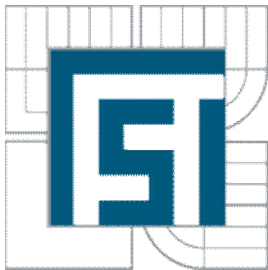




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A**  
**BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

**STUDIE VLIVU PROCESNÍCH PARAMETRŮ PŘI**  
**DOPŘEDNÉM PROTLAČOVÁNÍ NA VZNIK**  
**CENTRÁLNÍCH TRHLIN V PRŮTLAČKU**

INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS IN FORWARD EXTRUSION ON THE INITIATION OF  
CHEVRON CRACKS IN MATERIAL

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. ZBYNĚK MUSIL**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**prof. Ing. JINDŘICH PETRUŠKA, CSc.**

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Zbyněk Musil

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Inženýrská mechanika a biomechanika (3901T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Studie vlivu procesních parametrů při dopředném protlačování na vznik centrálních trhlin v průtlačku**

v anglickém jazyce:

### **Influence of process parameters in forward extrusion on the initiation of chevron cracks in material**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pomocí výpočtového modelování (velké deformace, plasticita, kontakt) stanovte vliv základních procesních parametrů (tření, velikosti redukce, redukčního úhlu, materiálu) na nebezpečí vzniku vnitřních trhlin při dopředném protlačování za studena. Proveďte literární rešerši a srovnajte výsledky numerických výpočtů s dostupnými literárními prameny.

Cíle diplomové práce:

Vytvoření metodiky pro tvorbu přehledných procesních map, umožňujících rychlé stanovení parametrů procesu protlačování bez porušení materiálu centrální trhlínou. Ilustrace tvorby uvedené mapy pro vybraný rozsah procesních parametrů.

Seznam odborné literatury:

Skalka, P. a kol: Numerical prediction of central bursting in axisymmetric cold drawing of brass bar, Proc. of Engineering Mechanics, Svratka, 2007

Saanouni K., Mariage J.F., Cheroaut A., Lestriez P.: Numerical prediction of discontinuous central bursting in axisymmetric forward extrusion by continuum damage mechanics, Comp. Struct. 82 (2004), 2309-2332

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 19.11.2009

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá studií vlivu procesních parametrů při dopředném protlačování na vznik centrálních trhlin v průtlačku pomocí výpočtového modelování. Výpočet byl proveden v programu ANSYS 11 a byl stanoven vliv tření, redukčního úhlu, redukce průřezu a počtu protlačovacích operací pro ocel 12 050.3 dle vybraných kritérií.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Výpočtová simulace, dopředné protlačování, vznik centrálních trhlin

## **ABSTRACT**

This Master's thesis deals with the influence of process parameters in forward extrusion on the initiation of chevron cracks in material by numerical simulation. Solution was executed by ANSYS 11 and the influence of friction, angle of reduction, reduction and numbers of extrusion operations was solved for the 12 050.3 steel by the chosen conditions.

## **KEYWORDS**

Numerical simulation, forward extrusion, initiation of chevron cracks

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MUSIL, Z. *Studie vlivu procesních parametrů při dopředném protlačování na vznik centrálních trhlin v průtlačku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 51 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že tuto diplomovou práci sem vypracoval sám pod vedením svého vedoucího diplomové práce pana prof. Ing. Jindřicha Petrušky, CSc. s využitím uvedené literatury.

Brno 2010

.....

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat prof. Ing. Jindřichu Petruškovi, CSc. za cenné rady a připomínky při řešení a psaní této diplomové práce.

## OBSAH

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2. POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE</b> .....	<b>11</b>
<b>3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ</b> .....	<b>11</b>
3.1. FORMULACE PROBLÉMU.....	11
3.2. CÍLE ŘEŠENÍ .....	11
<b>4. SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN</b> .....	<b>12</b>
<b>5. KRITÉRIA PORUŠOVÁNÍ</b> .....	<b>13</b>
5.1. KRITÉRIUM REDUKOVANÉHO PŘETVOŘENÍ.....	13
5.2. KRITÉRIUM COCKCROFT-LATHAM-OH .....	13
5.3. KRITÉRIUM RICE-TRACEY.....	13
5.4. KRITÉRIUM RTCL .....	14
5.5. KRITICKÉ HODNOTY KRITÉRIÍ.....	14
<b>6. TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU</b> .....	<b>15</b>
6.1. MODEL MATERIÁLU .....	15
6.1.1. <i>Definice křivky napětí-přetvoření</i> .....	15
6.1.2. <i>Použitý model materiálu</i> .....	16
6.2. MODEL GEOMETRIE .....	17
6.2.1. <i>Diskretizace modelu geometrie</i> .....	18
6.3. MODEL VAZEB.....	20
6.4. MODEL KONTAKTU .....	20
<b>7. METODA ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>21</b>
<b>8. SIMULACE PROTLAČOVÁNÍ</b> .....	<b>22</b>
8.1. DEFORMAČNĚ-NAPĚŤOVÁ ANALÝZA PROTLAČOVÁNÍ .....	22
8.2. SROVNÁNÍ KRITÉRIÍ PORUŠOVÁNÍ.....	24
<b>9. STUDIE VLIVU TŘENÍ</b> .....	<b>25</b>
<b>10. STUDIE VLIVU REDUKČNÍHO ÚHLU A REDUKCE PRŮŘEZU</b> .....	<b>27</b>
10.1. VLIV REDUKČNÍHO ÚHLU .....	27
10.2. VLIV REDUKCE PRŮŘEZU .....	29
10.3. KRITÉRIA JAKO FUNKCE REDUKČNÍHO ÚHLU A REDUKCE PRŮŘEZU .....	31
<b>11. STUDIE VLIVU VÍCE OPERACÍ</b> .....	<b>35</b>
11.1. PRŮBĚH KRITÉRIÍ PŘI PROTLAČENÍ NA VÍCE OPERACÍ.....	35



11.2. KRITÉRIA JAKO FUNKCE REDUKČNÍHO ÚHLU A REDUKCE PRŮŘEZU PŘI VÍCE OPERACÍCH .....	37
<b>12. ZÁVISLOSTI BEZPEČNÉHO PROTLAČOVÁNÍ PODLE SLEDOVANÝCH KRITÉRIÍ.....</b>	<b>40</b>
<b>13. SIMULACE PROTLAČOVÁNÍ KONKRÉTNÍ SOUČÁSTI .....</b>	<b>42</b>
13.1. PARAMETRY SOUČÁSTI .....	42
13.2. VÝSLEDNÉ HODNOTY PRO TESTOVANOU SOUČÁST .....	44
<b>14. ZÁVĚR .....</b>	<b>47</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>48</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>49</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>51</b>

## 1. ÚVOD

Tváření kovů patří mezi progresivní strojírenské technologie. Vedle velké úspory materiálů podstatně zvyšuje produktivitu práce snižováním pracnosti a zkracováním výrobních cyklů, které příznivě snižuje výrobní náklady.

Tvářením se vyrábějí ty výrobky, jejichž výroba jiným způsobem by byla obtížná nebo drahá. Potřebných tvarů se dosahuje různými způsoby válcování, kování, protlačování, tažení, ohýbání, ražení, stříhání, tlačení jinými.

Mechanické vlastnosti kovů a slitin tváření zlepšuje. Zvyšuje se pevnost, struktura materiálu se zjemňuje uzavírají se mikroskopické dutinky. Vhodným postupem při výrobě je možno zlepšit vlastnosti ve směru, kde bude součástka nejvíc namáhána.

Při protlačování za studena je přeměna výchozího tvaru polotovaru na součást požadovaného tvaru působením tlaku lisu. Protlačováním se vyrábějí plné i duté součásti, nejčastěji rotačního tvaru. Protože napětí působící při protlačování jsou převážně tlaková, tvárnost kovu se zvyšuje a lze dosáhnout velkých deformací v jedné tvářecí operaci. Přetvárný odpor je velký, proto protlačování vyžaduje velkých tvářecích sil.

Tato práce se zabývá dopředným protlačováním těles plného kruhového průřezu za studena a možností vzniku centrálních trhlin v průtlačku. Dopředným protlačováním za studena se rozumí, že materiál teče ve směru pohybu průtlačku a teplota protlačování je pod rekryalizační teplotou.

V průtlačku vznikají v důsledku nehomogenity plastické deformace významná tahová napětí, která mohou způsobit vznik vnitřních trhlin na ose průtlačku. Hlavním cílem této práce je pomocí výpočtového modelování stanovit vlivy základních procesních parametrů na nebezpečí vzniku těchto trhlin.

## 2. POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE

Výskyt osových trhlin není častý jde však o defekty nebezpečné, zjistitelné pouze zkouškami ultrazvukem nebo rentgenem. Osový defekt se objeví zpravidla při malých redukcích u víceoperačního tvářecího postupu, kde je tato operace zařazena jako konečná. Dalšími iniciátory těchto vad jsou větší redukční úhly, větší povrchové tření a malé zpevňovací kapacity materiálu.

Bylo zjištěno, že vnitřní vady průtlačků mají tvar hrotu šípů se špičkou orientovanou ve směru toku materiálu a nalézají se zpravidla na jejich ose. Na vzniku těchto trhlin se podílí tahová napjatost, která souvisí s nehomogennou deformací na ose průtlačku.

Velmi praktickým prostředkem předpovědi podmínek za kterých vznikají tyto defekty jsou limitní diagramy obsahující mezní křivky, které vymezují oblast dobrých průtlačků od oblasti průtlačků s vadami.

## 3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ

### 3.1. Formulace problému

Pomocí výpočtového modelování (velké deformace, plasticita, kontakt) stanovte vliv základních procesních parametrů (tření, velikosti redukce, redukčního úhlu, materiálu) na nebezpečí vzniku vnitřních trhlin při dopředném protlačování za studena. Proveďte literární rešerši a srovnajte výsledky numerických výpočtů s dostupnými literárními prameny.

### 3.2. Cíle řešení

Vytvoření metodiky pro tvorbu přehledných procesních map, umožňujících rychlé stanovení parametrů procesu protlačování bez porušení materiálu centrální trhlínou. Ilustrace tvorby uvedené mapy pro vybraný rozsah procesních parametrů.

#### 4. SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN

**Objekt: průtlaček**

**S0 – Okolí objektu:**

- průtlačnice

**S1 – Geometrie a topologie objektu:**

- rozměry průtlačku a průtlačnice
- vzájemná poloha průtlačku a průtlačnice

**S2 – Podstatné vazby objektu k okolí:**

- kontakt průtlačnice-průtlaček, koeficient tření

**S3 – Aktivace objektu z okolí:**

- deformační zatížení v podobě posuvů

**S4 – Ovlivňování objektu z okolí:**

- velikost redukce a redukčního úhlu
- počet zatěžovacích kroků
- tření

**S5 – Vlastnosti prvků struktury:**

- materiálové vlastnosti
- tuhost kontaktu

**S6 – Procesy a stavy:**

- deformačně-napěťové stavy

**S7 – Projevy chování objektu:**

- změna tvaru objektu
- možnost vzniku trhlin v objektu

**S8 – Důsledky projevů:**

- životnost průtlačku

Známé jsou příčiny, neznámé jsou důsledky. Jedná se o přímý problém.

## 5. KRITÉRIA PORUŠOVÁNÍ

Pro posouzení nebezpečnosti vzniku centrálních trhlin byly použity následující kritéria.

### 5.1. Kritérium redukovaného přetvoření

Podle tohoto kritéria tvárné porušení nastane v okamžiku, kdy redukované přetvoření v daném místě dosáhne kritické hodnoty

$$\bar{e} = \bar{e}_f. \quad (1)$$

### 5.2. Kritérium Cockcroft-Latham-Oh

Podle kritéria Cockcroft-Latham [4] dojde k porušení, když integrál redukovaného přetvoření vynásobený prvním hlavním napětím  $s_1$  dosáhne své kritické hodnoty

$$\int_0^{\bar{e}_f} \langle s_1 \rangle d\bar{e} = C_{CL}, \quad (2)$$

kde výraz  $\langle s_1 \rangle$  je při záporné hodnotě  $s_1$  nulový a při kladné hodnotě roven  $s_1$ .

Oh [5] modifikoval toto kritérium tím, že první hlavní napětí  $s_1$  normalizoval redukovaným napětím  $\bar{s}$

$$\int_0^{\bar{e}_f} \frac{\langle s_1 \rangle}{\bar{s}} d\bar{e} = C_{CLO}. \quad (3)$$

### 5.3. Kritérium Rice-Tracey

Podle kritéria Rice-Tracey [6] dojde k porušení, když následující vztah dosáhne své kritické hodnoty

$$\int_0^{\bar{e}_f} \exp\left(\frac{3}{2}h\right) d\bar{e} = C_{RT}, \quad (4)$$

kde  $h$  je parametr triaxiality

$$h = \frac{s_m}{\bar{s}}. \quad (5)$$

### 5.4. Kritérium RTCL

Törnqvist [7] spojil dvě kritéria, která potřebují pouze jednu materiálovou konstantu, triaxialitu  $h$ , a vykazují dobré výsledky v oblasti tahové (Rice-Tracey) a tlakové (modifikované Cockcroft-Latham-Oh). Modifikaci provedl Wierzbicky a Werner [8] převedením kritéria Cockcroft-Latham-Oh na formu obsahující pouze triaxialitu  $h$ . Kritérium RTCL je tedy popsáno vztahem

$$\int_0^{\bar{e}_f} f(h)_{RTCL} d\bar{e} = C_{RTCL}, \quad (6)$$

kde váhová funkce porušení je definována na třech intervalech

$$f(h)_{RTCL} = \begin{cases} 0 & \text{pro } h \leq -\frac{1}{3} \\ 2 \frac{1+h\sqrt{12-27h^2}}{3h+\sqrt{12-27h^2}} & \text{pro } -\frac{1}{3} < h < \frac{1}{3} \\ \frac{1}{1,65} \exp\left(\frac{3}{2}h\right) & \text{pro } h \geq \frac{1}{3} \end{cases} \quad (7)$$

### 5.5. Kritické hodnoty kritérií

Kalibraci kritických hodnot jednotlivých kritérií pro ocel 12 050.3 provedl Bořkovec ve své disertační práci [3]. Tyto hodnoty budou dále použity jako mezní stavy možného vzniku centrální trhliny v průtláčku pro jednotlivá kritéria.

- Kritérium redukovaného přetvoření:  $\bar{e}_f = 1,42$
- Kritérium Cockcroft-Latham-Oh:  $C_{CLO} = 0,492$
- Kritérium Rice-Tracey:  $C_{RT} = 0,374$
- Kritérium RTCL:  $C_{RTCL} = 0,227$

## 6. TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

Výpočtový model byl vytvořen v MKP systému ANSYS 11.0. Úloha je nelineární z hlediska materiálu, kontaktu i geometrie (velké deformace).

### 6.1. Model materiálu

Výpočtová simulace byla provedena pro ocel 12 050.3. Pro tento materiál byly známy hodnoty z tahové zkoušky a kritické hodnoty pro kritéria porušení.

#### 6.1.1. Definice křivky napětí-přetvoření

Základní materiálový vstup do výpočtu je křivka napětí-přetvoření. Nejčastějším podkladem je přímý výstup z tahové zkoušky, což je křivka  $s - e$  ve smluvních hodnotách. Tyto hodnoty je nejprve nutné převést na skutečná napětí a logaritmická přetvoření.

Přetvoření se nejčastěji určuje tenzometry nebo průtahoměry a vyjadřuje míru přetvoření tělesa. Takzvané inženýrské přetvoření lze pro jednoosou napjatost definovat vztahem

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}, \quad (8)$$

kde  $L$  je deformovaná délka vzorku a  $L_0$  je původní délka vzorku.

Toto přetvoření ale není vhodné pro popis velkých deformací. Pro velké deformace se používá logaritmické neboli skutečné přetvoření, které je definováno přírůstkovým vztahem

$$de = \frac{dL}{L}, \quad (9)$$

z kterého lze integrací z počátečního do koncového stavu získat vztah

$$e = \ln \frac{L}{L_0}. \quad (10)$$

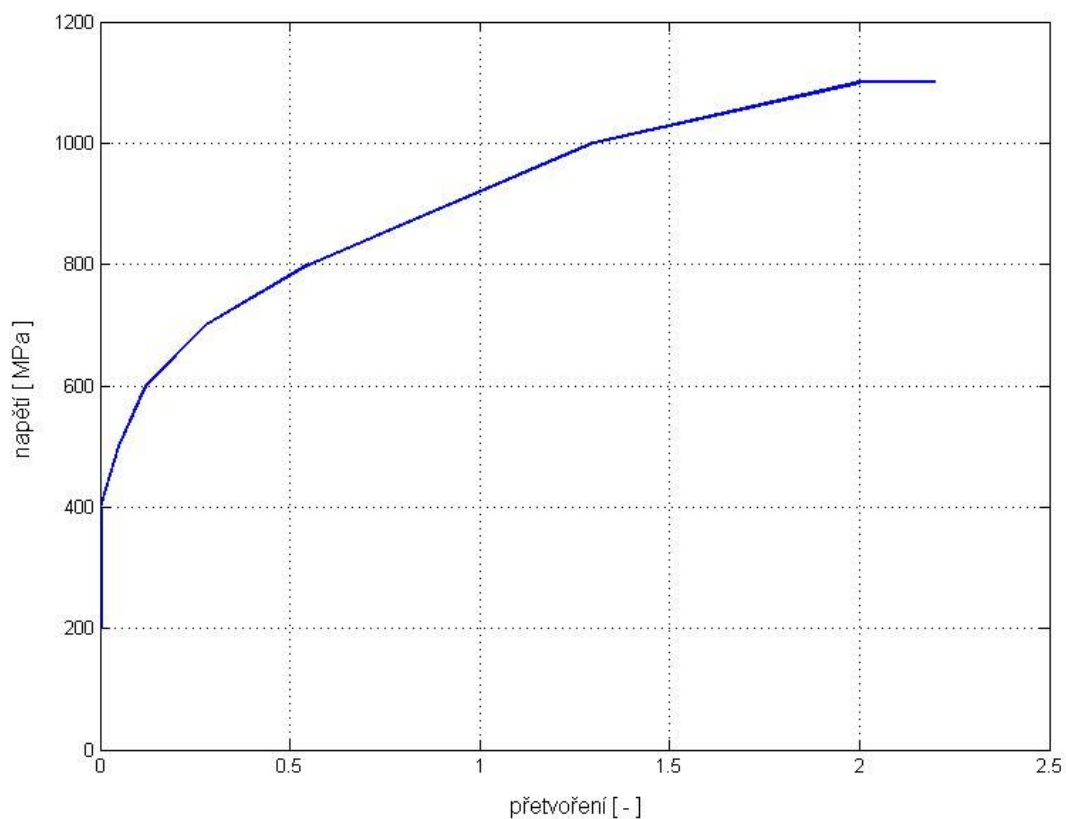
Pokud je deformace rovnoměrná, tedy před vznikem krčku při tahové zkoušce, lze mezi těmito hodnotami převádět vztahy

$$e = \ln(e + 1), \quad (11)$$

$$s = s_{smi}(e + 1). \quad (12)$$

### 6.1.2. Použitý model materiálu

Materiál byl modelován jako elasto-plastický s izotropním zpevněním. Modul pružnosti pro ocel byl použit  $2,1 \cdot 10^5$  Pa a Poissonova konstanta 0,3. Nelinearity byly modelovány multilineární křivkou danou sedmi body.



Obr. 1 Model materiálu



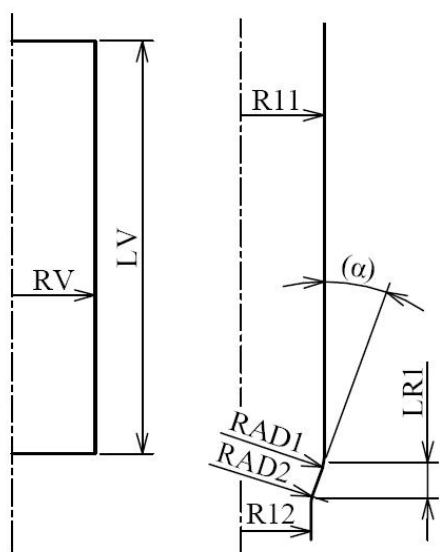
## 6.2. Model geometrie

Jelikož se jedná o rotačně symetrickou součást, byl model vytvořen ve 2D za použití axisymetrie. Celý model byl tvořen parametricky, aby bylo celý výpočet možno provádět opakovaně se změněnými sledovanými parametry.

Průtlaček byl modelován jako obdélník, jehož jedna strana představovala průměr a druhá jeho délku.

Průtlačnice byla modelována jako tuhé těleso pouze pomocí styčných čar ve kterých dochází ke kontaktu s průtlačkem. Tím dochází k značnému zjednodušení úlohy a k časové úspoře během výpočtové simulace. V geometrii průtlačnice má hlavní vliv tvar redukční části. Ten je dán velikostí redukce, redukčního úhlu a přechodovými poloměry.

Byl zkoumán i vliv protlačování na více operací, tudíž byla průtlačnice modelována v některých simulacích vícekrát s různými parametry a v různých polohách vůči průtlačku.



Proměnné parametry v modelu geometrie:

RV – poloměr vzorku

LV – délka vzorku

R11 – poloměr 1 na prvním stupni

R12 – poloměr 2 na prvním stupni

LR1 – délka redukční části na prvním stupni

RAD1 – přechodové zaoblení 1

RAD2 – přechodové zaoblení 2

Obr. 2 Model geometrie

Při analýze protlačování na více kroků bylo použito shodného typu geometrie průtlačnice. Lišily se pouze indexy u řídicích parametrů, aby bylo možné nastavit odlišné hodnoty sledovaných parametrů na každém stupni zvlášť.

Úhel  $a$ , udávaný ve  $^\circ$ , je jedním ze sledovaných parametrů geometrie, není však její řídicí parametr, jeho velikost se řídí přes parametr LR1

$$LR1 = \frac{R11 - R12}{\operatorname{tg} a} \quad (13)$$

Dalším sledovaným parametrem geometrie je velikost redukce dána v procentech. Lze ji udávat jako redukci průměru

$$r_D = \frac{R11 - R12}{R11} \cdot 100, \quad (14)$$

nebo častěji jako redukci průřezu

$$r_S = \frac{R11^2 - R12^2}{R11^2} \cdot 100. \quad (15)$$

### 6.2.1. Diskretizace modelu geometrie

Průtlačnice byla modelována jako tuhé těleso. Její elementy byly vytvořeny přímo z čar její geometrie.

Diskretizace průtlačku na konečnoprvkovou mapovanou síť byla vytvořena parametricky s řídicími parametry:

pp1 – počet prvků po poloměru vzorku

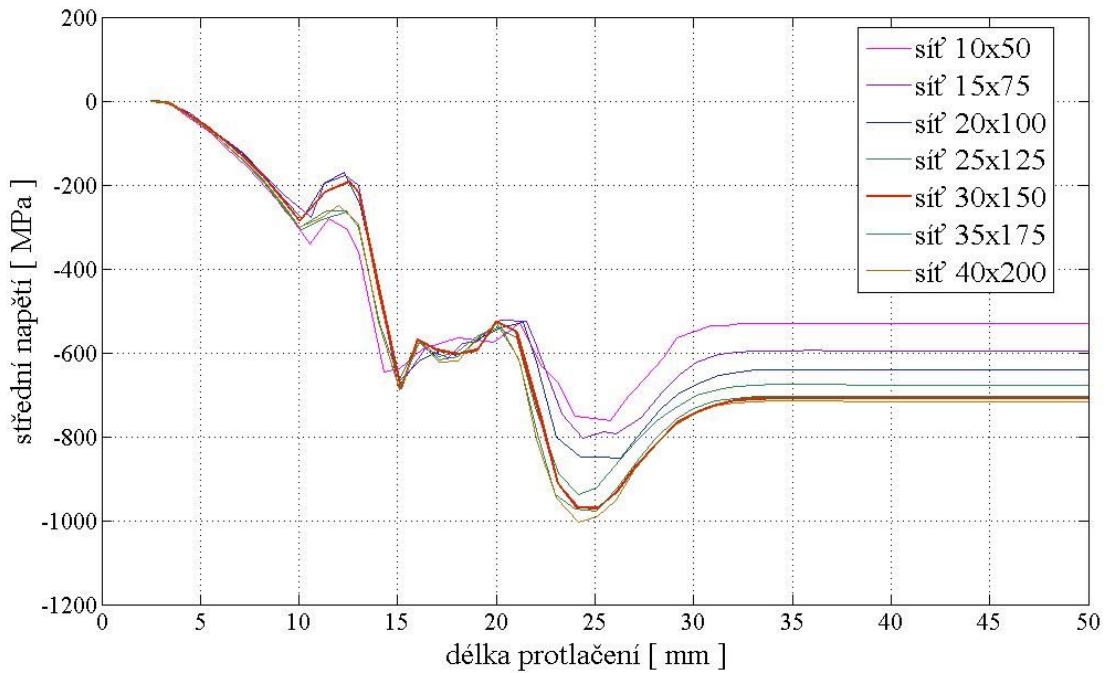
pp2 – počet prvků po délce vzorku

Simulace byla provedena s několika různými typy sítí a byly sledovány rozdíly mezi výsledky jednotlivých výpočtů.

Sítě byly vytvořeny mapovaně a bylo odzkoušeno sedm typů sítí z různou hustotou. Každé zhuštění sítě vede k zpřesnění výpočtu ale také k výraznému prodloužení času simulace. Z důvodu velkého množství opakování výpočtu je vhodné najít takovou hustotu sítě, s kterou budou výsledky dostatečně přesné a výpočet nebude nadměrně časově náročný.

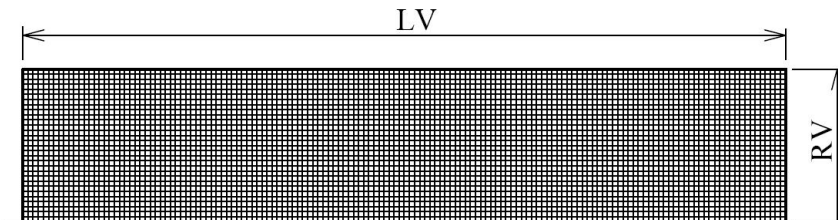
Byly odzkoušeny následující typy sítí:

- |                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| - Síť 10x50 prvků  | - Síť 30x150 prvků |
| - Síť 15x75 prvků  | - Síť 35x175 prvků |
| - Síť 20x100 prvků | - Síť 40x200 prvků |
| - Síť 25x125 prvků |                    |



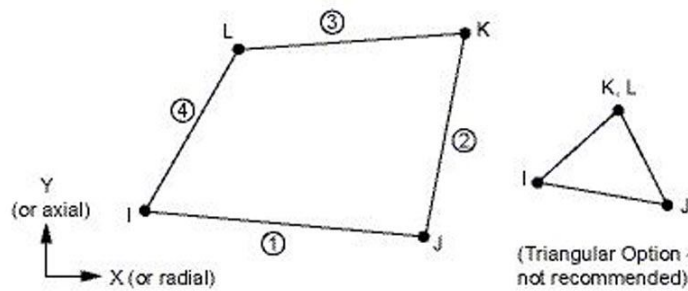
Obr. 3 Vliv hustoty sítě

Z grafu na Obr. 3 je patrné, že od hustoty sítě 30x150 prvků se už hodnoty nijak významně nemění. Proto byla na další simulace použita tato síť.



Obr. 4 Diskretizace průtlačku

Na konečkovprvkovou síť byl použit čtyřúhelníkový prvek PLANE182 s nastavením axisymmetric.



Obr. 5 Prvek PLANE182

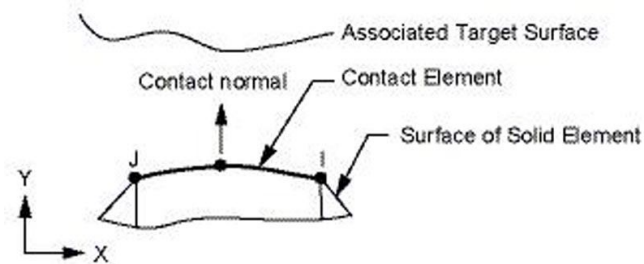
### 6.3. Model vazeb

Model je v prostoru vázán rotační symetrií kolem osy  $z$  na níž jsou předepsány nulové posuvy ve směru osy  $x$ . Průtlačnice je pevně vetknuta ve všech svých bodech. Průtlaček je vázán kontaktem s průtlačnicí a předepsaným nulovým posuvem horní stěny ve směru osy  $z$ . Tento nulový posuv je během výpočtu nahrazován délkou o kterou má být v daném kroku protlačen průtlačnicí.

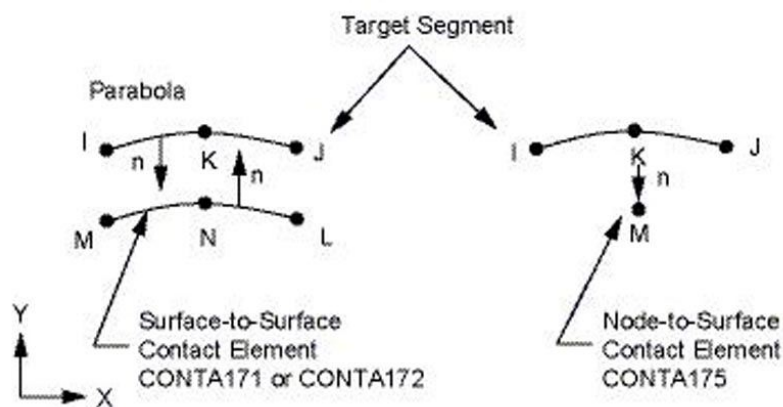
### 6.4. Model kontaktu

Kontakt mezi průtlačkem a průtlačnicí je modelován pomocí tříuzlových prvků CONTA172 a TARGE169.

Tření mezi prvky bylo zadáno parametricky a byli provedeny simulace pro různé hodnoty.



Obr. 6 Prvek CONTA172



Obr. 7 Prvek TARGE169

## 7. METODA ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Po provedení výpočtu v ANSYSu byly výsledky dále zpracovávány.

Obrázky s rozložením napětí a jiných potřebných údajů byly vykresleny přímo z ANSYS General Postprocessoru, kde bylo nutné načíst data z databáze pro konkrétní časový okamžik. Po načtení požadovaných dat byl obrázek uložen pomocí funkce Hard Copy.

Pro získávání dat v konkrétních bodech v závislosti na čase protlačování byl použit ANSYS TimeHist Postprocessor. Zde je umožněno pro libovolný bod vykreslit nebo vypsát vybrané veličiny. Z důvodu nutnosti porovnávání hodnot sledovaných veličin z různých výpočtů bylo použito vypsání hodnot a uložení do externího textového souboru, pro všechny provedené výpočty.

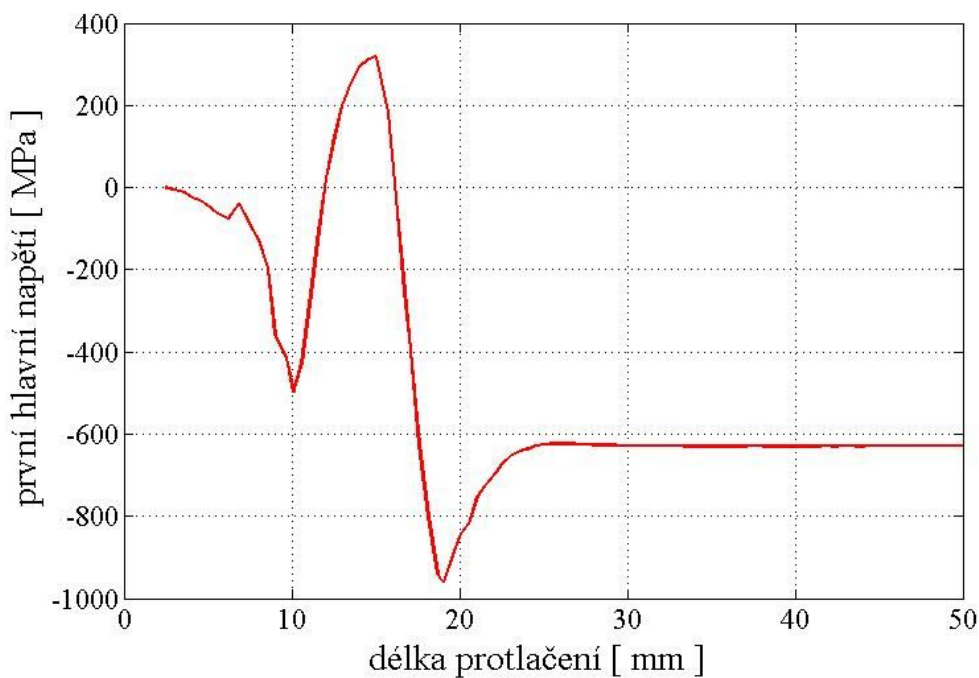
Pro další zpracování dat byl použit program MATLAB R2007a. Tento program byl vybrán pro dobrou schopnost zpracovávání rozsáhlých dat, možnost programování matematických vzorců s vektory a maticemi dat a kvalitnímu vykreslení výsledků v grafech ve 2D i 3D. Po importování veškerých potřebných dat bylo zvoleno značení veličin symboly a indexy, které napomáhalo snadné orientaci v načtených datech a umožňovalo programování jednoduchých cyklů. Těch bylo využito při následném programování sledovaných kritérií pro bod na ose průtlaku. Výsledné hodnoty pro jednotlivé výpočty byly dále uloženy do vektorů, které bylo možno vykreslit do grafů v závislosti na čase protlačování. Pro vytvoření 3D grafu byly z vektoru načteny maximální hodnoty z kterých byla následně vykreslena plocha v závislosti na sledovaných parametrech.

## 8. SIMULACE PROTLAČOVÁNÍ

### 8.1. Deformačně-napět'ová analýza protlačování

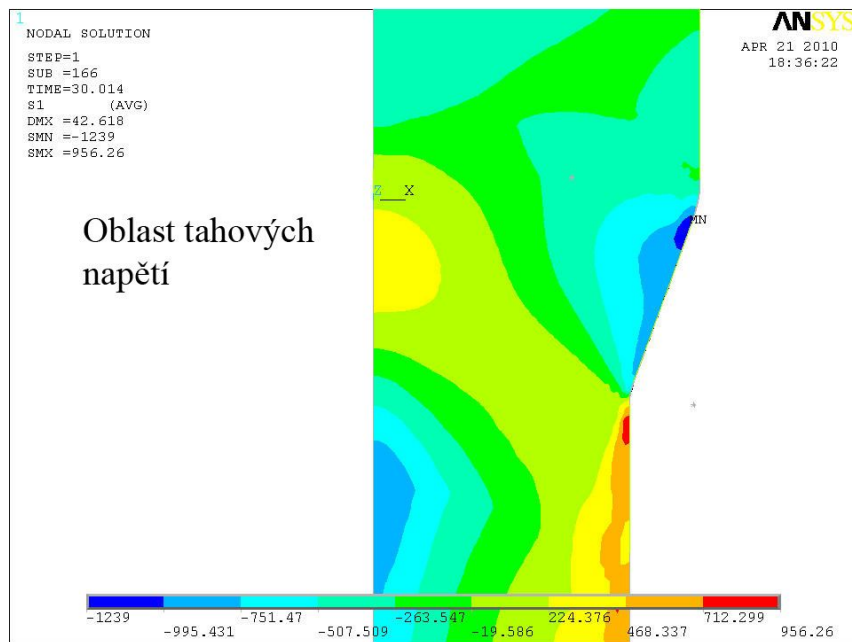
První analýza byla provedena pro vzorek o průměru 20 mm a délce 50 mm. Konečnoprvková síť byla použita mapovaná s 30 prvky po poloměru a 150 prvky po délce. Redukční úhel  $20^\circ$ , redukce průřezu 36% (redukce průměru 20%) a koeficient tření 0,1.

Vzorek byl protlačen o délku 50 mm a bylo sledováno napětí a přetvoření v bodě na ose vzorku. V grafu na Obr. 8 je průběh prvního hlavního napětí. Z něj je patrné, že ve vzorku je ve sledovaném bodě převážně tlakové napětí, vyjma oblasti ve které prochází redukční částí průtlačnice. V tomto místě se objevují tahová napětí, která mohou způsobovat vznik centrálních trhlin.



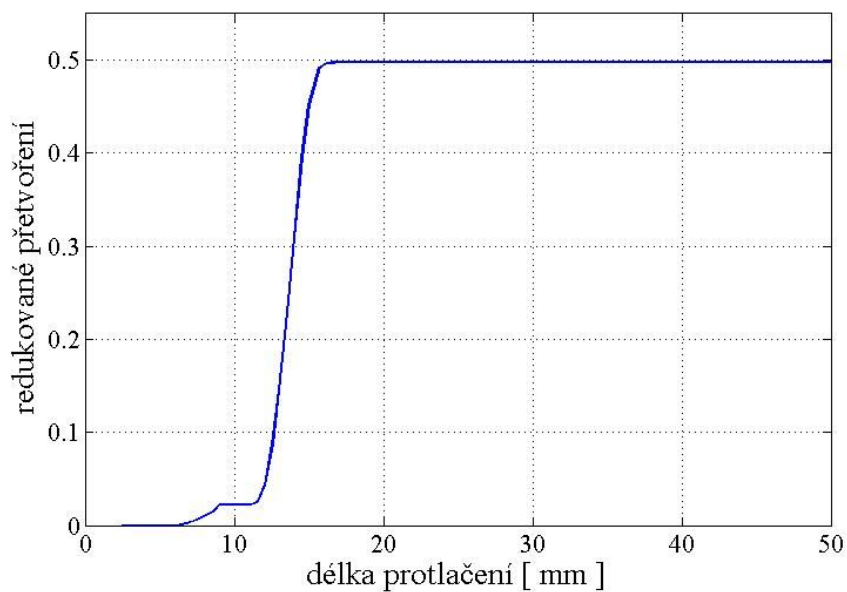
Obr. 8 První hlavní napětí  $\alpha = 20^\circ$ ,  $r_s = 36\%$

Velikost, rozložení a poloha tahové oblasti vůči redukční části průtlačnice jsou patrné z následujícího obrázku (Obr. 9).



Obr. 9 Oblast tahových napětí  $\alpha = 20^\circ, r_s = 36\%$

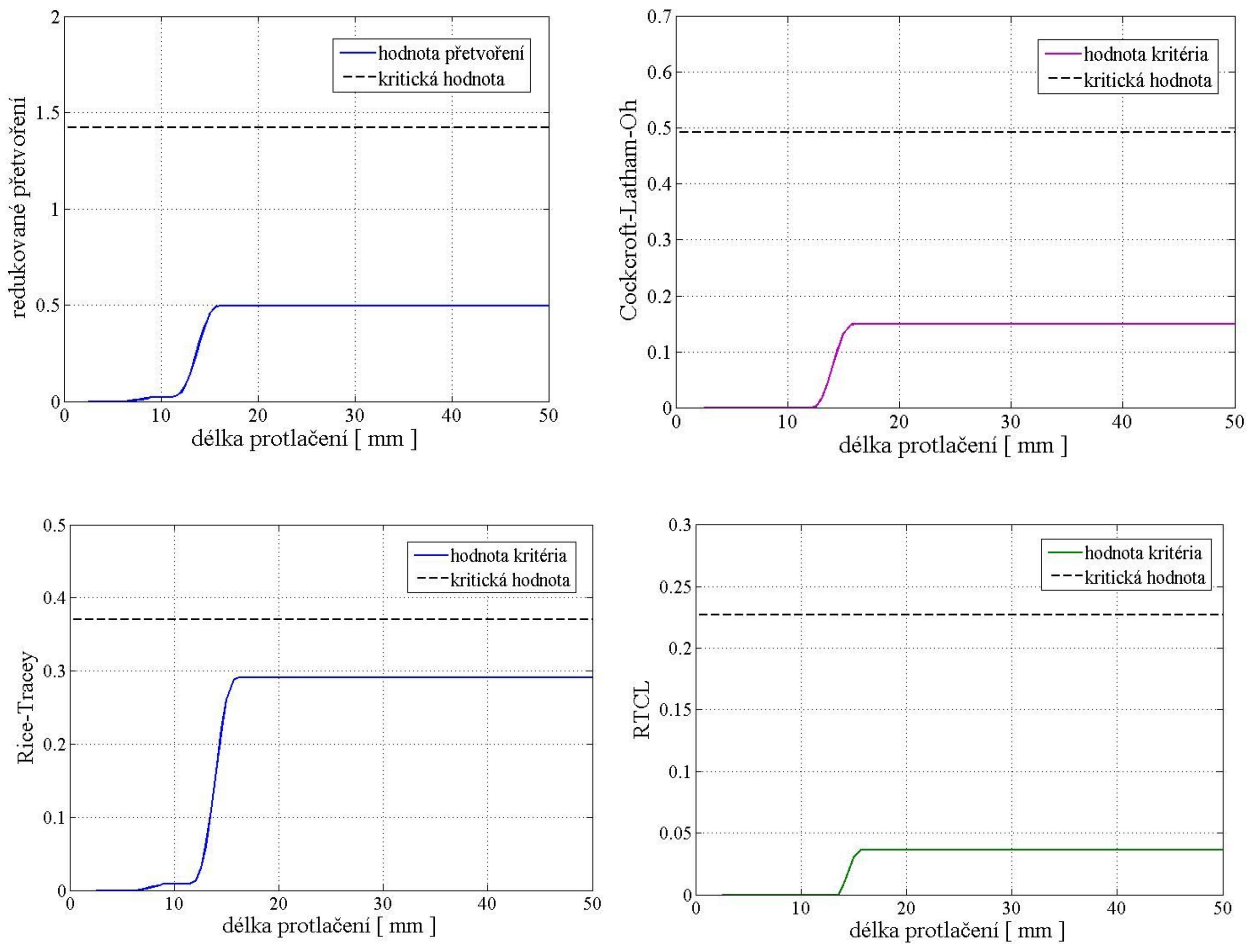
Průběh plastického přetvoření je zobrazen na Obr. 10. Z něj je patrné že veškeré plastické změny probíhají pouze při průchodu vzorku redukční částí. K jiným plastickým změnám nedochází.



Obr. 10 Redukované přetvoření  $\alpha = 20^\circ, r_s = 36\%$

## 8.2. Srovnání kritérií porušování

Na následujících grafech na Obr. 11 jsou vykresleny průběhy jednotlivých kritérií porušování, která byla testována, vůči své kritické hodnotě, při které hrozí nebezpečí vzniku trhlin.



Obr. 11 Průběhy sledovaných kritérií  $\alpha = 20^\circ$ ,  $r_s = 36\%$

Z těchto grafů je patrné že při těchto podmínkách žádné kritérium své kritické hodnoty nedosahuje.

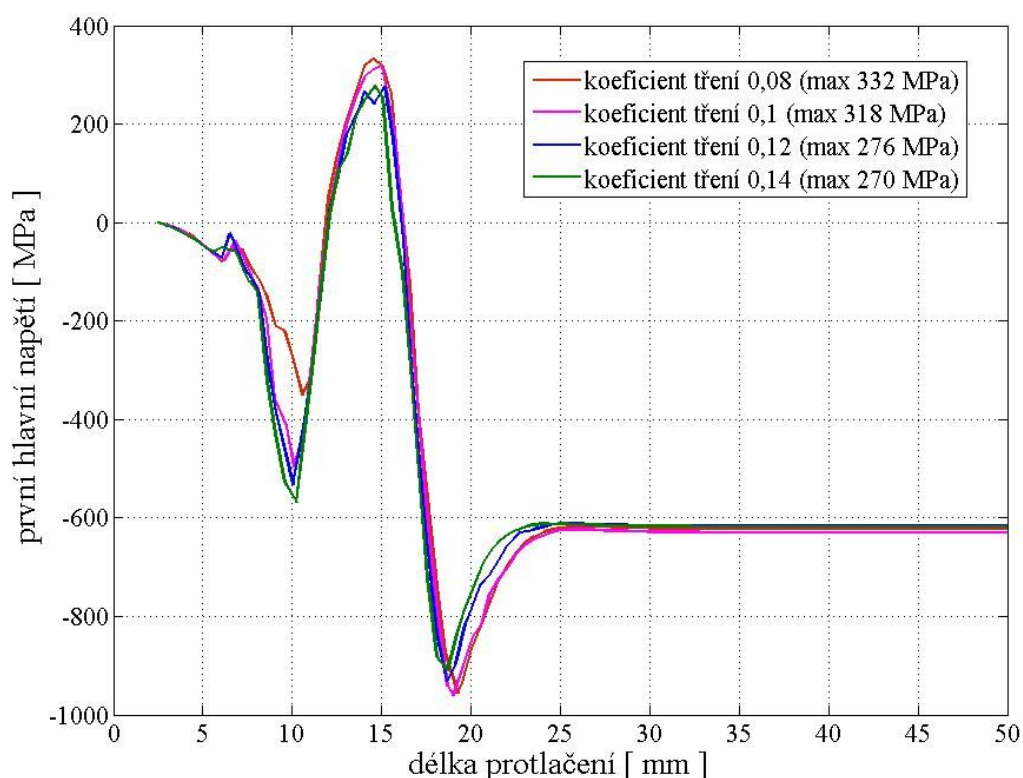


## 9. STUDIE VLIVU TŘENÍ

Vliv koeficientu tření byl sledován na vzorku s redukcí průřezu 36% a redukčním úhlem 20°. Výpočet byl proveden pro čtyři různé koeficienty tření:

- Koeficient tření 0,08
- Koeficient tření 0,1
- Koeficient tření 0,12
- Koeficient tření 0,14

Na obrázku 12 jsou zobrazeny hodnoty prvního hlavního napětí. Simulace ukázala, že maximální tahová napětí na ose průtlačku rostou s klesajícím koeficientem tření a klesají s rostoucím koeficientem tření.

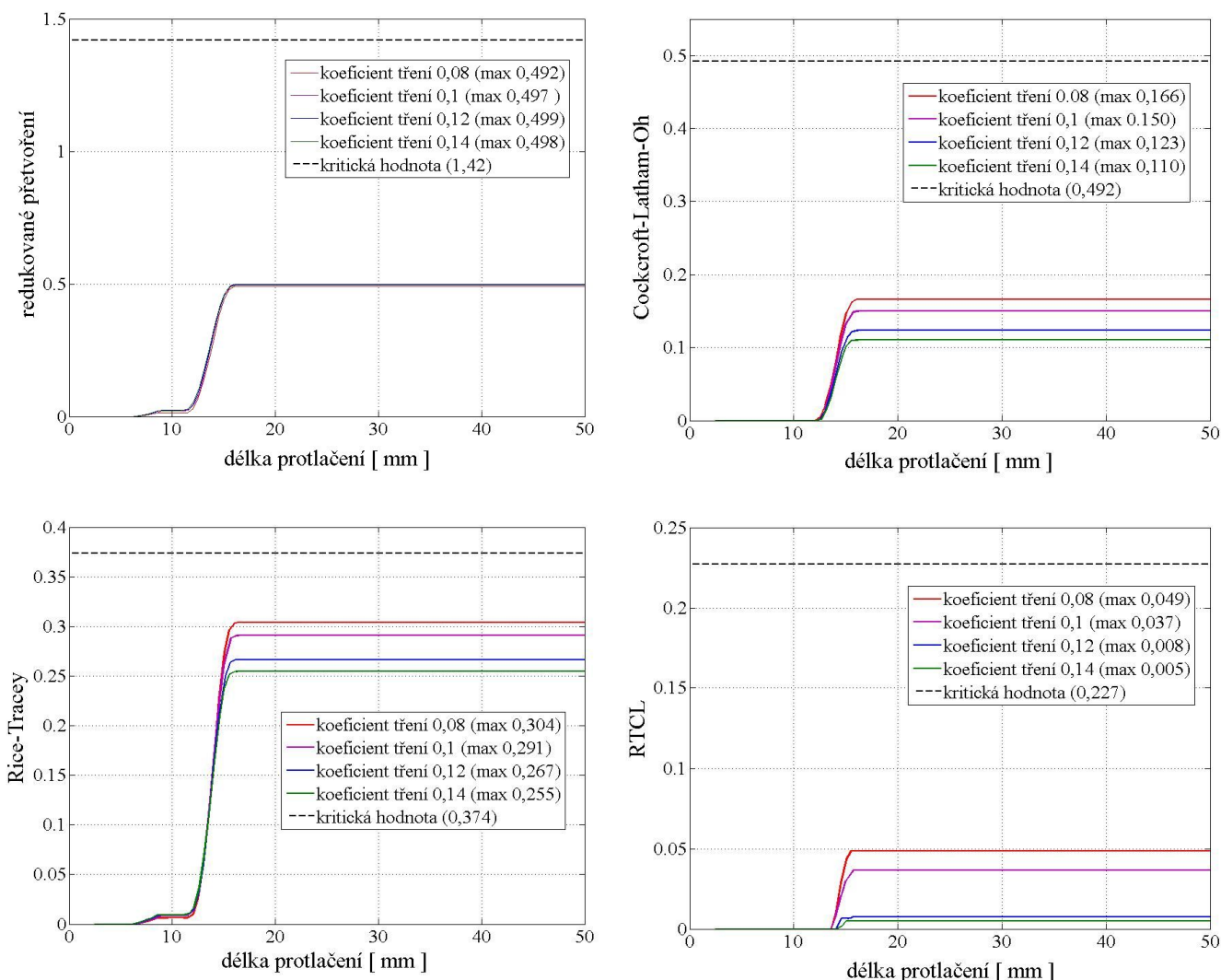


Obr. 12 První hlavní napětí pro různé koeficienty tření

V následujících grafech na Obr. 13 je zobrazen vliv tření na jednotlivá lomová kritéria. Přetvoření zůstává pro všechny případy shodné, to odpovídá předpokladu, že ve všech případech je shodná redukce průřezu.

Ostatní kritéria shodně ukazují nárůst maximální hodnoty kritéria při snížení koeficientu tření a pokles kritéria při zvýšení tření. To odpovídá tomu, že při nižším tření je potřeba menší tvářecí síla a v průtlačku vznikají menší tlakové síly a objevují se na ose průtlačku vyšší tahová napětí.

Žádné kritérium nepřekročilo svou kritickou hodnotu. U kritéria Rice-Tracey jsou hodnoty nejvýše vůči své kritické hodnotě.



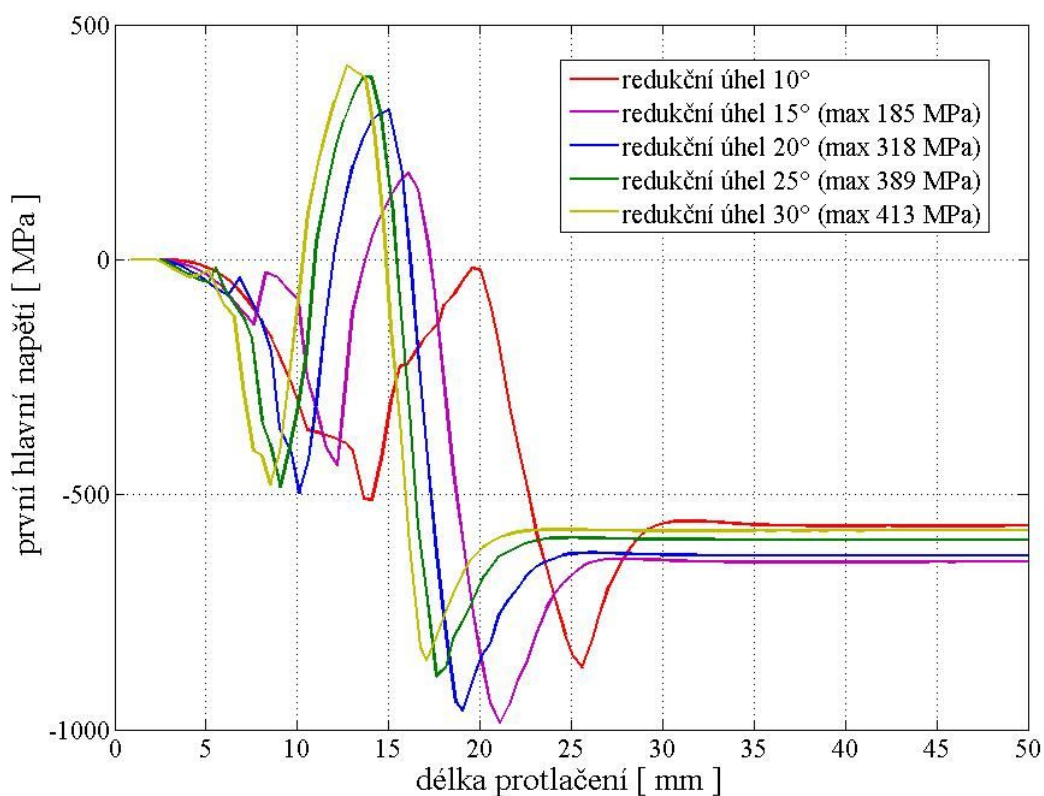
Obr. 13 Srovnání kritérií pro různé koeficienty tření

## 10. STUDIE VLIVU REDUKČNÍHO ÚHLU A REDUKCE PRŮŘEZU

Tyto vlivy budou v následujících podkapitolách hodnoceny zvlášť a v podkapitole 9.3 budou zobrazeny do jednoho grafu. Tyto vlivy byl sledovány na vzorku s koeficientem tření 0,1.

### 10.1. Vliv redukčního úhlu

Vliv redukčního úhlu byl nejprve sledován pro redukci průřezu 36%. Pro redukční úhly byly testovány hodnoty  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  a  $30^\circ$ . Výsledky prvního hlavního napětí z grafů na Obr.14 ukazují, že se vzrůstajícím redukčním úhlem rostou maximální tahová napětí na ose průtlačku a s klesajícím úhlem klesají. Pro redukční úhel  $10^\circ$  žádná tahová napětí nevznikají.

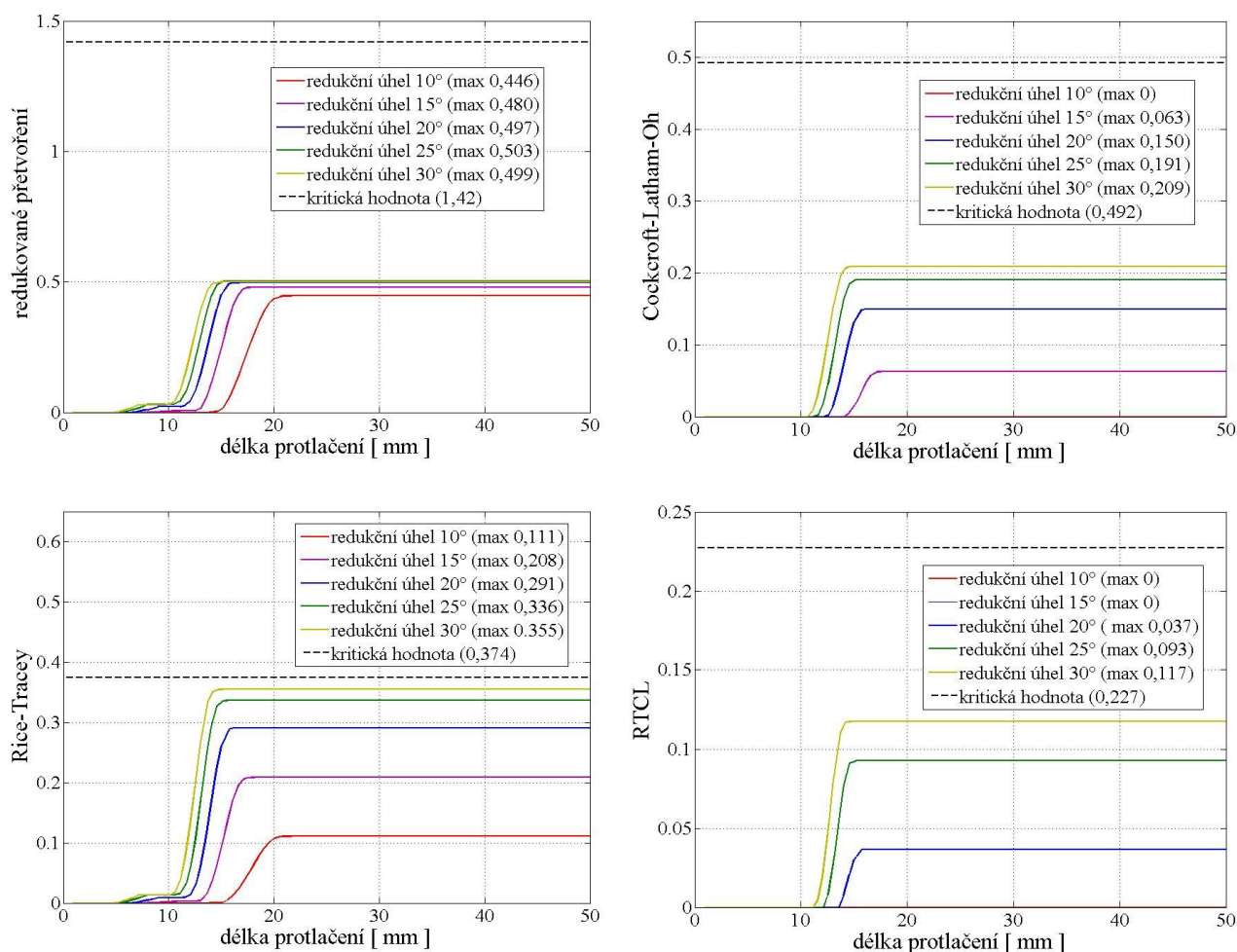


Obr. 14 První hlavní napětí pro různé redukční úhly

Kritérium redukovaného přetvoření, Obr. 15 vlevo nahoře, opět ukazuje že při stejné redukci průřezu se přetvoření na ose průtlačku nemění. Nižší hodnoty pro úhly  $10^\circ$  a  $15^\circ$  jsou způsobeny nižším tvářecím odporem a tedy i nižšími tvářecími tlaky při kterých nedochází k úplnému vymezení vůle mezi průtlačnicí a průtlačkem.

Ostatní kritéria shodně ukazují na vyšší nebezpečí vzniku centrálních trhlin při větších redukčních úhlech. Pro úhel  $10^\circ$  ukazují kritéria Cockcroft-Latham-Oh a RTCL nulovou hodnotu. To je způsobeno tím, že při tomto úhlu je první hlavní napětí na ose po celou dobu protlačování v tlakové oblasti a nevznikají tam žádná tahová napětí, na kterých jsou kritéria závislá.

Pro sledované parametry nedosáhli maximální hodnoty sledovaných kritérií ke své kritické hodnotě. Nejbližše ke své kritické hodnotě je kritérium Rice-Tracey.



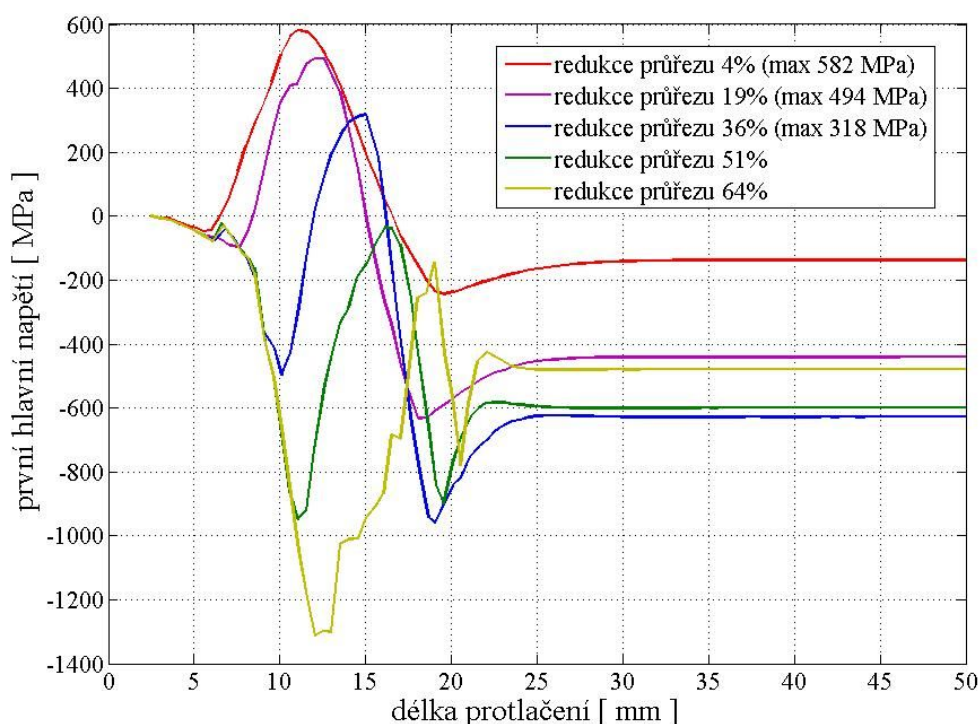
Obr. 15 Srovnání kritérií pro různé redukční úhly

## 10.2. Vliv redukce průřezu

Vliv redukce průřezu byl nejprve sledován pro redukční úhel 20°. Byly sledovány tyto hodnoty redukce:

- Redukce průřezu 4% (2% redukce průměru)
- Redukce průřezu 19% (10% redukce průměru)
- Redukce průřezu 36% (20% redukce průměru)
- Redukce průřezu 51% (30% redukce průměru)
- Redukce průřezu 64% (40% redukce průměru)

Graf na Obr. 16 ukazuje, že s rostoucí redukcí průřezu klesá maximální hodnota prvního hlavního napětí a maximální hodnoty jsou pro malé redukce. Pro redukce průřezu nad 50% na ose průtlačku nevznikají žádná tahová napětí, která jsou hlavní příčinou vzniku centrálních trhlin.

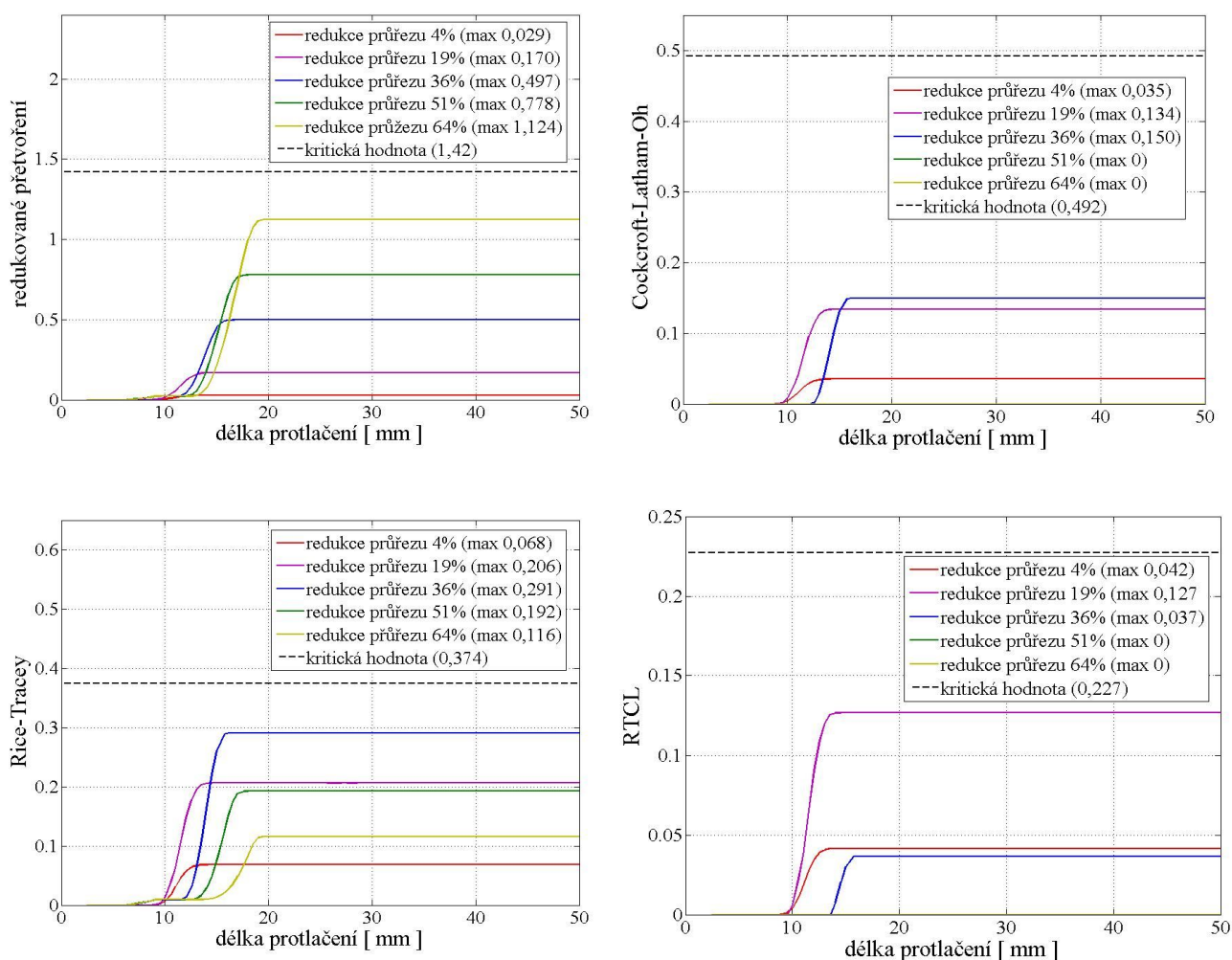


Obr. 16 První hlavní napětí pro různé redukce průřezu

Redukované přetvoření, viz. Obr. 17 vlevo nahoře, je naopak malé s malou redukcí a roste s větší redukcí, což odpovídá předpokladům tváření.

Ostatní kritéria jsou závislá na maximální kladné hodnotě prvního hlavního napětí a na redukovaném přetvoření. V důsledku toho, že pro velké redukce průřezu jsou velká přetvoření ale malá první hlavní napětí a pro malé redukce jsou malá přetvoření a velká první hlavní napětí, ukazují sledovaná kritéria maximální hodnoty pro redukce průřezu mezi 20% až 40%. To znamená že při zvětšování redukce průřezu hodnoty kritérií nejprve stoupají a po dosažení určitého svého maxima klesají.

Tato tendence je dále zobrazena na 3D grafech v podkapitole 9.3. Pro sledované parametry nedosáhlo žádné kritérium své kritické hodnoty.



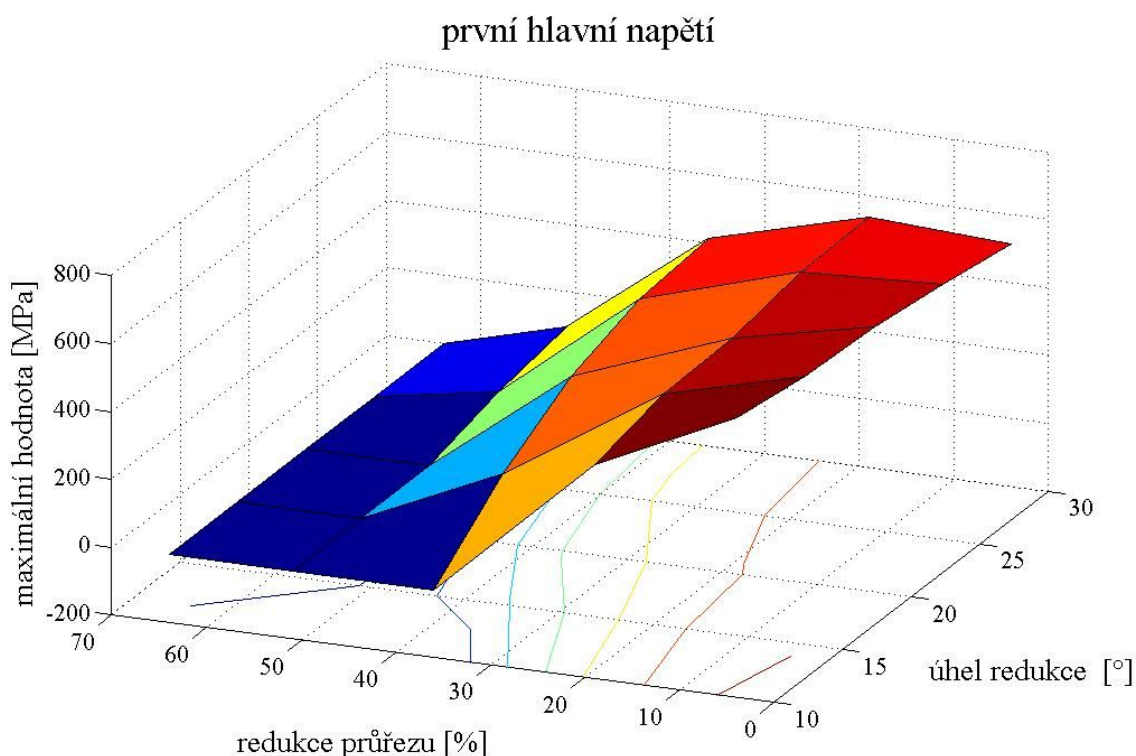
Obr. 17 Srovnání kritérií pro různé redukce průřezu

### 10.3. Kritéria jako funkce redukčního úhlu a redukce průřezu

Na následujících grafech jsou zobrazeny maximální hodnoty jednotlivých kritérií v závislosti na úhlu redukce a redukce průřezu. Simulace byly provedeny pro všechny kombinace redukčních úhlů 10°, 15°, 20°, 25°, 30° a redukcí průřezu 4%, 19%, 36%, 51%, 64%.

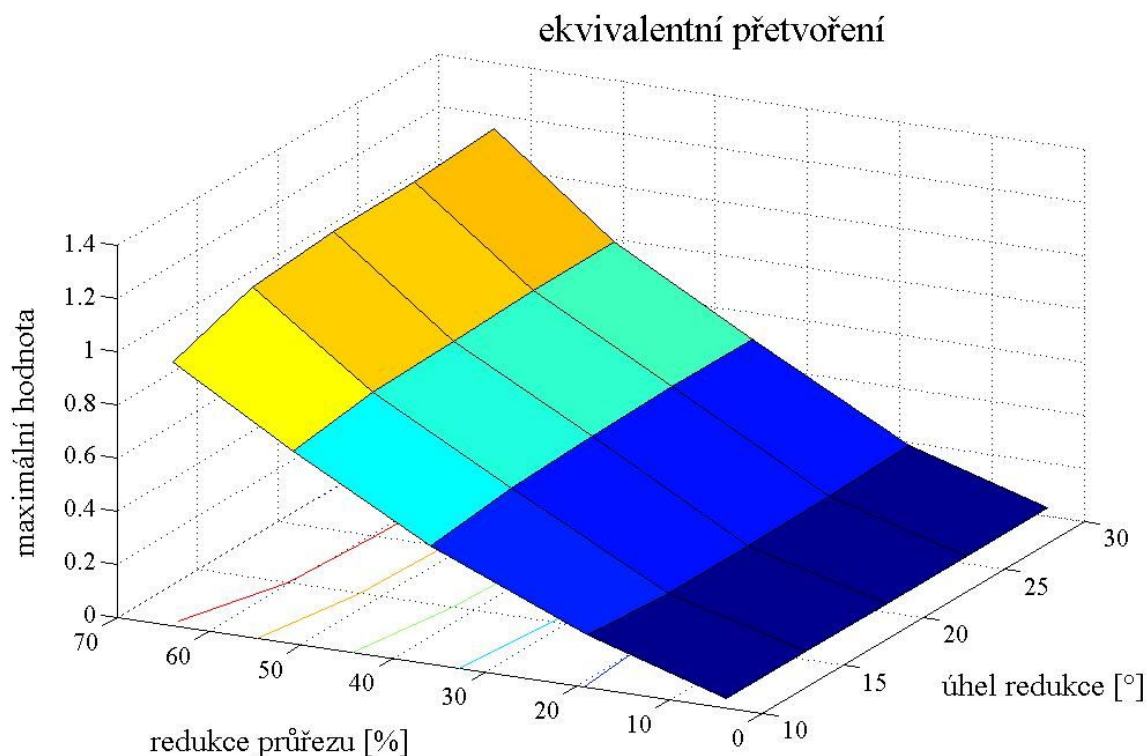
Na Obr. 18 jsou vyneseny maximální hodnoty prvního hlavního napětí. Z grafu je patrné, že maximální hodnoty klesají s rostoucí redukcí průřezu. Závislost na úhlu redukce je nejvýraznější pro redukce průřezu mezi 30% a 40%. Menší a větší redukce jsou na úhlu méně závislé.

Při větších redukcích průřezu a menších úhlech redukce nevzniká na ose průtláčku tahové napětí.



Obr. 18 Závislost prvního hlavního napětí na úhlu a redukcí

Na Obr. 19 jsou vyneseny maximální hodnoty ekvivalentního přetvoření. Tyto hodnoty rostou s rostoucí redukcí průřezu a jsou téměř nezávislé na úhlu redukce.



Obr. 19 Závislost ekvivalentního přetvoření na úhlu a redukcí

Na Obr. 20 jsou zobrazeny maximální hodnoty kritéria Cockcroft-Latham-Oh. Maximální hodnota odpovídá redukčnímu úhlu  $30^\circ$  a redukcí průřezu 36%.

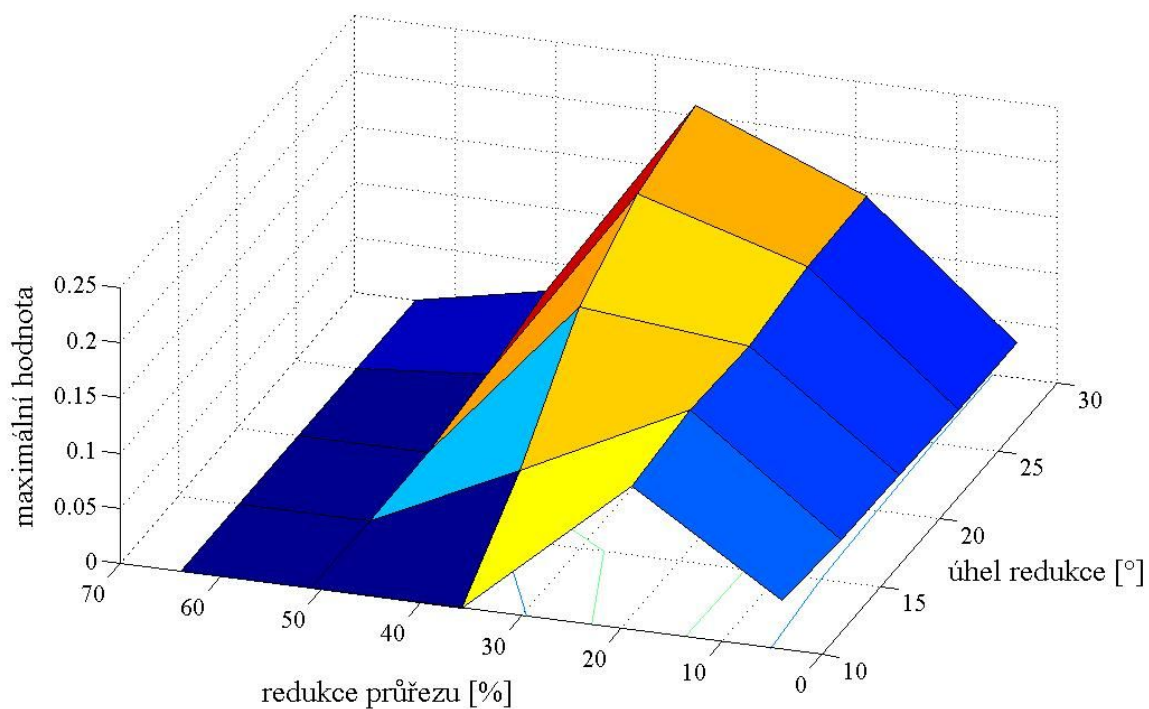
Maximální hodnoty kritéria Rice-Tracey jsou zobrazeny na Obr. 21 a maximální hodnota také odpovídá redukčnímu úhlu  $30^\circ$  a redukcí průřezu 36%, ale k ostatním hodnotám neklesá tak výrazně.

Pro kritérium RTCL, zobrazeném na Obr. 22, odpovídá maximální hodnota redukčnímu úhlu  $30^\circ$  a redukcí průřezu 19%.

Všechna kritéria shodně ukazují, že nejnebezpečnější parametry jsou pro velké úhly a střední redukce.

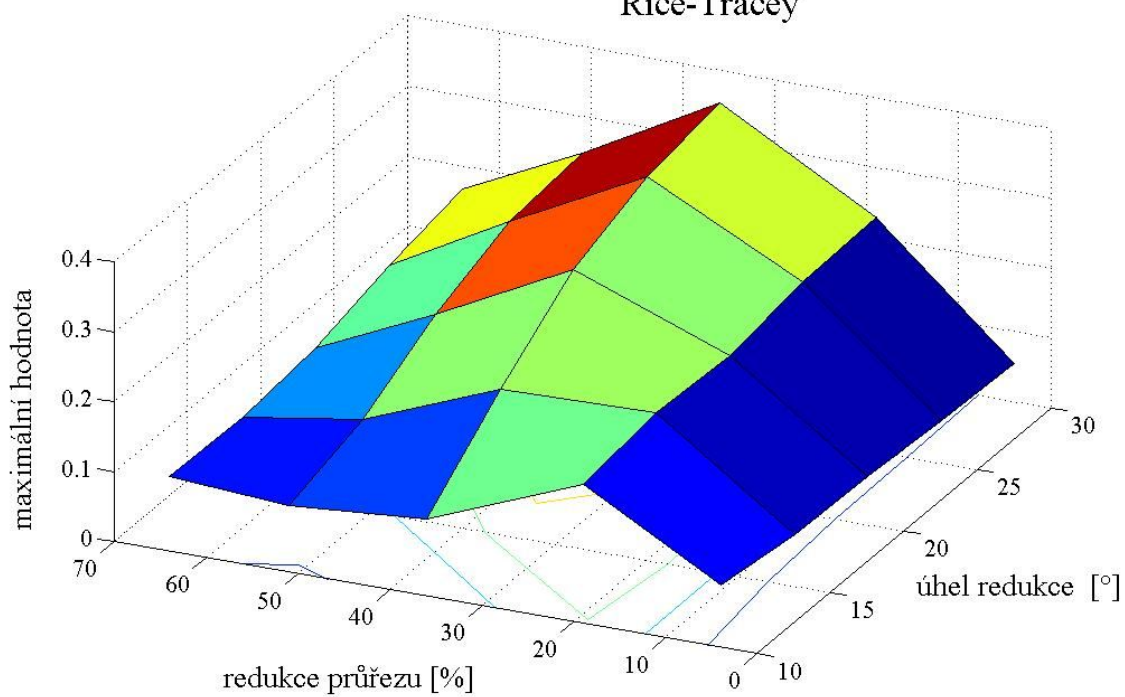


Cockcroft-Latham-Oh

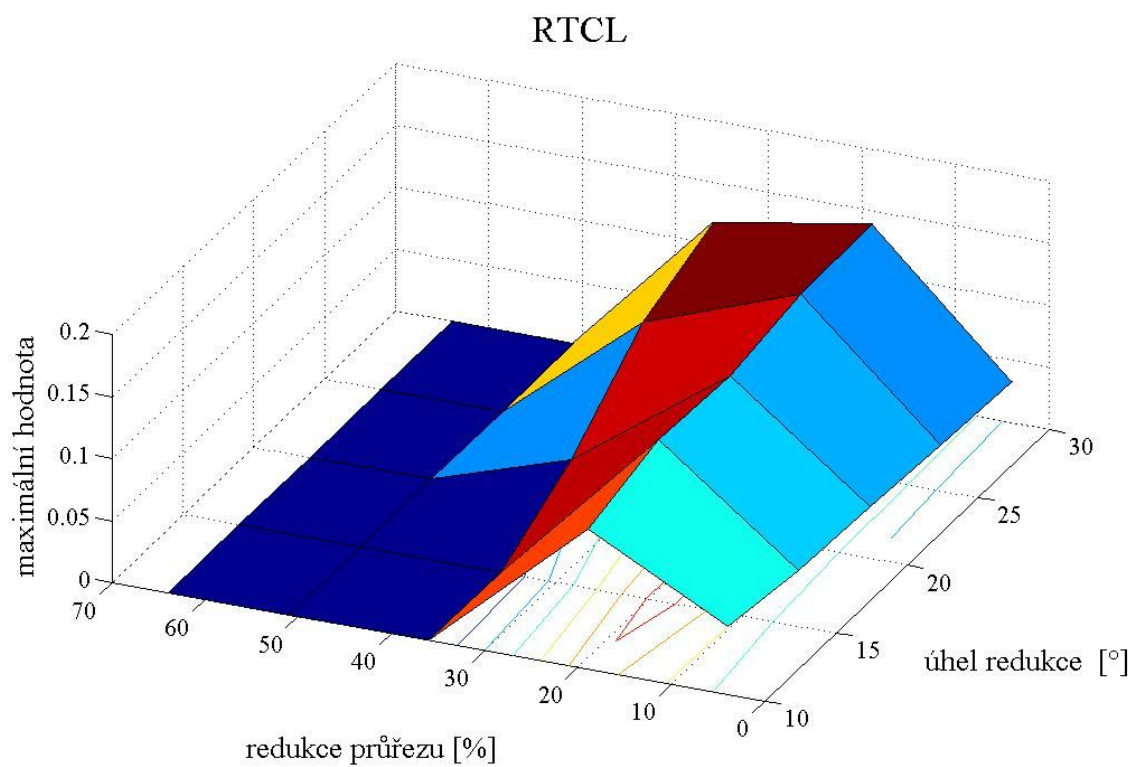


Obr. 20 Závislost kritéria Cockcroft-Latham-Oh na úhlu a redukci

Rice-Tracey



Obr. 21 Závislost kritéria Rice-Tracey na úhlu a redukci



Obr. 22 Závislost kritéria RTCL na úhlu a redukci

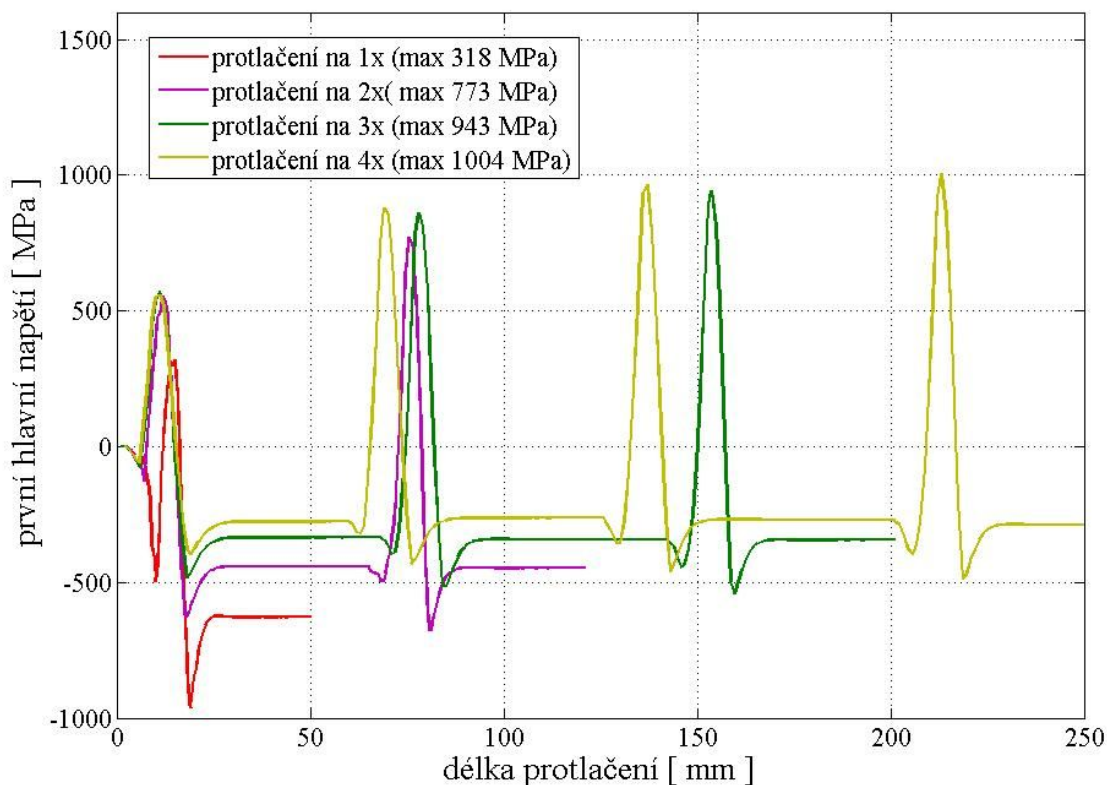
## 11. STUDIE VLIVU VÍCE OPERACÍ

Vliv více operací bude nejprve sledován v závislosti na délce protlačení a dále budou vyneseny maximální hodnoty kritérií v závislosti na úhlu redukce a na redukci průřezu.

### 11.1. Průběh kritérií při protlačení na více operací

Následující simulace byly provedeny na vzorku s redukčním úhlem  $20^\circ$  a celkovou redukcí průřezu 36%. V první simulaci bylo provedeno protlačení o celých 36% najednou, v druhé bylo protlačení rozděleno na dvě redukce po 18%, ve třetí na tři redukce po 12% a ve čtvrté na čtyři redukce po 9%.

Na Obr. 23 je průběh prvního hlavního napětí pro různé počty operací. Graf ukazuje, že pro každou další operaci narůstá maximální hodnota tahových napětí na ose průtlačku a způsobuje cyklické namáhání.

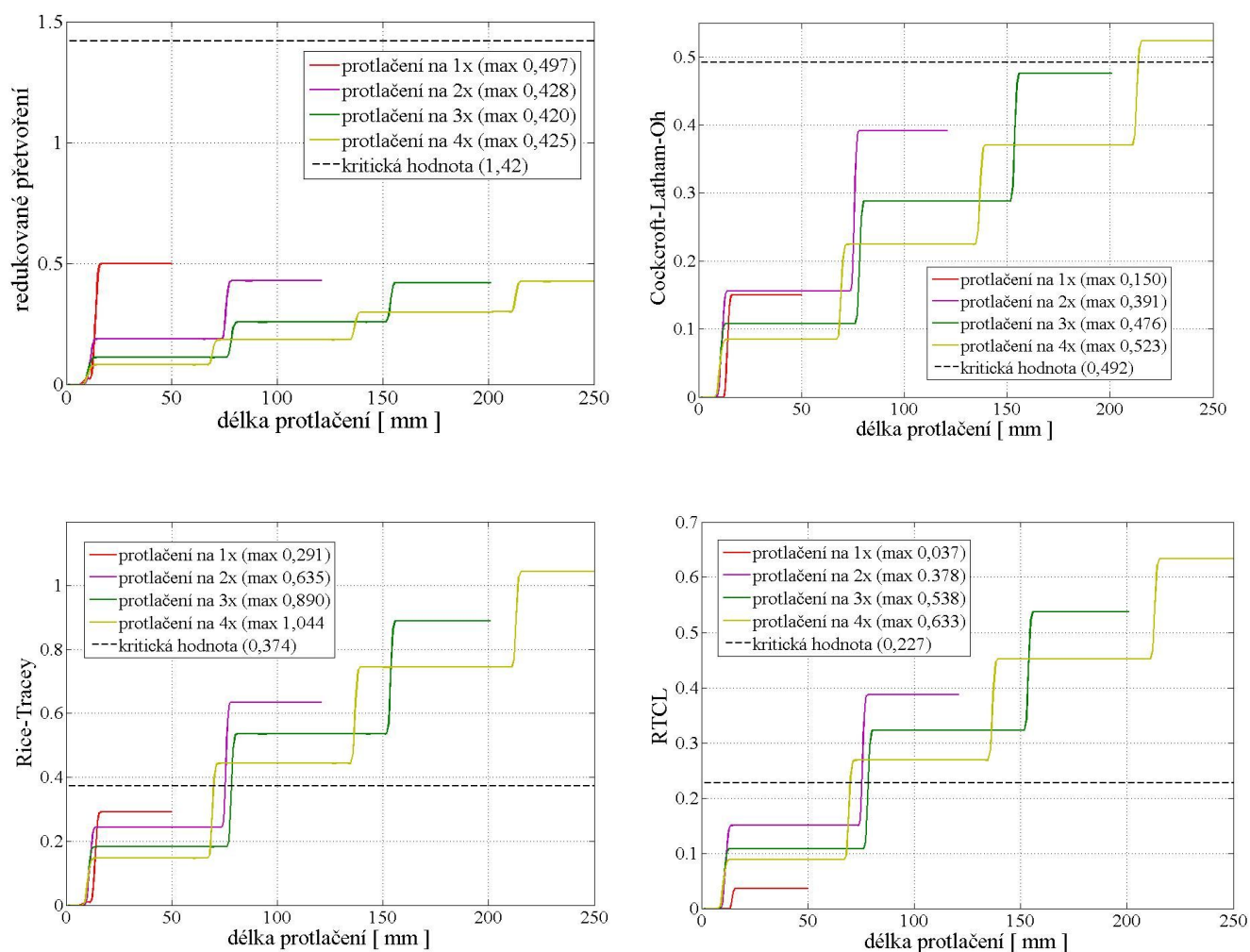


Obr. 23 První hlavní napětí pro různý počet protlačení

Redukované přetvoření, viz. Obr. 17 nahoře vlevo, ukazuje že konečné přetvoření je ve všech případech přibližně stejné. Při protlačení najednou je mírně vyšší, to je způsobeno vymezením vůle mezi průtláčkem a průtláčnicí při velké redukci.

Ostatní kritéria shodně ukazují značný nárůst maximální hodnoty při každé operaci, přestože je konečná redukce ve všech případech stejná. Neshodují se ovšem v dosažení kritické hodnoty.

Kritérium Cockcroft-Latham-Oh přesahuje kritickou hodnotu až při čtvrté operaci, kritéria Rice-Tracey a RTCL přesahují kritickou hodnotu už na druhém stupni protlačení.



Obr. 24 Srovnání kritérií pro různý počet protlačení

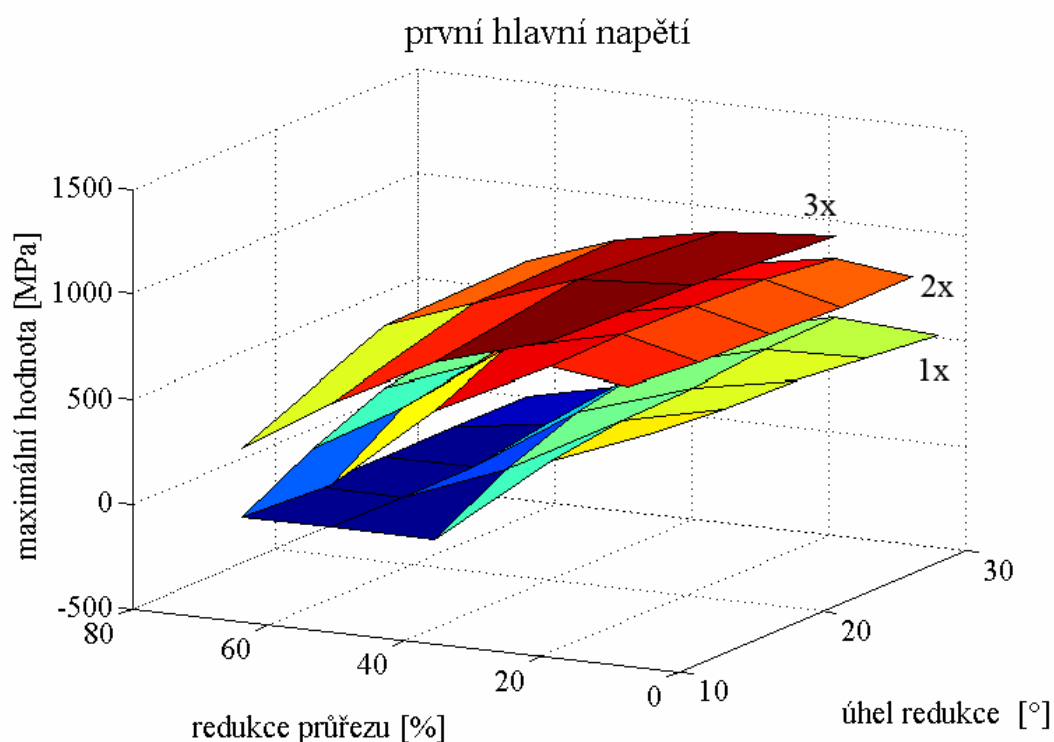
## 11.2. Kritéria jako funkce redukčního úhlu a redukce průřezu při více operacích

Na následujících grafech jsou zobrazeny maximální hodnoty jednotlivých kritérií pro protlačení na 1x, 2x a 3x v závislosti na úhlu redukce a redukce průřezu.

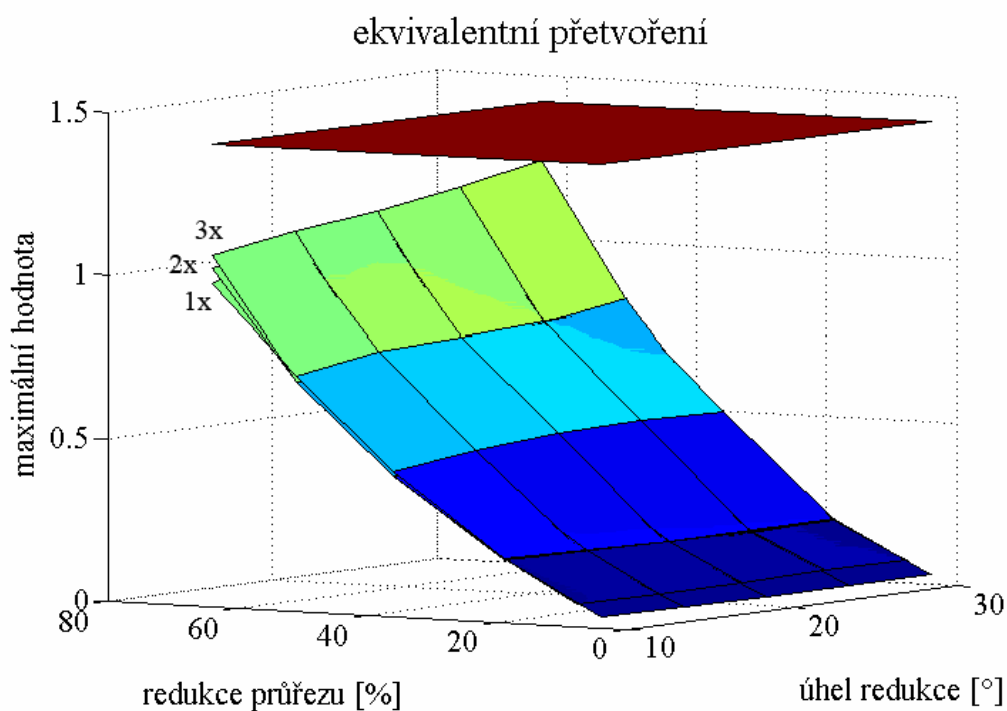
Simulace pro jednotlivé operace byly provedeny pro kombinace:

	Redukční úhly	Redukce průřezu
Protlačení na 1x	10°, 15°, 20°, 25°, 30°	4%, 19%, 36%, 51%, 64%.
Protlačení na 2x	10°, 15°, 20°, 25°, 30°	8%, 19%, 36%, 51%, 64%.
Protlačení na 3x	10°, 20°, 30°	19%, 36%, 51%, 64%.

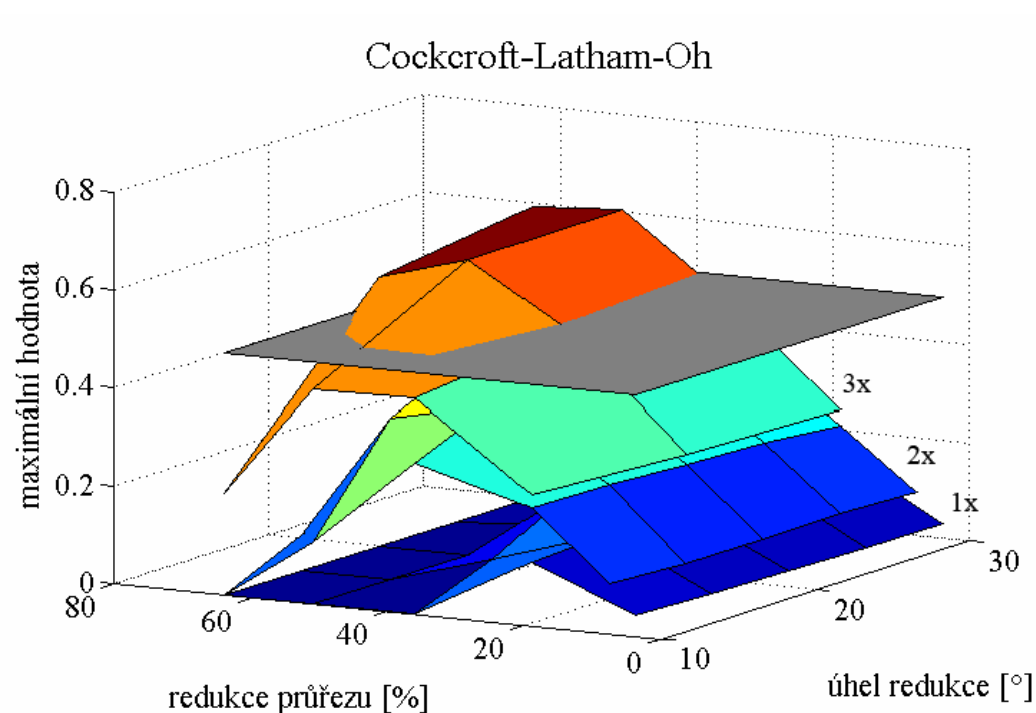
Na Obr. 25 je zobrazeno maximální první hlavní napětí a na obrázcích 26 až 29 jsou maximální hodnoty jednotlivých kritérií v závislosti na úhlu redukce a redukcí průřezu pro více operací. Jednotlivá kritéria jsou zobrazena se svou kritickou hodnotou.



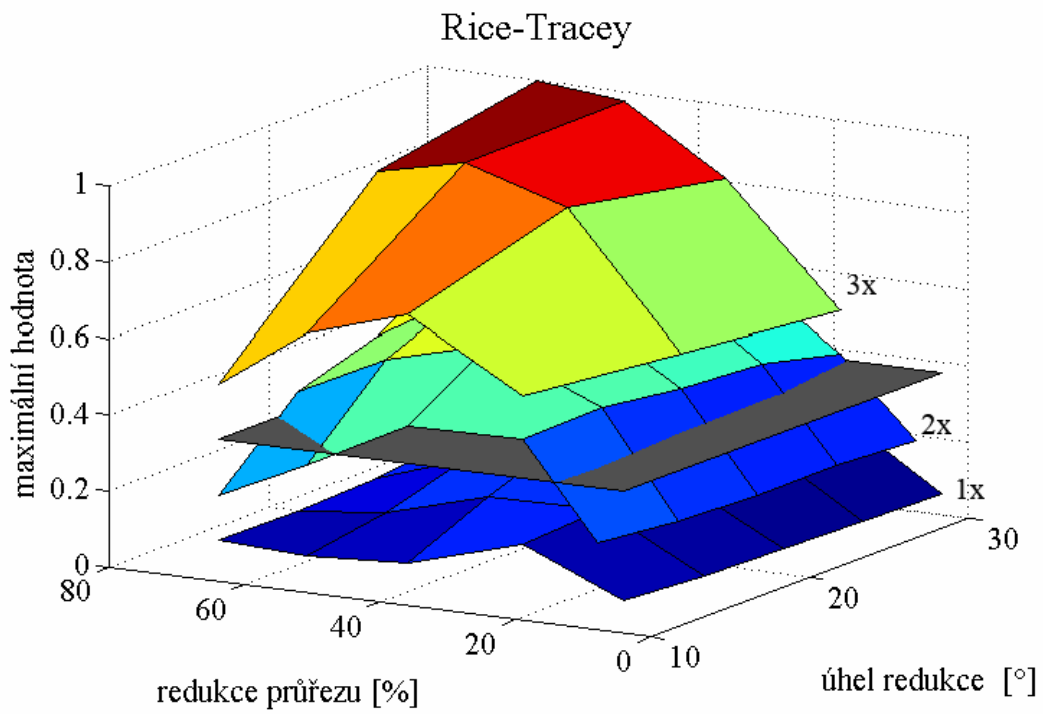
Obr. 25 První hlavní napětí pro více operací v závislosti na úhlu a redukcí



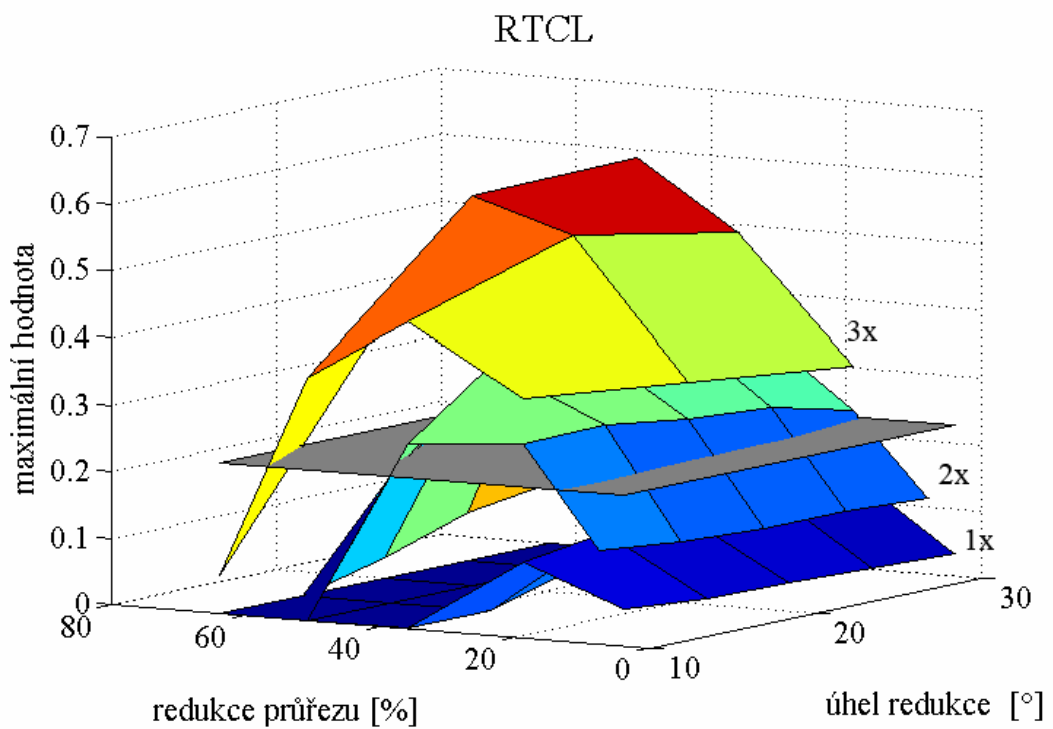
Obr. 26 Ekvivalentní přetvoření pro více operací v závislosti na úhlu a redukcii



Obr. 27 Kritérium Cockcroft-Latham-Oh pro více operací v závislosti na úhlu a redukcii



Obr. 28 Kritérium Rice-Tracey pro více operací v závislosti na úhlu a redukcí



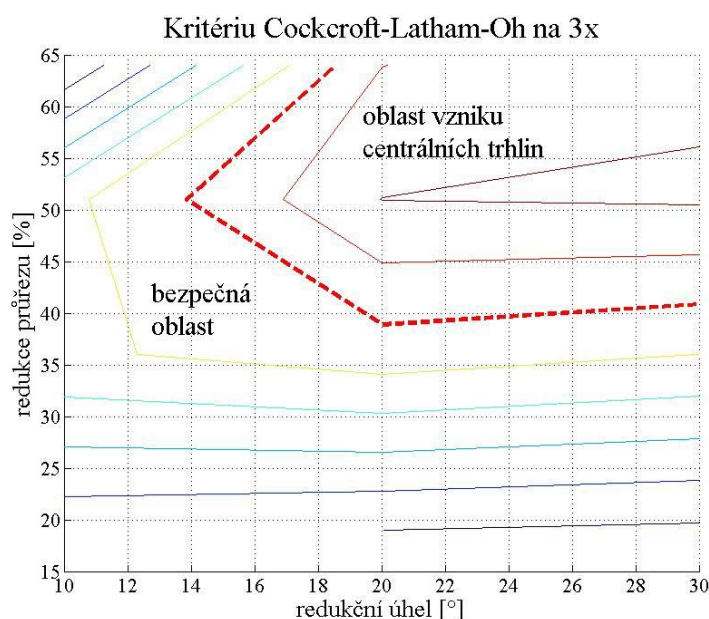
Obr. 29 Kritérium RTCL pro více operací v závislosti na úhlu a redukcí

## 12. ZÁVISLOSTI BEZPEČNÉHO PROTlačOVÁNÍ PODLE SLEDOVANÝCH KRITÉRIÍ

Největší vliv na vznik centrálních trhlin v průtlaku má velikost redukce průřezu a redukčního úhlu tvářecí formy. Na následujících obrázcích bude zobrazena závislost bezpečného protahování na těchto parametrech pro sledovaný materiál 12 050.3.

Dle kritéria redukovaného přetvoření nedosáhly maximální hodnoty kritéria pro sledované parametry své kritické hodnoty.

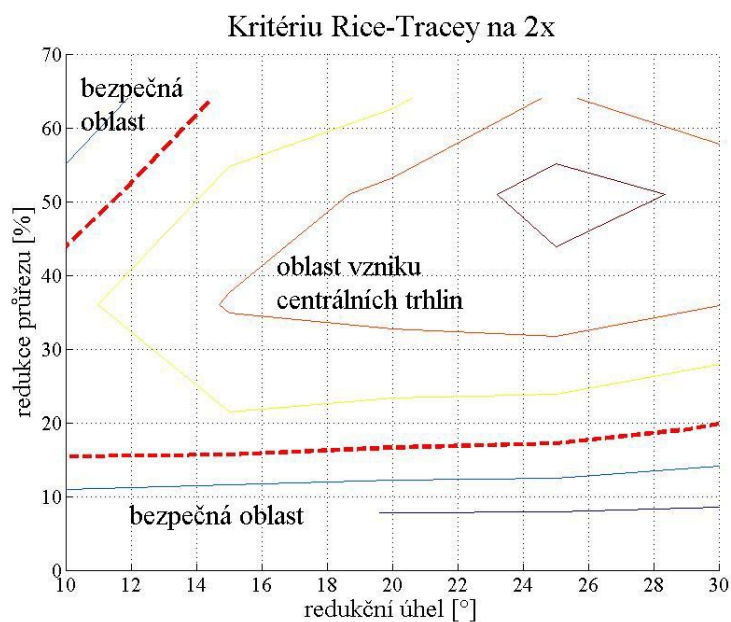
Pro kritérium Cockcroft-Latham-Oh podle simulací nedojde ke vzniku trhlin při protlačení na jedenkrát ani na dvakrát. Až při protlačování na tři operace dochází k překročení maximálních hodnot kritéria přes kritické hodnoty. Na Obr. 30 je zobrazena mezní křivka vzniklá průnikem plochy maximálních hodnot kritéria a plochy kritické hodnoty.



Obr. 30 Mezní křivka pro kritérium Cockcroft-Latham-Oh

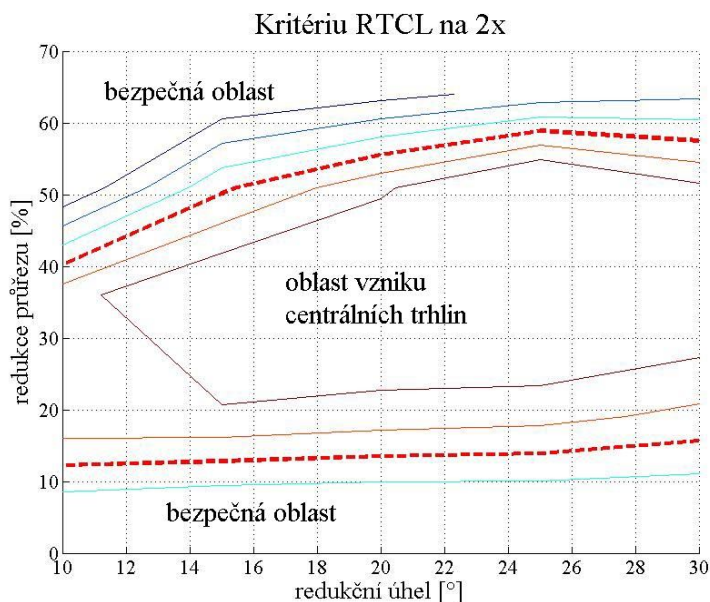
Pro kritérium Rice-Tracey dochází k překročení mezních hodnot už při protlačení na dvakrát. Mezní křivky pro tento případ jsou zobrazeny na Obr. 31. Pro protlačení na třikrát dosáhli maximální hodnoty kritéria pro všechny sledované případy kritické hodnoty.





Obr. 31 Mezní křivka pro kritérium Rice-Tracey

Kritérium RTCL, stejně jako předchozí kritérium, dosahuje kritických hodnot při protlačení na dvě operace a při protlačení na tři operace je dosaženo kritických hodnot pro všechny sledované případy. Mezní křivka pro protlačení na dvakrát je zobrazena na Obr 32.



Obr. 32 Mezní křivka pro kritérium RTCL

### 13. SIMULACE PROTlačOVÁNÍ KONKRÉTNÍ SOUČÁSTI

Dále byla provedena simulace protlačování konkrétní součásti při jejíž výrobě docházelo ke vzniku centrálních trhlin při poslední operaci.

#### 13.1. Parametry součásti

Pro výrobu součásti byla jako výchozí materiál použita ocel 12 050 o průměru 27h9 dodávaná v tyčích podle ČSN 42 6515.32 maximální délky 3m. Tyče byly dále děleny na požadovanou hmotnost stříháním a ústřížky žíhány na měkko. Polotovar byl dále fosfátován a povrch napuštěn mazivem. Požadované mechanické vlastnosti byly pevnost v tahu maximálně 600MPa a tažnost minimálně 15%. Povrch materiálu byl požadován bez přeložek, povrchových trhlin a rýh.

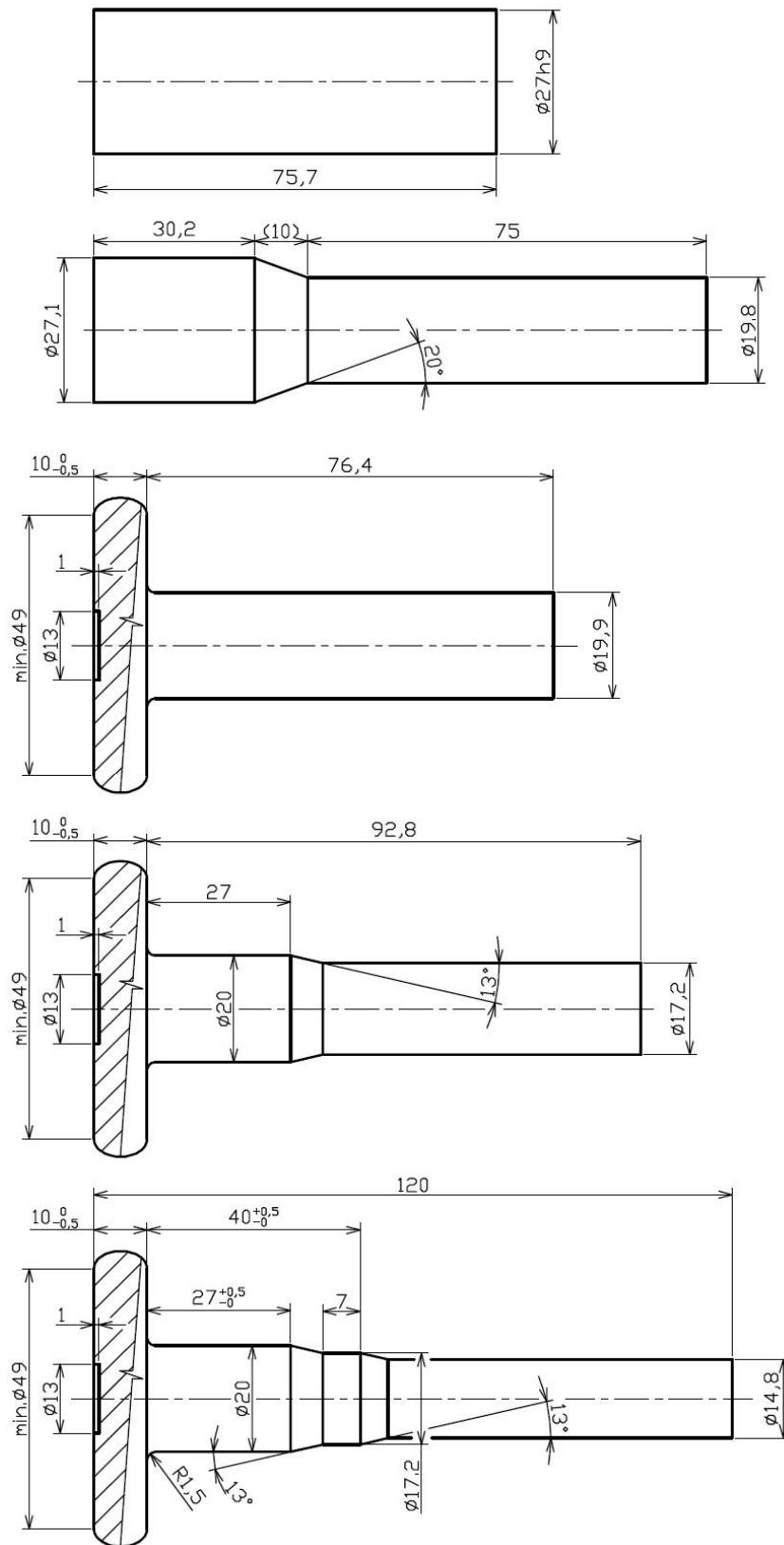
Rozměry jednotlivých stádií výroby součásti jsou zobrazeny na Obr. 33. Součást je vyráběna na čtyři operace. První operace je protlačování, druhá operace je pēchování hlavy a třetí a čtvrtá operace jsou další protlačování. Druhá operace pēchování hlavy v simulaci nebude provedena. Její vliv na vznik centrálních trhlin v těle součásti není podstatný.

V první protlačovací operaci je provedena redukce z průměru 27mm na průměr 19,8mm, to odpovídá redukci průřezu 46,2% , redukční úhel je 20°.

V druhé protlačovací operaci je provedena redukce z průměru 19,9mm na průměr 17,2mm, to odpovídá redukci průřezu 25,3%, redukční úhel je 13°.

V poslední protlačovací operaci je provedena redukce z průměru 17,2mm na průměr 14,8mm, to odpovídá redukci průřezu 26%, redukční úhel je 13°.

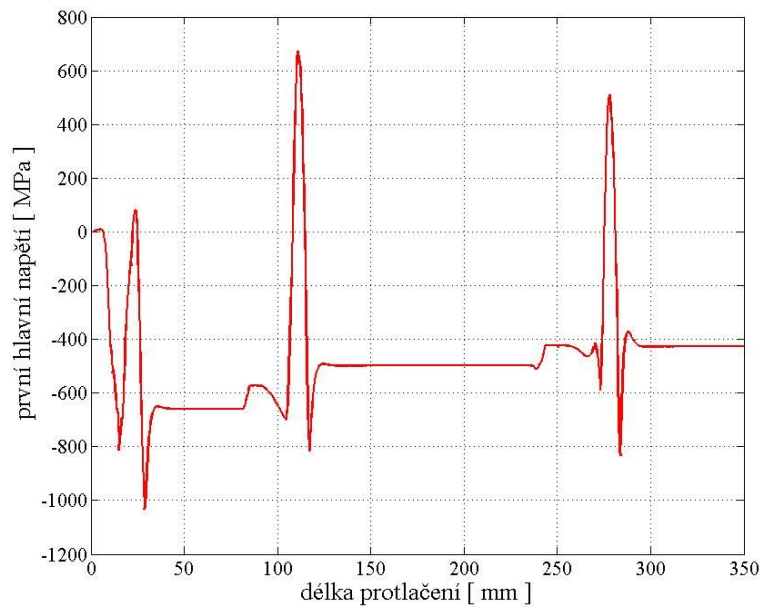
Tyto hodnoty byly použity jako vstupní parametry do předchozího výpočtového modelu a byla proveden výpočet.



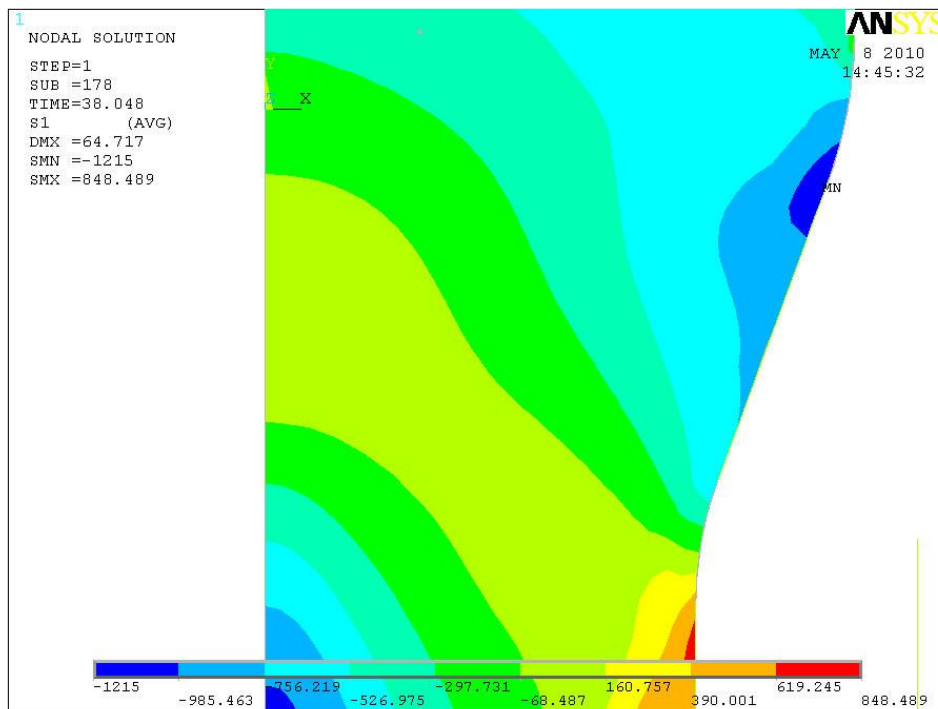
Obr. 33 Protlačovaná součást

### 13.2. Výsledné hodnoty pro testovanou součást

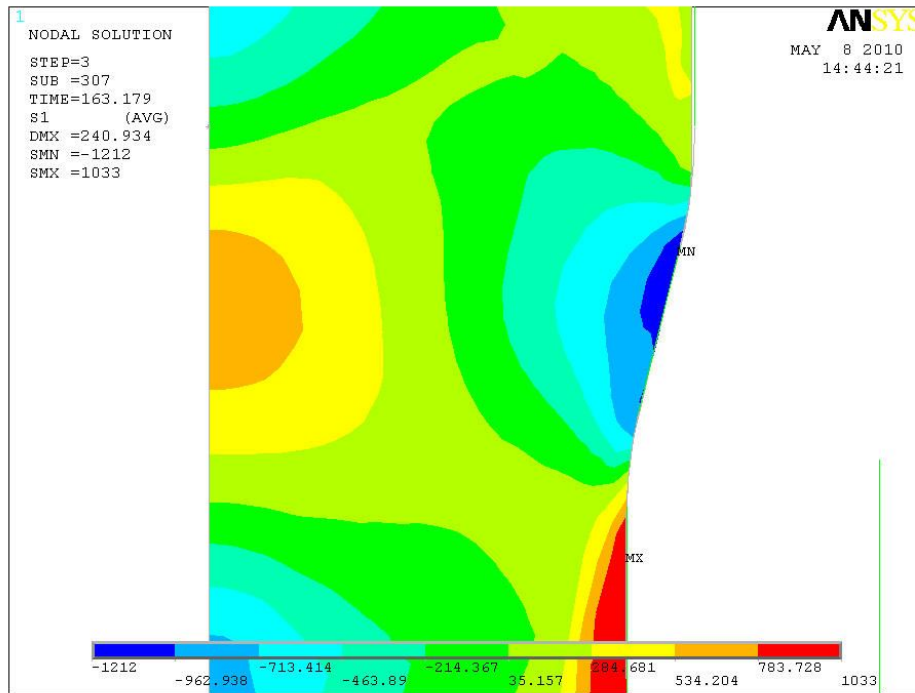
V grafu na Obr. 34 je zobrazen průběh prvního hlavního napětí. Nejvyšší hodnoty je dosaženo během druhé protlačovací operace. Na obrázcích 35 až 37 je zobrazeno rozložení napětí v průřezu součásti.



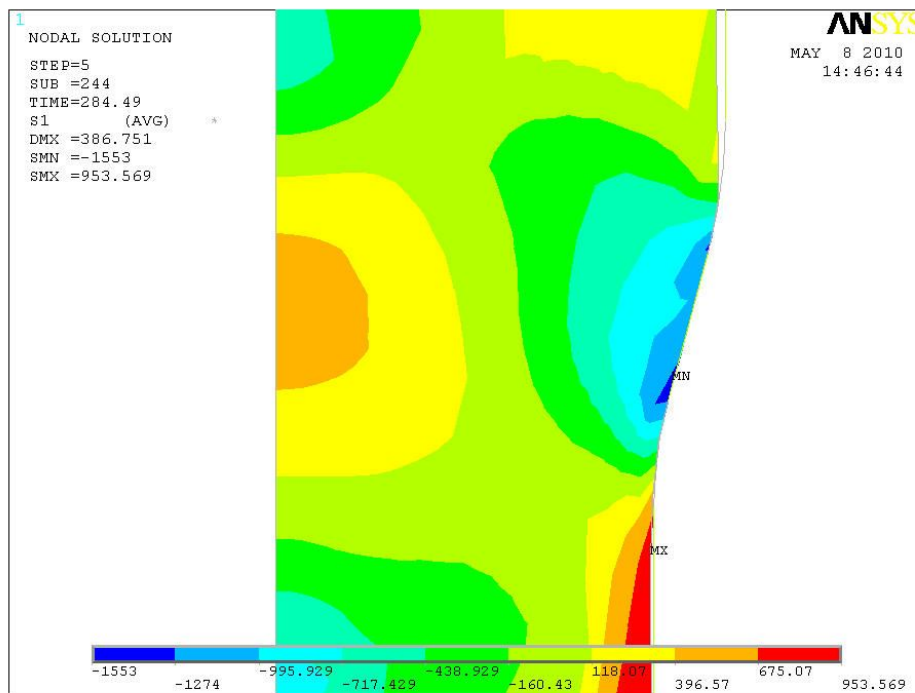
Obr. 34 První hlavní napětí pro testovanou součást



Obr. 35 Rozložení prvního hlavního napětí na prvním stupni



Obr. 36 Rozložení prvního hlavního napětí na druhém stupni

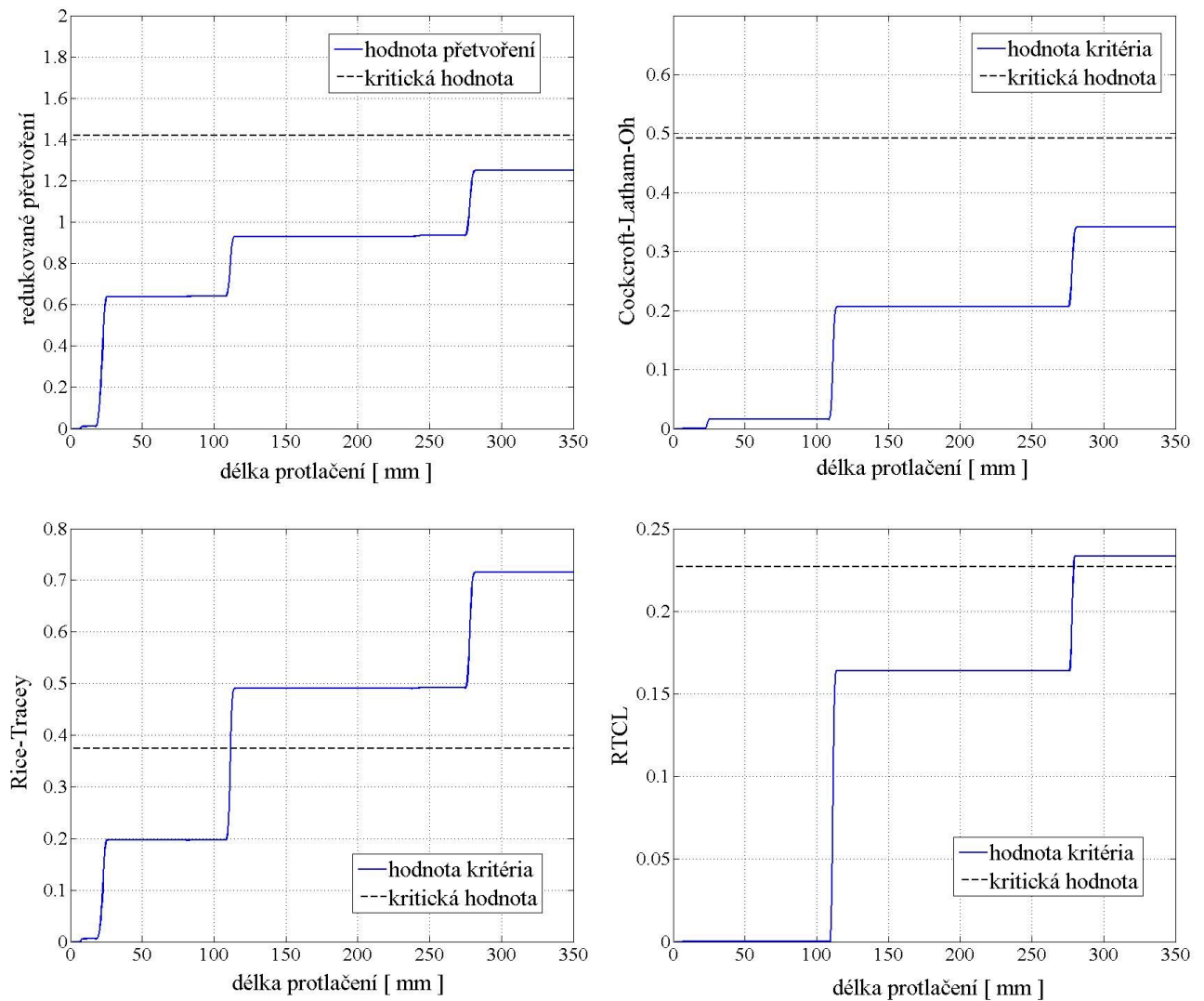


Obr. 37 Rozložení prvního hlavního napětí na třetím stupni

V grafech na následujícím obrázku jsou zobrazeny průběhy jednotlivých kritérií.

Podle kritérií redukovaného přetvoření a Cockcroft-Latham-Oh k porušení součásti nedochází.

Pro kritérium Rice-Tracey dojde k porušení během druhé protlačovací operace, podle kritéria RTCL dochází k porušení během třetí tvářecí operace.



Obr. 38 Průběhy kritérií pro testovanou součást

## 14. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést studii vlivu procesních parametrů při dopředném protlačování na vznik centrálních trhlin v průtlačku pomocí výpočtového modelování. Zkoumané parametry byly tření, velikost redukce průřezu, redukční úhel a počet protlačovacích operací. Výpočtové modelování dopředného protlačování za studena bylo provedeno v programu ANSYS 11.0 a následné zpracování v programu MATLAB R2007a. Výpočty byly provedeny pro ocel 12 050.3. Pro tento materiál byly známy hodnoty z tahové zkoušky a kritické hodnoty pro použitá kritéria porušení ( redukované přetvoření, Cockcroft-Latham-Oh, Rice-Tracey, RTCL ). Všechna tato kritéria ukazují shodné závislosti na sledovaných parametrech. Některých případech se však liší v dosahování kritických hodnot.

Výsledky dle sledovaných kritérií lze shrnout takto:

- Snižuje-li se koeficient tření, klesá protlačovací síla ale dochází ke vzniku větších tahových napětí na ose průtlačku, což přispívá ke vzniku trhlin. S vyššími koeficienty tření riziko vzniku trhlin klesá.
- Se zvětšujícím se úhlem redukce stoupá riziko vzniku trhlin, závislost na úhlu redukce se mění s velikostí redukce průřezu.
- Se zvětšujícím se redukcí průřezu nebezpečí vzniku trhlin nejprve roste a poté opět klesá. Své maximální hodnoty dosahuje ve středních hodnotách redukce. Závislost na redukcii se mění s velikostí redukčního úhlu.
- Při protlačování na více kroků se i při stejném konečném přetvoření výrazně zvyšuje nebezpečí vzniku trhlin.

Z těchto výsledků vyplývá, že pro bezpečné protlačování by se mělo používat malých redukčních úhlů, neměli by se volit střední redukce a protlačení by mělo probíhat na co nejméně kroků je možné.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

(v pořadí podle použití v textu)

$\bar{e}$ .....	reduované přetvoření
$\bar{e}_f$ .....	kritická hodnota reduovaného přetvoření
$s_1$ .....	první hlavní napětí
$C_{CL}$ .....	kritická hodnota kriteria Cockcroft-Latham
$\bar{s}$ .....	reduované napětí HMH
$C_{CLO}$ .....	kritická hodnota kriteria Cockcroft-Latham-Oh
$h$ .....	parametr triaxiality
$C_{RT}$ .....	kritická hodnota kriteria Rice-Tracey
$s_m$ .....	střední napětí
$C_{RTCL}$ .....	kritická hodnota kriteria RTCL
$e$ .....	inženýrské přetvoření
$L$ .....	deformovaná délka vzorku
$L_0$ .....	původní délka vzorku
$r_D$ .....	redukce průměru
$r_S$ .....	redukce průřezu



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Model materiálu .....	16
Obr. 2 Model geometrie .....	17
Obr. 3 Vliv hustoty sítě .....	19
Obr. 4 Diskretizace průtlačku .....	19
Obr. 5 Prvek PLANE182 .....	19
Obr. 6 Prvek CONTA172.....	20
Obr. 7 Prvek TARGE169 .....	20
Obr. 8 První hlavní napětí $\alpha = 20^\circ, r_s = 36\%$ .....	22
Obr. 9 Oblast tahových napětí $\alpha = 20^\circ, r_s = 36\%$ .....	23
Obr. 10 Redukované přetvoření $\alpha = 20^\circ, r_s = 36\%$ .....	23
Obr. 11 Průběhy sledovaných kritérií $\alpha = 20^\circ, r_s = 36\%$ .....	24
Obr. 12 První hlavní napětí pro různé koeficienty tření .....	25
Obr. 13 Srovnání kritérií pro různé koeficienty tření .....	26
Obr. 14 První hlavní napětí pro různé redukční úhly.....	27
Obr. 15 Srovnání kritérií pro různé redukční úhly .....	28
Obr. 16 První hlavní napětí pro různé redukce průřezu.....	29
Obr. 17 Srovnání kritérií pro různé redukce průřezu.....	30
Obr. 18 Závislost prvního hlavního napětí na úhlu a redukci .....	31
Obr. 19 Závislost ekvivalentního přetvoření na úhlu a redukci .....	32
Obr. 20 Závislost kritéria Cockcroft-Latham-Oh na úhlu a redukci.....	33
Obr. 21 Závislost kritéria Rice-Tracey na úhlu a redukci.....	33
Obr. 22 Závislost kritéria RTCL na úhlu a redukci .....	34
Obr. 23 První hlavní napětí pro různý počet protlačení.....	35
Obr. 24 Srovnání kritérií pro různý počet protlačení.....	36
Obr. 25 První hlavní napětí pro více operací v závislosti na úhlu a redukci.....	37

Obr. 26 Ekvivalentní přetvoření pro více operací v závislosti na úhlu a redukci.....	38
Obr. 27 Kritérium Cockcroft-Latham-Oh pro více operací v závislosti na úhlu a redukci .....	38
Obr. 28 Kritérium Rice-Tracey pro více operací v závislosti na úhlu a redukci.....	39
Obr. 29 Kritérium RTCL pro více operací v závislosti na úhlu a redukci.....	39
Obr. 30 Mezní křivka pro kritérium Cockcroft-Latham-Oh .....	40
Obr. 31 Mezní křivka pro kritérium Rice-Tracey.....	41
Obr. 32 Mezní křivka pro kritérium RTCL.....	41
Obr. 33 Protlačovaná součást .....	43
Obr. 34 První hlavní napětí pro testovanou součást .....	44
Obr. 35 Rozložení prvního hlavního napětí na prvním stupni .....	44
Obr. 36 Rozložení prvního hlavního napětí na druhém stupni.....	45
Obr. 37 Rozložení prvního hlavního napětí na třetím stupni .....	45
Obr. 38 Průběhy kritérií pro testovanou součást .....	46

## POUŽITÁ LITERATURA

- [ 1 ] SKALKA, P. a kol: *Numerical prediction of central bursting in axisymmetric cold drawing of brass bar*, Proc. of Engineering Mechanics, Svratka, 2007
- [ 2 ] SAANOUNI K., MARIAGE J.F., CHEROAUT A., LESTRIEZ P.: *Numerical prediction of discontinuous central bursting in axisymmetric forward extrusion by continuum damage mechanics*, *Comp. Struct.* 82 (2004), 2309-2332
- [ 3 ] BOŘKOVEC, J. *Výpočtová simulace procesu dělení materiálu*, Disertační práce. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008.
- [ 4 ] COCKCROFT, M. G., and LATHAM, D. J. *Ductility and the workability of metals*. *International Journal of the Institute of Metals*, 1968, vol. 96, p. 33–39.
- [ 5 ] OH, S., CHEN, C. C., KOBAYASHI, S. *Ductile failure in axisymmetric extrusion and drawing* *Journal of Engineering for Industry*, 1979, vol. 101, p. 36–44.
- [ 6 ] RICE, J. R., TRACEY, D. M. *On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1969 , vol. 17, p. 201–217.
- [ 7 ] TÖRNQVIST, R. *Design of Crashworthy Ship Structures*. University of Denmark, 2003.
- [ 8 ] WIERZBICKI, T., WERNER, H. *Cockcroft and Latham revised*. Impact and Crashworthiness Laboratory Report no. 16, MIT, 1998.