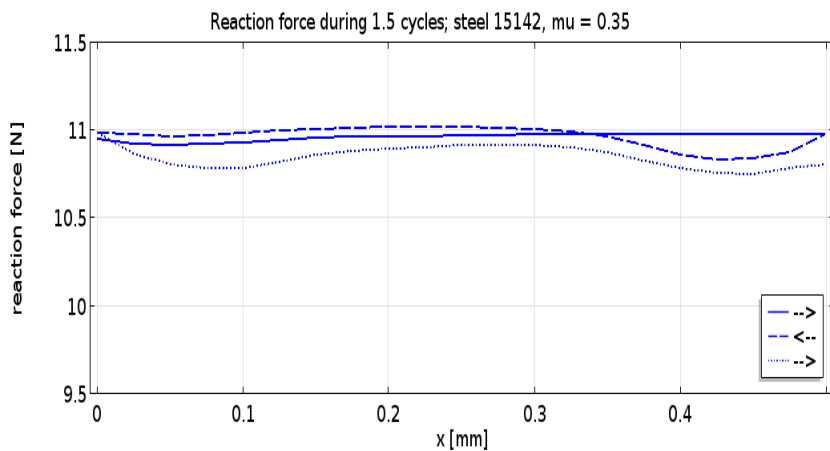
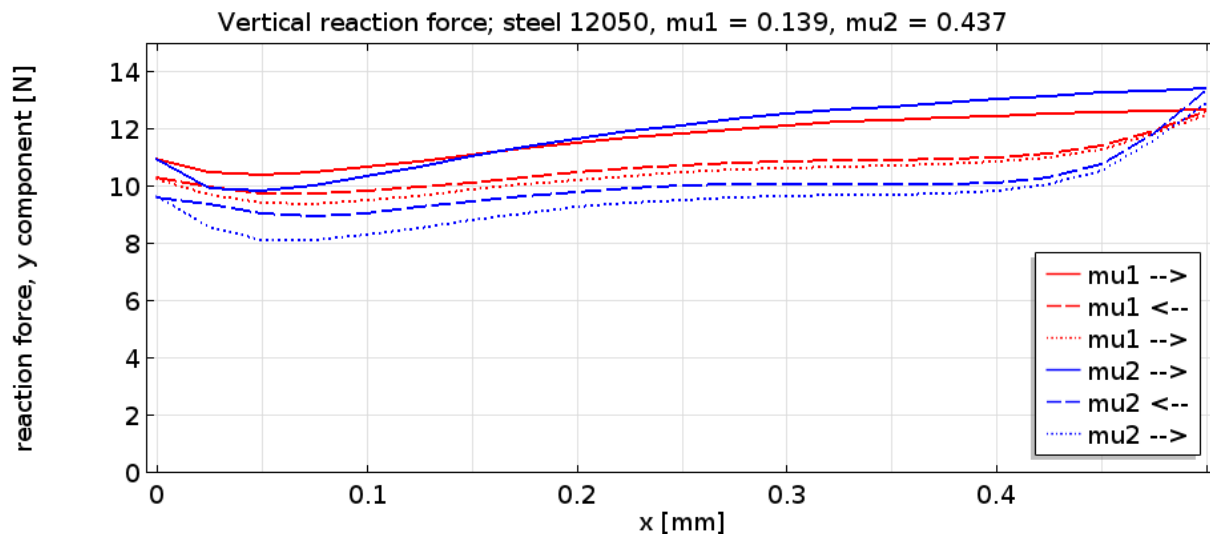
Zbytkové von Misesovo napětí po odlehčení na konci 1,5 cyklu.

*Nahoře: pro suchý povrch. Dole: pro mazaný povrch.*

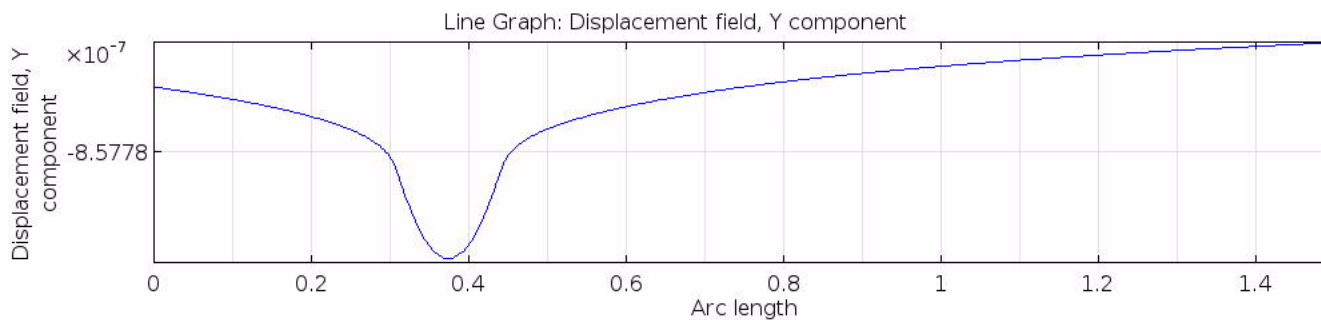
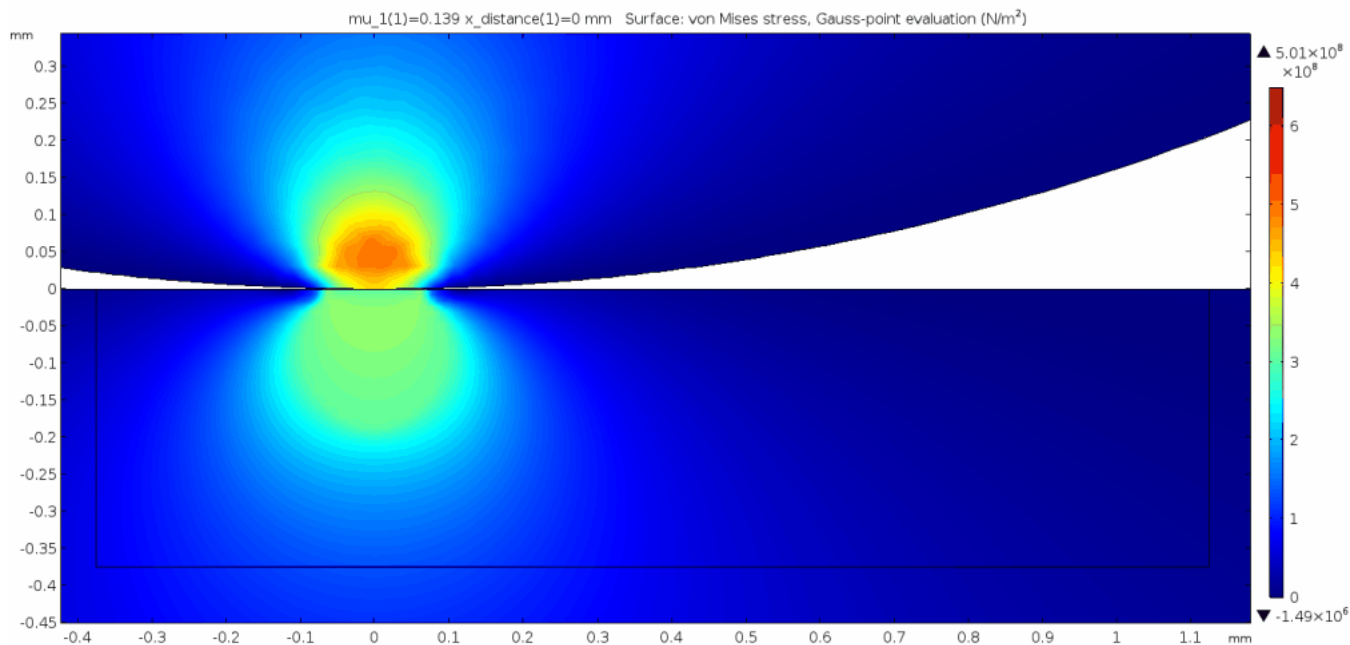


Vertikální profily horizontální složky zbytkového napětí ( $\sigma_x$ ) po odlehčení na konci 1,5 cyklu, ocel ČSN 12050. Odstíny modré: pro suchý povrch. Odstíny červené: pro mazaný povrch.



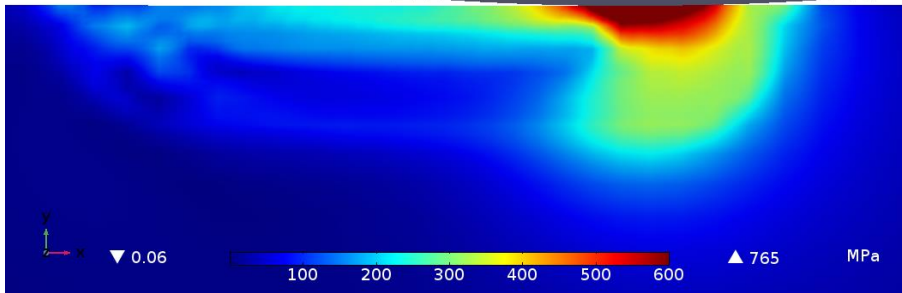


Průběh reakční síly během jednotlivých cyklů. Modře: pro suchý povrch. Červeně: pro mazaný povrch.

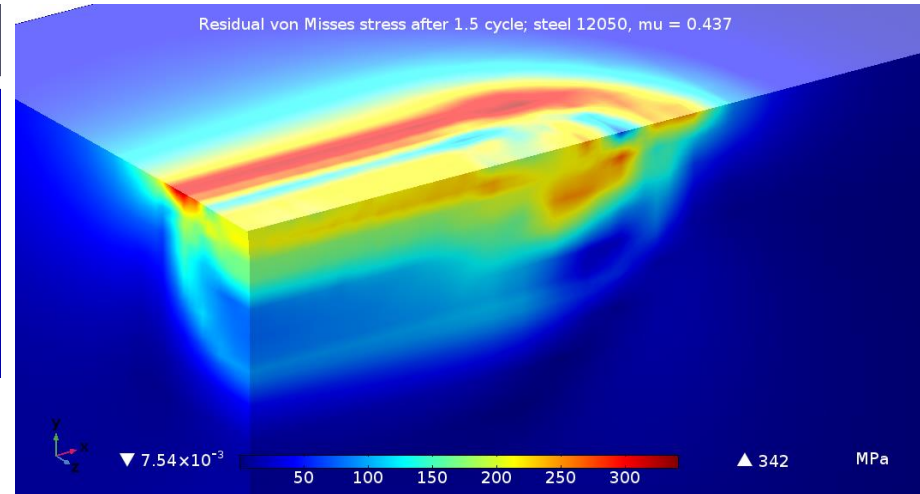


# výsledky 3D

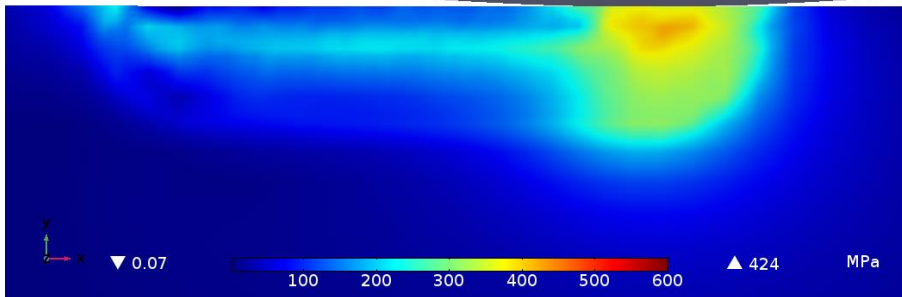
Von Mises stress at the end of 1.5 cycle; steel 12050,  $\mu = 0.437$



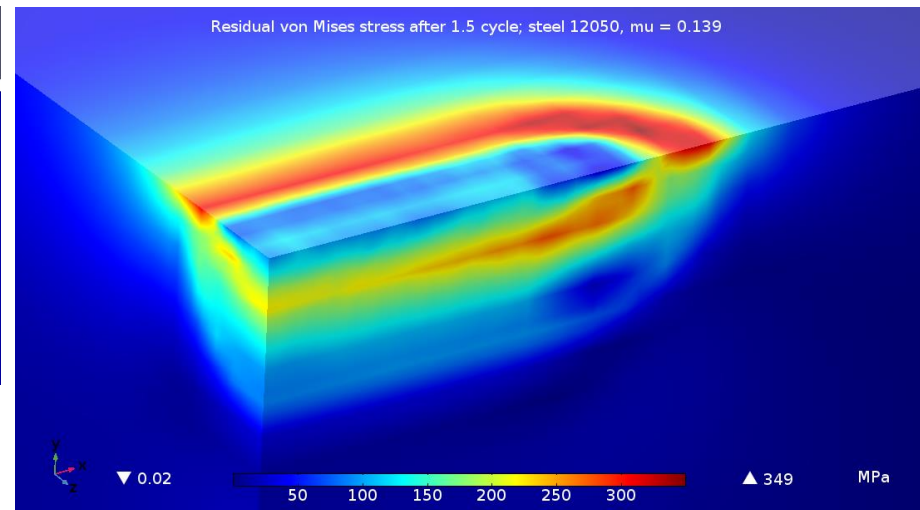
Residual von Mises stress after 1.5 cycle; steel 12050,  $\mu = 0.437$



Von Mises stress at the end of 1.5 cycle; steel 12050,  $\mu = 0.139$



Residual von Mises stress after 1.5 cycle; steel 12050,  $\mu = 0.139$

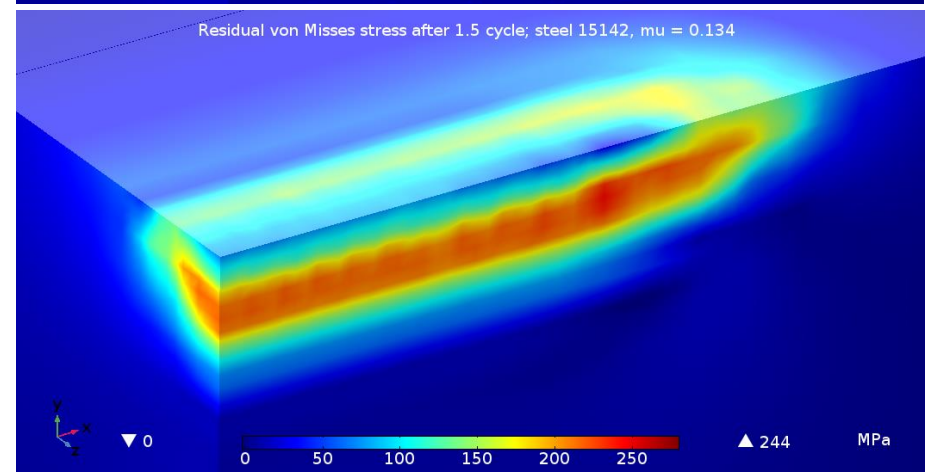
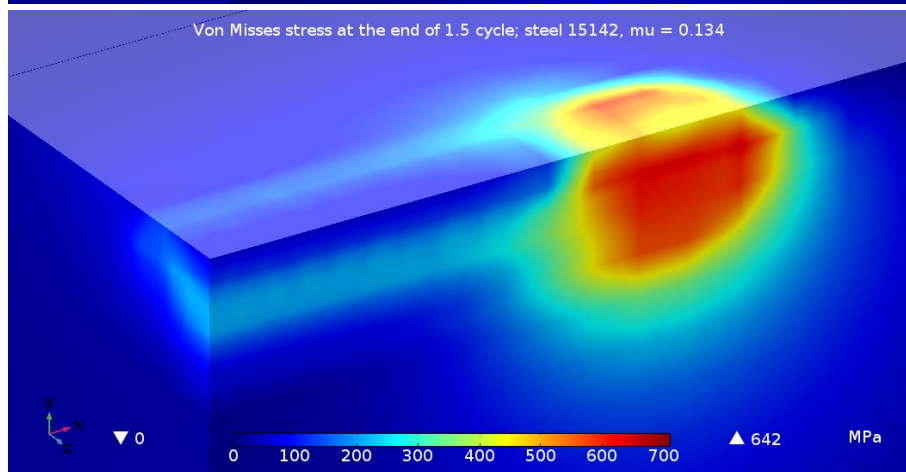
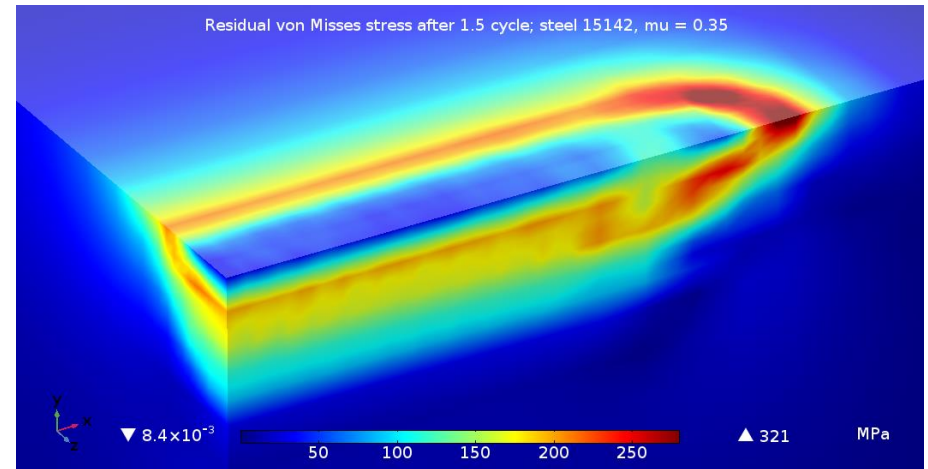
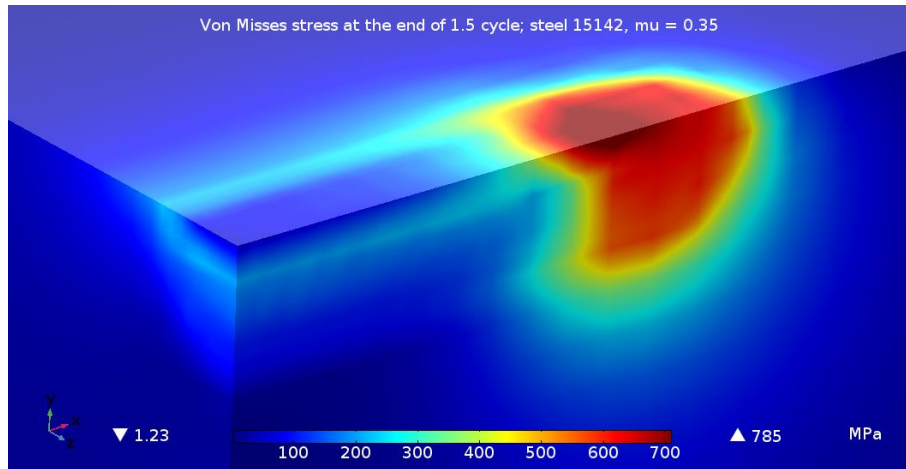


Von Misesovo napětí na konci 1,5 cyklu.

*Nahoře: pro suchý povrch. Dole: pro mazaný povrch.*

Zbytkové von Misesovo napětí po odlehčení na konci 1,5 cyklu.



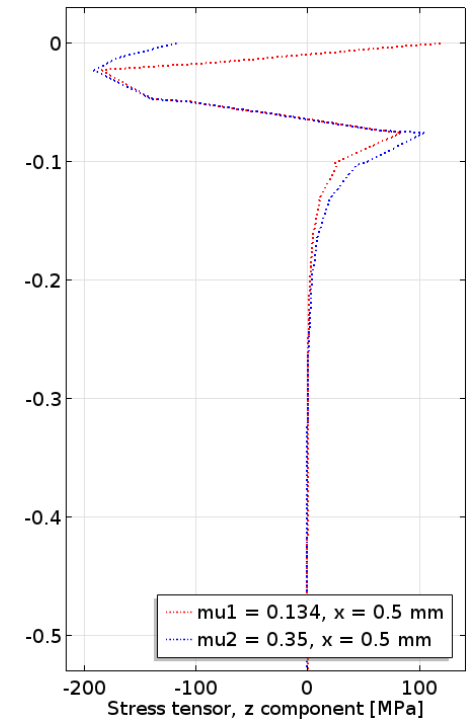
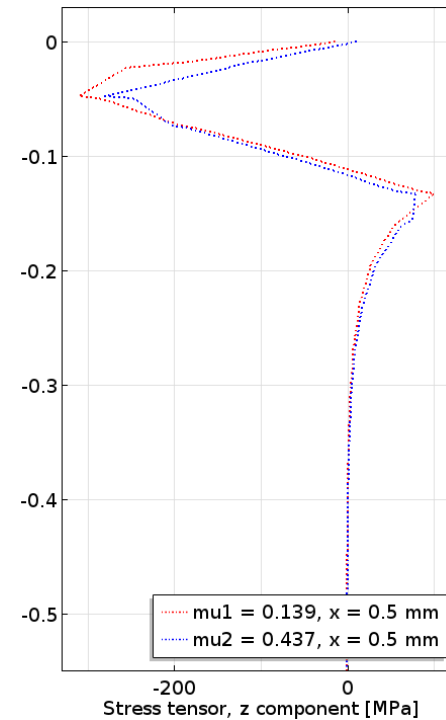
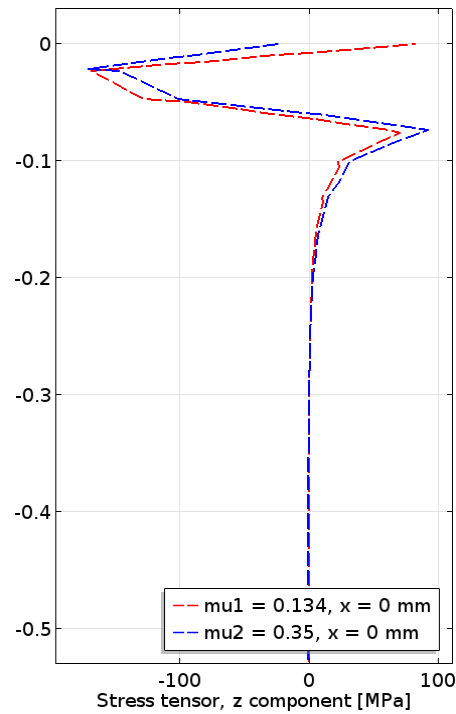
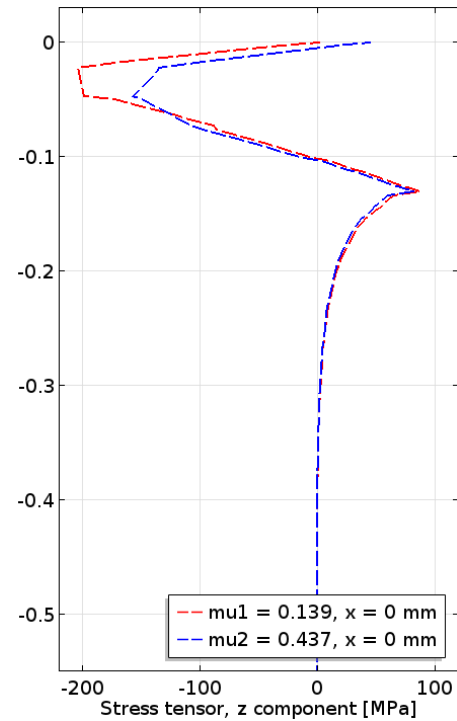


Von Misesovo napětí na konci 1,5 cyklu.

Zbytkové von Misesovo napětí po odlehčení na konci 1,5 cyklu.

*Nahoře: pro suchý povrch. Dole: pro mazaný povrch.*

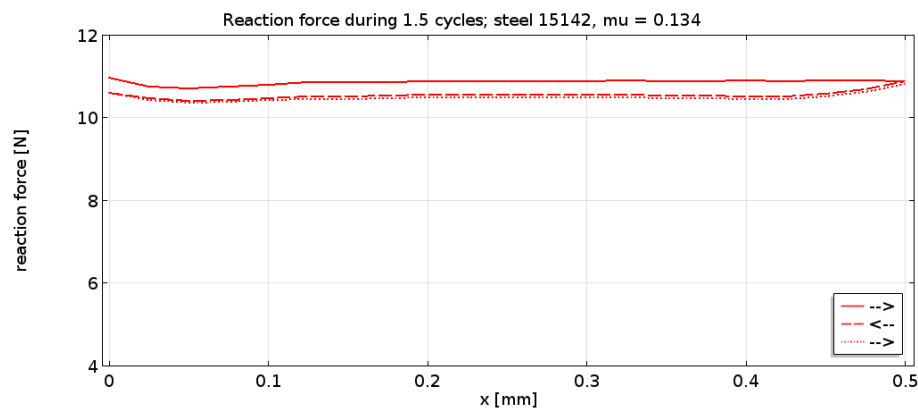
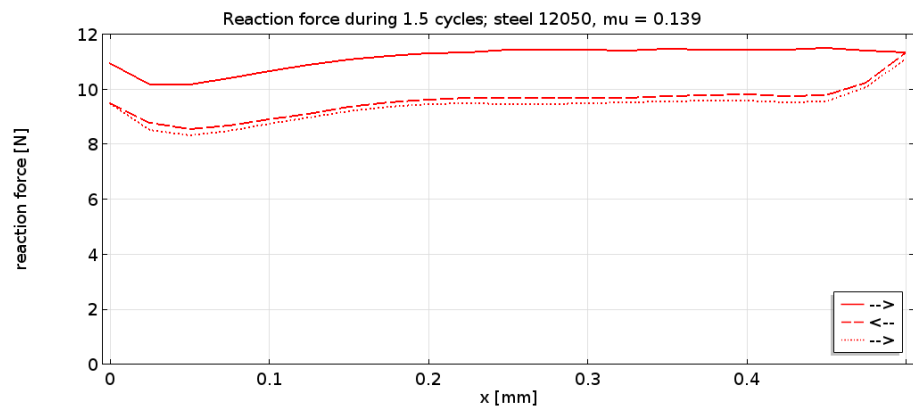




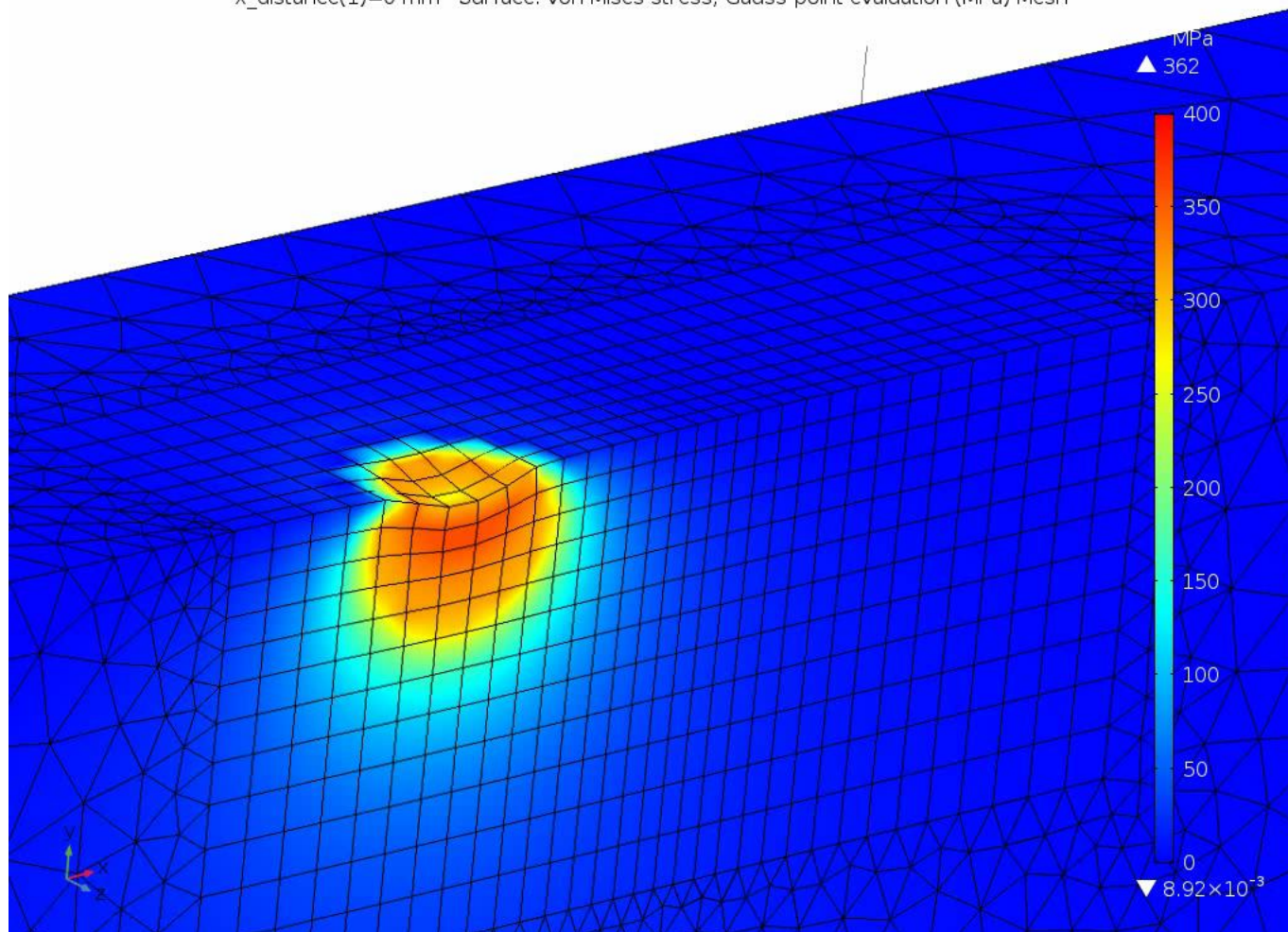
ocel ČSN 12050 / ocel ČSN 15142

odstíny modré: pro suchý povrch. Odstíny červené: pro mazaný povrch





x\_distance(1)=0 mm Surface: von Mises stress, Gauss-point evaluation (MPa) Mesh



# Poznámky na závěr

- model dává očekávané výsledky
- dochází k výrazným plastickým deformacím a vzniku reziduálních napěťových polí
- u suchých povrchu výraznější, tam navíc kromě míst pod indentorem i na okrajích drážky
- validace měřením omezená (model mnohem podrobnější než nejpřesnější měřicí metoda)
- zjednodušující předpoklady
  - elastický indentor, model zpevnění u podložky
  - zahrnutý jen malé deformace
  - použití hloubky zatlačení místo přitlačné síly – ta se pak v průběhu pohybu indentoru lehce mění