

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta strojního inženýrství  
Ústav mechaniky těles

**Ing. Jiří Šuta**

**PREDIKCE PORUŠOVÁNÍ KOVŮ PŘI TVÁŘENÍ**  
**FRACTURE PREDICTION OF METALS IN FORMING**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Inženýrská mechanika

Školitel: Doc. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Pavel Macura, DrSc.  
Doc. Ing. Stanislav Ruzs, CSc.  
Ing. Libor Janíček, Dr.

Datum obhajoby: 19. 6. 2003

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*tváření za studena, tvárný lom, predikce tvárného lomu, kriteria lomu, přechování, tvařitelnost, limity tvařitelnosti*

## **KEY WORDS**

*cold forming, ductile fracture, ductile fracture prediction, fracture criteria, simple upsetting, workability, workability limits*

Originál disertační práce je uložen na Ústavu mechaniky těles FSI VUT Brno.

# Obsah

1 ÚVOD.....	5
1.1 Popis problému .....	5
1.2 Cíle disertační práce.....	6
2 METODIKA ZPRACOVÁNÍ.....	7
2.1 Kritéria tvárného lomu při plastických deformacích .....	7
2.2 Postup ověření kvality kritérií tvárného lomu .....	9
2.3 Experimentální modelování .....	10
2.4 Výpočtové modelování .....	11
3 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE .....	13
3.1 Kritérium Freudenthal.....	13
3.1.1 Úspěšnost kritéria při predikci místa lomu.....	14
3.2 Kritérium Brozzo .....	14
3.2.1 Úspěšnost kritéria při predikci místa lomu.....	14
3.2.2 Kvantitativní hodnocení kritéria – lomové hodnoty veličiny $C_6$ .....	15
3.3 Shrnutí a diskuse výsledků testovaných kritérií tvárného lomu .....	18
3.4 Praktická aplikace kritérií tvárného lomu při návrhu technologického procesu výroby šroubu.....	20
3.4.1 Stanovení lomových hodnot kritériálních veličin pro materiál 23MnB4.....	20
3.4.2 Výpočet rozložení kritériálních veličin ve šroubu.....	21
4 ZÁVĚR.....	23
5 VÝBĚR Z POUŽITÉ LITERATURY .....	26
6 SEZNAM AUTOROVÝCH PRACÍ ZAMĚŘENÝCH NA DISKUTOVANOU PROBLEMATIKU.....	27
7 ŽIVOTOPIS.....	27
8 SUMMARY.....	28



# 1 ÚVOD

## 1.1 POPIS PROBLÉMU

Pro svou vysokou produktivitu a využití v sériové výrobě zaujímá tváření stále důležitější místo ve výrobě mechanických dílů. Výrobci se proto snaží optimalizovat procesy tváření využitím nejnovějších simulačních metod, které jsou v důsledku rychlého vývoje výpočetních prostředků stále dostupnější. Rozšiřuje se studium vzniku a rozvoje vad v materiálu v průběhu tvářecích procesů, problematiky stanovení limitů tvařitelnosti a obecně celé oblasti vzniku tvárného porušení a možností jeho včasné a úspěšné predikce. Schopnost předpovědět okamžik vzniku tvárného lomu snižuje výskyt možných poruch v průběhu procesu tváření a umožňuje jeho brzkou modifikaci už ve fázi návrhu technologického postupu, což zároveň vede k podstatnému snížení nákladů.

Vznik **tvárného lomu** je limitujícím faktorem ve většině tvářecích procesů. Vyjadřuje vyčerpání schopnosti materiálu dále se plasticky deformovat. Tento komplexní jev je ovlivněn mnoha různými faktory. Jsou to jak vlastnosti materiálu, tak parametry přetvárného procesu jako jsou teplota, rychlost deformace, lokální napětí a přetvoření, dotykové podmínky mezi nástrojem a materiálem a relativní pohyb tvářeného kusu vzhledem k nástroji, kterým se vytváří konečný tvar výrobku.

V minulosti byly formulovány mnohé empirické a fenomenologické modely chování materiálu v průběhu tvářecích procesů s cílem předpovědět vznik možného porušení. Predikce vzniku tvárného lomu však zůstala často omezena na empirický přístup a aplikace jednotlivých kritérií, užívaných pro určování porušení, byla zúžena jen na určité třídy technologických procesů, tvářených materiálů a geometrie výrobků.

Pokrok v rozvoji matematické simulace procesů tváření na základě teorie plasticity a numerických výpočtů metodou konečných prvků (dále jen MKP) umožnil nové, obecnější přístupy při výzkumu kritérií tvárného lomu. Použití MKP umožňuje detailně analyzovat napěťový a deformační stav během procesu velkých plastických deformací materiálu. Z této analýzy lze určit lokální historii vývoje napjatosti a deformace a definovat tak kritéria tvárného lomu na obecnějších základech.

Fenomenologická kritéria tvárného lomu obsahují v definičních vztazích napěťové a deformační veličiny a další parametry přetvárného procesu, které jsou definovány jako materiálové konstanty. Při numerické simulaci lze tyto lokální charakteristické veličiny v každém kroku postupně zjišťovat, vyhodnocovat definiční vztahy kritérií a předpovědět tak místo a dobu vzniku tvárného lomu materiálu v průběhu simulovaného tvářecího procesu. Srovnáním získaných numerických výsledků MKP simulace procesu tváření s experimentálními daty a poznatky z provozní praxe lze objektivněji posoudit míru obecnosti a spolehlivosti

jednotlivých kritérií při predikci tvárného lomu. Tyto poznatky je následně možno využít již v etapě návrhu parametrů reálných tvářecích procesů.

## **1.2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE**

Cílem předkládané disertační práce je posoudit kvalitu vybraných kritérií tvárného lomu z hlediska schopnosti předpovědět místo a dobu jeho vzniku v průběhu tvářecího procesu. Způsob, jak tohoto cíle dosáhnout, je prokázat nezávislost kritériálních veličin na silově-deformačních podmínkách konkrétních tvářecích procesů. Jen v případě potvrzení této nezávislosti jsou lomové hodnoty kritériálních veličin, zjištěné v podmínkách konkrétních experimentů (např. přechovacích zkoušek), přenositelné na další tvářecí procesy.

Vybraná nejkvalitnější kritéria tvárného lomu je třeba integrovat do uceleného programového systému – postprocesoru MKP. Ten by měl být navržen tak, aby byl snadno využitelný pro zpracování výsledků numerických simulací tvářecích procesů z různých MKP systémů.

V rámci práce byl pro výpočty numerických simulací přechovacích zkoušek využit univerzální programový systém konečných prvků ANSYS a pro výpočty podmínek tvárného lomu vybraných kritérií tvařitelnosti pak matematický program MathCAD.

## 2 METODIKA ZPRACOVÁNÍ

### 2.1 KRITÉRIA TVÁRNÉHO LOMU PŘI PLASTICKÝCH DEFORMACÍCH

V minulosti byly formulovány rozličné empirické a fenomenologické modely chování materiálu v průběhu tvářecích procesů. Historicky vznikl velký počet kritérií tvárného lomu, avšak nebyla vytvořena žádná obecná teorie jeho predikce. Při formulaci a ověřování jednotlivých kritérií převládal empirický a poloempirický přístup, který neumožňoval jejich definici na obecnějším základě. Z toho často vyplývala omezenost aplikace jednotlivých kritérií tvárného lomu pouze na určité skupiny technologických procesů, případně druhy materiálů a geometrické parametry.

Kritéria tvárného lomu můžeme rozdělit do dvou hlavních kategorií:

- A. Kritéria založená na studiu mikrostruktury materiálu a změn, které vedou ke vzniku a rozvoji porušení v průběhu procesu tváření. Vychází z teorie vzniku, růstu a spojování dutin v materiálu.
- B. Kritéria založená na makroskopických efektech mikroskopických procesů vedoucích k tvárnému lomu a formulovaná pomocí veličin mechaniky kontinua.

Studium kritérií z první skupiny je velmi náročné jak z hlediska teoretického, tak z hlediska experimentálního při získávání potřebných materiálových charakteristik. K praktickým inženýrským aplikacím se jeví jako vhodnější druhá skupina kritérií, pro která lze materiálové konstanty získat z běžných zkoušek a potřebné napětíové a deformační veličiny určovat např. pomocí analýzy MKP. V tab. 1 jsou uvedena některá fenomenologická kritéria, jejich definiční vztahy a stručná charakteristika.

1.	Kritérium <b>maximálního tahového napětí</b>	$\sigma_1 = \sigma_{krit}$	<b>maximální tahové napětí</b> dosáhne kritické hodnoty
2.	Kritérium <b>maximálního přetvoření</b>	$\varepsilon_1 = \varepsilon_{krit}$	<b>maximální přetvoření</b> dosáhne kritické hodnoty
3.	Kritérium <b>Freudenthal</b>	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C3$	<b>deformační energie na jednotku objemu</b> dosáhne kritické hodnoty

4.	Kriterium <b>Cockroft- Latham</b>	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\varepsilon} = C4$	integrál <b>plastické práce tahové složky napjatosti</b> dosáhne kritické hodnoty
5.	Kriterium <b>hydrostatického napětí</b>	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_H d\bar{\varepsilon} = C5$	určující veličinou pro vznik tvárného lomu je <b>hydrostatické napětí</b>
6.	Kriterium <b>Brozzo</b>	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_H)} d\bar{\varepsilon} = C6$	kriterium závisí na <b>max. hl. tahovém napětí a hydrostatické složce napjatosti</b>
7.	Kriterium <b>Oh</b>	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} = C7$	<b>poměr</b> maximálního tahového a redukovaného napětí
8.	Kriterium <b>Osakada a Mori</b>	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} (B + \bar{\varepsilon} + D\sigma_H) d\bar{\varepsilon} = C8$	explicitní závislost na <b>efektivním přetvoření a hydrostatické složce napjatosti</b>
9.	Kriterium <b>Oyane</b>	$\bar{\varepsilon}_f = -\frac{1}{A} \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} + C9$	<b>objemová deformace</b> dosáhne kritické hodnoty
10.	Kriterium <b>Ghosh</b>	$k_f = \sigma_H \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2}$	testuje okamžité hodnoty parametru poškození
11.	Kriterium <b>Norris</b>	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{1}{(1 - c\sigma_H)} d\bar{\varepsilon} = C11$	integrál funkce <b>hydrostatického napětí</b> dosáhne kritické hodnoty
12.	Kriterium <b>Atkins</b>	$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{(1 + \frac{1}{2L})}{(1 - c\sigma_H)} d\bar{\varepsilon} = C12$ $L = \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_2}$	integrál funkce <b>hydrostatického napětí</b> doplněný o <b>podíl hlavních přetvoření L</b> dosáhne kritické hodnoty

Tab. 1. Přehled vybraných kriterií tvárného lomu



Z hlediska praktické použitelnosti, frekvence využívání v reálných technologických procesech a vzhledem k orientaci disertační práce do oblasti objemového tváření byla pro další podrobnější zkoumání vybrána následující kritéria: maximálního tahového napětí, maximálního přetvoření, Freudenthal, Cockroft – Latham, hydrostatického napětí, Brozzo, Oh, Ghosh a Oyane.

## 2.2 POSTUP OVĚŘENÍ KVALITY KRITÉRIÍ TVÁRNÉHO LOMU

Základní myšlenkou verifikace a hodnocení spolehlivosti kritérií tvárného lomu je porovnání experimentálně zjištěných dat z pěstovacích zkoušek s výsledky numerických simulací těchto zkoušek. Při numerické simulaci lze získávat napětíové a deformační parametry materiálu během přetvárného procesu a vyčíslit podmínky tvárného porušení pro jednotlivá kritéria až do lomu. Výsledky predikce tvárného lomu - tj. místo poruchy a lomovou hodnotu kritériální veličiny - dosažené použitím napětíových a deformačních veličin z numerických simulací lze porovnat s experimentálně naměřenými daty a zhodnotit tak kvalitu kritérií. Pro ověření kvality a spolehlivosti kritérií tvárného lomu byl navržen postup, který se skládá z následujících, dílčích kroků:

1. Z dostupných provedených experimentálních prací byly vybrány vhodné skupiny pěstovacích zkoušek, které pokrývají pokud možno co nejširší rozpětí třecích podmínek a geometrických parametrů. Tak bylo možné simulovat na jednom typu materiálové zkoušky (pěstování) více různých typů historie napětíových a deformačních veličin.
2. V prostředí programového systému konečných prvků ANSYS byl vytvořen model pěstovací zkoušky. Byla definována geometrie modelu, zadány materiálové charakteristiky, okrajové podmínky a způsob zatěžování. Dále bylo nutno vyladit nastavení vnitřních systémových proměnných tak, aby byla zajištěna dobrá konvergence nelineárního výpočetního procesu, který analýza pěstovací zkoušky představuje.
3. Byla provedena řada simulací pěstovacích zkoušek pro vybraný interval hodnot koeficientu tření  $f$  mezi kovadly pěstovacího stroje a čelem vzorku variantně pro 3 provedené režimy pěstování - pěstování s drážkovanými kovadly, s hladkými kovadly a s hladkými kovadly s mazivem. Výsledky, získané z těchto parametrických výpočtů, byly porovnány s experimentálně naměřenými hodnotami deformací vzorků a byly co nejpřesněji určeny hodnoty koeficientů tření  $f$  pro všechny tři režimy pěstování - s drážkovanými, hladkými a hladkými-mazanými kovadly.
4. Postupně byly realizovány simulace všech vybraných experimentálně provedených pěstování pro oba zvolené pěstované materiály, druhy kovadel (tj. režimy tření nástroj-vzorek) a všechny typy výchozí geometrie vzorků (tj. poměry výchozí výšky vzorků k jejich průměru  $h_0/d_0$ ).

5. V prostředí ANSYSu byl sestaven a odladěn program pro vznik výsledkového souboru s jednotným formátem, který obsahuje napěťové a deformační veličiny simulovaného pěchování. Tyto údaje jsou dále použity pro výpočet podmínek tvárného lomu u jednotlivých kritérií.
6. V prostředí systému MathCAD vznikly pro všechna vybraná kritéria predikce tvárného lomu programy, které zpracují data z výsledkového souboru simulace pěchování v ANSYSu a vypočtou kritické lomové hodnoty kritériálních veličin - limity tvařitelnosti.
7. Pro každou provedenou simulaci konkrétní pěchovací zkoušky byly ze známého, experimentálně určeného okamžiku lomu stanoveny s využitím výpočtově určených veličin deformace-napětí hodnoty kritériálních veličin jednotlivých vybraných kritérií tvárného lomu v okamžiku porušení. Dále bylo ověřováno, zda v experimentu skutečně dochází k lomu v místech, kde kritériální veličina nabývá své maximální hodnoty. Výsledky byly statisticky zpracovány a posloužily ke zhodnocení, do jaké míry jsou kritériální veličiny (tj.  $\sigma_{krit}$ ,  $\varepsilon_{krit}$ , C3, C4, ...C12 – dle tab. 1) skutečně nezávislé na konkrétních podmínkách tvářecích procesů (tj. na tření a výchozích geometrických rozměrech vzorků). Jejich nezávislost by svědčila o tom, že se skutečně jedná o veličiny, které charakterizují proces vzniku a rozvoje tvárného porušení, a příslušná kritéria by bylo možno užít obecně. V opačném případě je použitelnost kritéria vázána jen na určitý typ operace s definovaným charakterem napjatosti a deformace.

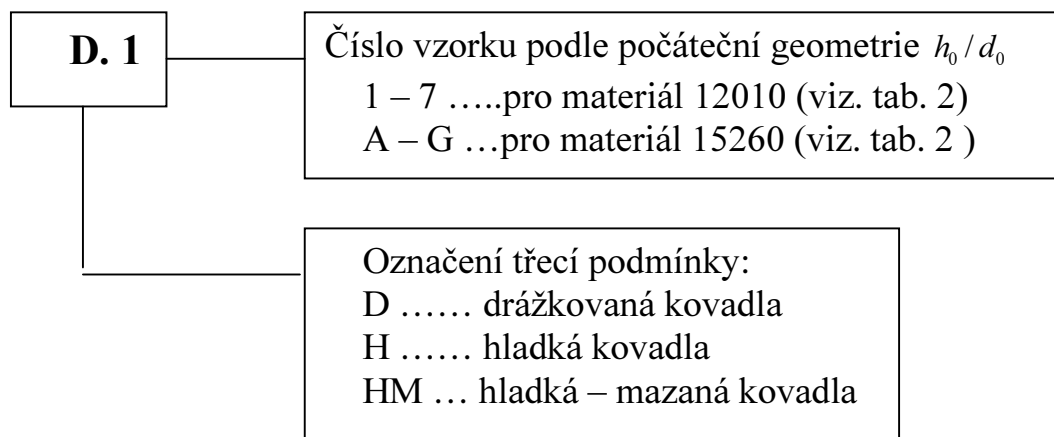
## 2.3 EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ

Pěchovací zkouška je nejjednodušší, dostupná a široce používaná možnost experimentálního určování tvařitelnosti. Lze ji definovat jako axiální stlačování kovového válcového vzorku definovaných rozměrů mezi čelistmi (kovadly) pěchovacího stroje za daných podmínek, jakými jsou tvar čelistí, tření mezi vzorkem a nástrojem, teplota, rychlost pohybu čelistí (tj. rychlost deformace). Při zkoušce se v postupných krocích sleduje mikroskopem volný povrch vzorku, aby se zjistil přesný okamžik výskytu velkých trhlin, které dále rychle rostou. Přetvoření, které odpovídá okamžiku vzniku těchto trhlin, se bere jako tvařitelnost (pěchovatelnost) vzorku.

Základní experimentální údaje byly získány na základě spolupráce s ÚST FSI v Brně, kde byla v minulosti realizována řada pěchovacích plastometrických zkoušek. V předkládané práci jsou využity výsledky z literatury [11], algoritmus postupu je však postaven tak, aby umožňoval využít dalších měření. Konkrétně jde o provedené pěchovací zkoušky vzorků ze dvou ocelových materiálů (ocel 12010 (TRISTAL) a ocel 15260), pro různé poměry výšky a průměru  $h_0 / d_0$  a různá tření.

Zkoušky proběhly ve třech režimech třecích poměrů. Byla použita kovádla s jemným drážkováním, hladká (broušená) kovádla a hladká kovádla s vrstvou maziva. V každém třecím režimu byla pro oba materiály spěchována jedna sada vzorků pro definované výchozí geometrické rozměry (viz. tab.2).

Označení vzorků: Pěchované vzorky (a také jejich příslušné simulace) jsou označeny následujícím způsobem:



Obr.1 Schéma označení vzorků

$d_0$ [mm]	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0
$h_0$ [mm]	14.0	16.8	18.9	21.0	22.4	23.9	28.0
$h_0/d_0$	1.00	1.20	1.35	1.50	1.60	1.71	2.00
12010	1	2	3	4	5	6	7
15260	A	B	C	D	E	F	G

Tab. 2. Označení (číslování) vzorků

Poznámka:

1. Pro materiál 15260 nebyly k dispozici výsledky pro vzorky označené D.A a HM.A.

## 2.4 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

Pro numerickou simulaci pěchovacích zkoušek byl zvolen široce využívaný programový systém metody konečných prvků ANSYS. Tento systém umožňuje simulovat procesy s velkými plastickými deformacemi, třením a kontaktem. Pěchovací zkouška byla modelována jako statický, izotermický děj, charakterizovaný křivkou přirozeného přetvárného odporu. Byl zanedbán vliv rychlosti přetvoření

a zjednodušeny podmínky stykového tření mezi nástrojem a vzorkem. V ANSYSu byl vytvořen MKP model s následujícími charakteristikami:

#### A. Elementy

**VISCO106** je rovinný 4-uzlový prvek definovaný souřadnicemi uzlů. Prvek je určen pro rovinné modelování prostorových těles a pro modelování ocelového válcového vzorku byla využita jeho osově-symetrická varianta.

**CONTAC26** je kontaktní 3-uzlový rovinný prvek definovaný souřadnicemi uzlů. Prvek umožňuje modelovat absolutně tuhý povrch v kontaktu s pružným tělesem bez tření nebo se třením podle Coulombova zákona. Prvek byl použit pro modelování kovadla tvářecího stroje, neboť deformace kovadla při pýchování je vzhledem k deformaci pýchovaného vzorku zanedbatelná.

#### B. Materiálový model

Materiál pýchovaných ocelových vzorků byl modelován podle Prandtlovy-Reusovy teorie plastického tečení s podmínkou plasticity HMM a s izotropním zpevněním. Modul pružnosti má hodnotu  $E = 210\,000$  MPa, Poissonovo číslo  $\mu = 0.3$ . Model zahrnuje geometrické nelinearity související s velkými deformacemi. Za těchto podmínek je třeba v ANSYSu zadávat materiálovou charakteristiku - přetvárný odpor - jako závislost skutečného napětí na skutečném přetvoření. Tyto závislosti byly přebrány z výše citované práce [11] a zadány formou tabulek pro oba zkoumané materiály.

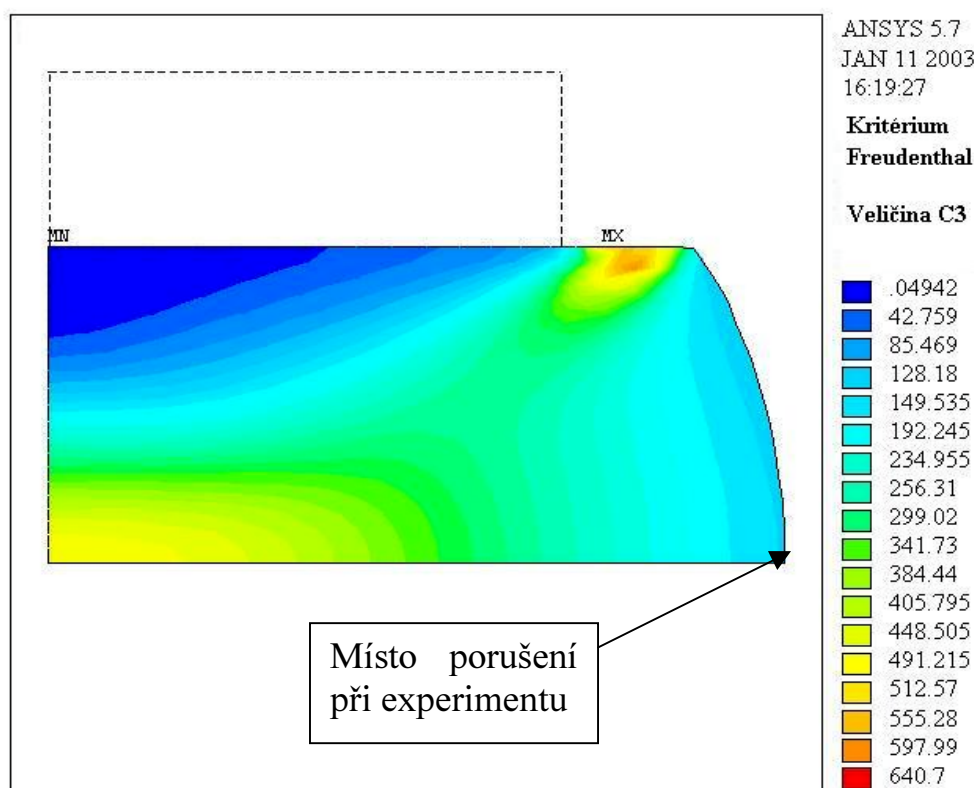
#### C. Geometrie, okrajové podmínky, zatížení

Vzhledem ke geometrii vzorků a danému zatížení v procesu pýchování představuje řešení napjatosti a deformace v průběhu pýchovací zkoušky rotačně-symetrickou úlohu se dvěma rovinami symetrie S využitím obou podmínek symetrie byla pro výpočty modelována jen (horní pravá) čtvrtina válce. Model je zatěžován předepsaným posuvem tuhého kontaktu (modeluje kovadlo) ve směru proti ose válcového vzorku. Jednotlivé zatěžovací kroky (tj. posuvy uzlových bodů kontaktu) odpovídají posuvům kovadel pýchovacího stroje při experimentech. V těchto krocích byly měřeny hodnoty deformace vzorků.

### 3 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Porovnáním provedených experimentů pěchovacích zkoušek a jejich numerických simulací byla vybraná skupina kritérií tvárného lomu hodnocena jak z hlediska úspěšnosti při predikci místa vzniku porušení, tak z pohledu možnosti jejich obecné aplikace ke stanovení limitů tvařitelnosti. Po provedení simulací pro všechny pěchované vzorky ( 2 oceli 12010 a 15260, 3 pěchovací režimy s drážkovanými, hladkými a hladkými-mazanými čelistmi lisovacího stroje, 7 hodnot výchozího geometrického parametru vzorku  $h_0/d_0$ ) byly jejich výsledky použity k ověření kvality vybraných kritérií tvárného lomu, identifikaci charakteristických kritériálních veličin a posouzení míry jejich obecnosti. Pro každé kritérium bylo nejprve zjištěno, zda maximum jeho kritériální veličiny nastává ve stejném místě vzorku, kde dochází při experimentu k porušení. U kritérií, která byla úspěšná z hlediska určení místa vzniku tvárného lomu byly dále zpracovány lomové hodnoty kritériální veličiny pro všechny pěchované vzorky a posouzena možnost aplikace daného kritéria k určování limitů tvařitelnosti. Pro ilustraci zvolené metodiky hodnocení kritérií je dále uvedeno zpracování dvou hodnocených kritérií – kritéria Freudenthal a kritéria Brozzo.

#### 3.1 KRITÉRIUM FREUDENTHAL



Obr. 2. Kritérium Freudenthal – rozložení hodnot kritériální veličiny C3 po průřezu pěchovaného vzorku v okamžiku lomu

Podle kritéria Freudenthal [5] je kritickou veličinou pro vznik plastického lomu deformační energie, která se v materiálu akumuluje během procesu deformace. K plastickému porušení dojde, jakmile deformační energie na jednotku objemu dosáhne během přetvárného procesu určité kritické hodnoty.

### 3.1.1 Úspěšnost kritéria při predikci místa lomu

Na obr. 2 vidíme rozložení hodnot kritériální veličiny C3 po průřezu pěchovaného vzorku (horní pravá čtvrtina průřezu) v okamžiku lomu. Veličina C3 (viz. tab. 1) představuje akumulovanou deformační energii (plastickou práci na jednotku objemu). Z obrázku vyplývá, že její maximum nastává v horní části vnější obvodové plochy ve styku s kovádkem pěchovacího stroje, zatímco při experimentu dochází k lomu na vnějším obvodu ve středu válcového vzorku. Kritérium predikuje nesprávně místo vzniku tvárného lomu pro všechny simulace provedených pěchování.

Vzhledem k relativně široké základně provedených experimentů, které byly zpracovány v rámci disertační práce (2 materiály, interval poměrů  $h_0/d_0$  a třecí podmínky), opravňují dosažené výsledky k závěru, že kritérium Freudenthal nelze obecně úspěšně použít při identifikaci místa porušení a určení mezí tvařitelnosti.

## 3.2 KRITÉRIUM BROZZO

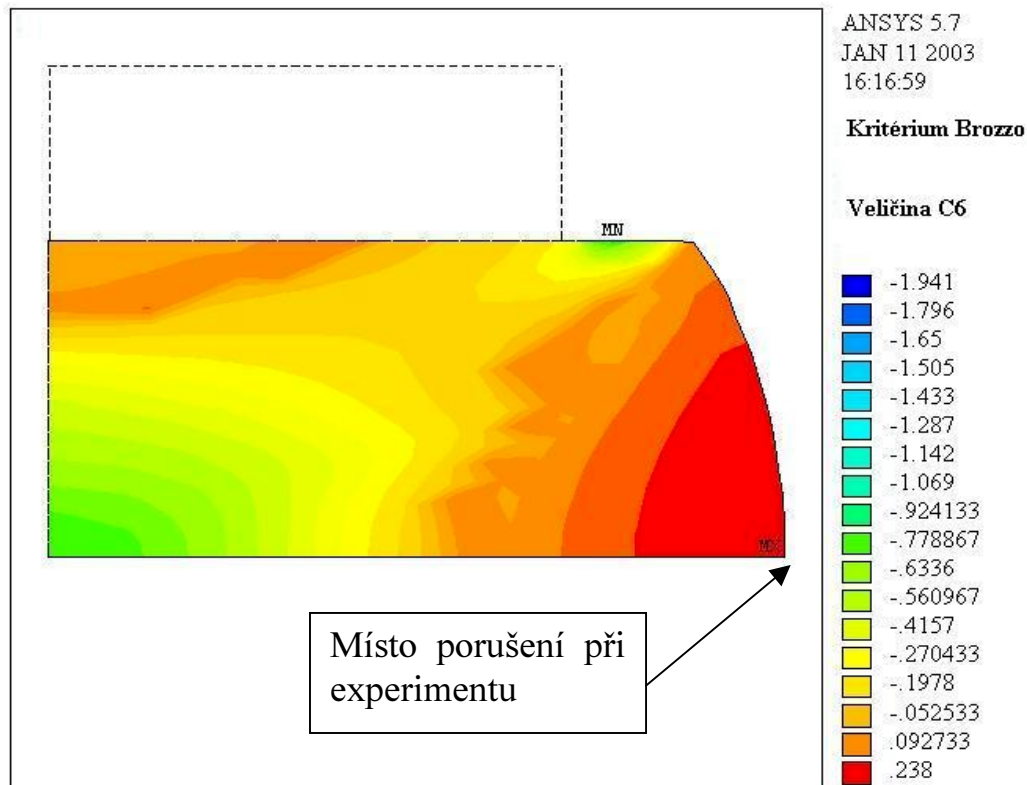
Kritérium Brozzo [2] je empirickou modifikací kritéria Cockroft-Latham. Definiční vztah kritéria obsahuje explicitní vliv hydrostatického napětí. Hodnota kritériální veličiny C6 závisí na maximálním hlavním tahovém napětí a na hydrostatické složce napjatosti.

### 3.2.1 Úspěšnost kritéria při predikci místa lomu

Z rozložení hodnot kritériální veličiny C6 po průřezu pěchovaného vzorku (horní pravá čtvrtina průřezu) na obr. 3 vidíme, že maximum z hodnot definičního integrálu kritéria nastává na vnějším obvodu ve středu válcového vzorku, což je v souladu s experimentem. V této oblasti dosahují při pěchování vysokých hodnot obvodová tahová napětí  $\sigma_1$ , která mají vzhledem ke konstrukci definičního vztahu kritéria (viz. tab. 1) podstatný vliv na nárůst akumulované kritériální veličiny C6.

Minimum hodnot kritériální veličiny C6 nastane v horní části vnější obvodové plochy ve styku s kovádkem pěchovacího stroje. V této oblasti jsou během pěchování všechna hlavní napětí tlaková a proto zde dosahuje kritériální veličina C6 záporných hodnot.

Ze srovnání výsledků pěstovacích experimentů a jejich numerických simulací plyne, že kritérium Brozzo bylo úspěšné při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny simulace pěstovaných vzorků z obou zkoumaných materiálů.



Obr. 3. Kritérium Brozzo – rozložení hodnot kritériální veličiny C6 po průřezu pěstovaného vzorku v okamžiku lomu

### 3.2.2 Kvantitativní hodnocení kritéria – lomové hodnoty veličiny C6

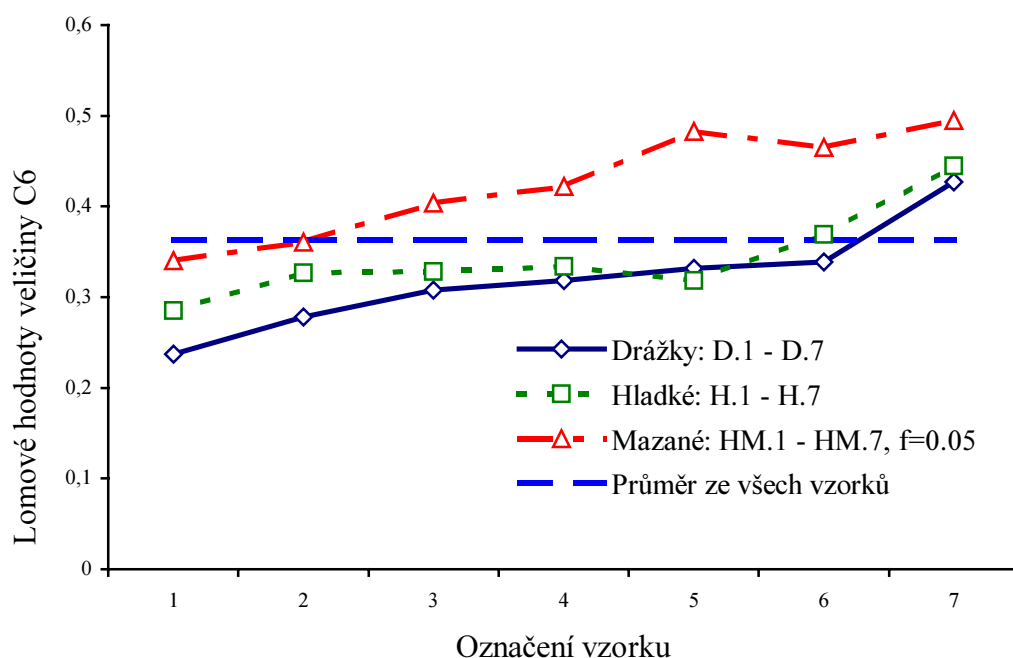
Na obr. 4 a 5 jsou uvedeny hodnoty akumulované kritériální veličiny C6 v okamžiku lomu pro všechny vzorky – obr. 4 pro materiál 12010, obr. 5 pro materiál 15260.

**Materiál 12010:** Z grafu na obr. 4 vyplývá, že lomové hodnoty kritériální veličiny C6 mají celkově rostoucí charakter v závislosti na rostoucím poměru výchozích geometrických rozměrů vzorku  $h_0/d_0$ . Výraznější odchylky nastávají u vzorku HM.5 a u nejvyšších vzorků D.7, H.7, HM.7 s poměrem  $h_0/d_0 = 2$ . V tab. 3 vidíme, že průměrné lomové hodnoty  $C6 = 0.32$  pro drážkované vzorky a  $C6 = 0.34$  pro hladké vzorky jsou v poměrně dobré shodě. Hodnota  $C6 = 0.42$  pro mazané

vzorky je asi o 27 % vyšší. Variační koeficienty jsou kvalitativně na stejné úrovni s hodnotami od  $V_k = 0.14$  pro mazané vzorky po  $V_k = 0.18$  pro vzorky drážkované.

Průměrná lomová hodnota kritériální veličiny C6 pro všechny vzorky je  $C_6 = 0.36$  s hodnotou variačního koeficientu  $V_k = 0.19$ .

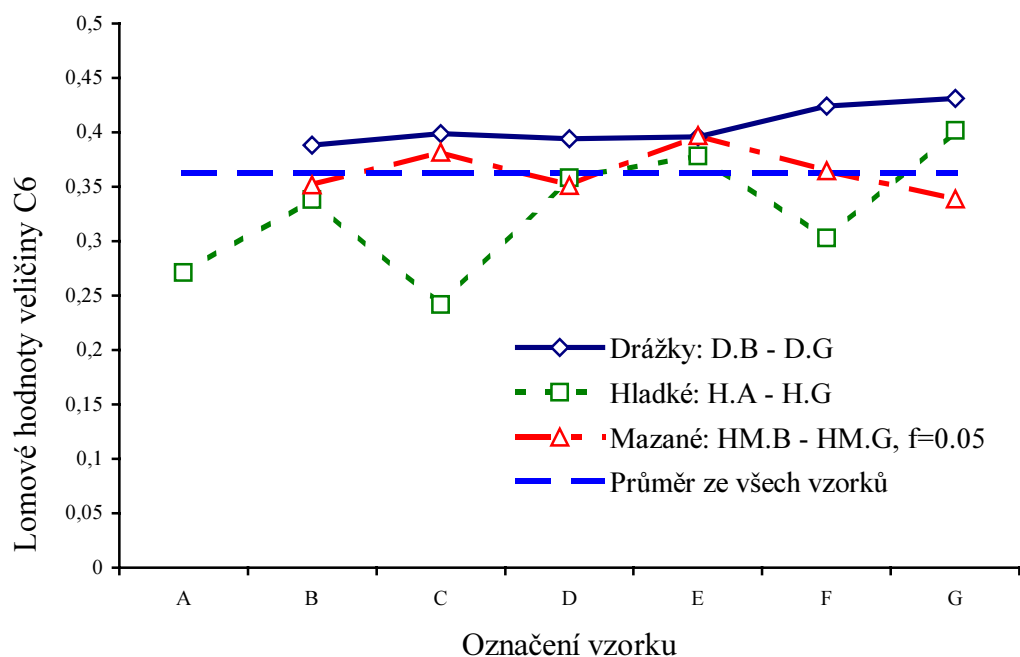
**Materiál 15260:** Na grafu na obr. 5 je vidět vyšší rozptyl kritériální veličiny C6 pro hladké vzorky ( vzorky H.C a H.F). Celkově rostoucí jsou hodnoty pro drážkované vzorky. Lomové hodnoty C6 pro mazané vzorky mají střídavě rostoucí a klesající charakter, odchylky od pomyslné střední hodnoty jsou relativně malé.



Obr. 4. Kritérium Brozzo - hodnoty kritériální veličiny C6 v okamžiku lomu pro všechny vzorky z materiálu 12010

Tab. 3 ukazuje, že průměrné lomové hodnoty  $C_6 = 0.41$  pro drážkované vzorky,  $C_6 = 0.33$  pro hladké vzorky a  $C_6 = 0.36$  pro mazané vzorky jsou blízké. Nejvyšší hodnota  $C_6 = 0.41$  pro drážkované vzorky je asi o 14 % vyšší než hodnota  $C_6 = 0.36$  pro mazané vzorky při velmi příznivých hodnotách variačního koeficientu  $V_k = 0.04 - 0.06$ . Hodnota  $C_6 = 0.33$  pro hladké vzorky se od hodnoty pro drážkované vzorky liší o 24 %, podstatný je však nárůst variačního koeficientu na hodnotu  $V_k = 0.18$ . To je oproti drážkovaným a mazaným vzorkům změna více než 200 %. Při započtení všech vzorků je dosažená průměrná lomová hodnota veličiny  $C_6 = 0.36$ , variační koeficient  $V_k = 0.14$ .





Obr. 5. Kritérium Brozzo - hodnoty kritériální veličiny C6 v okamžiku lomu pro všechny vzorky z materiálu 15260

Kritérium Brozzo		Lomové hodnoty kritériální veličiny C6					
		Materiál 12010			Materiál 15260		
		průměr [-]	směrodatná odchylka [-]	variační koeficient	Průměr [-]	směrodatná odchylka [-]	variační koeficient
1	drážkované vzorky	0.32	0.06	0.18	0.41	0.02	0.04
2	hladké vzorky	0.34	0.05	0.15	0.33	0.06	0.18
2	mazané vzorky	0.42	0.06	0.14	0.36	0.02	0.06
4	všechny vzorky	0.36	0.07	0.19	0.36	0.05	0.14

Tab. 3. Kritérium Brozzo - statistické vyhodnocení kritériální veličiny C6 v okamžiku lomu

Z obr. 4, 5 a z tab. 3 vyplývá, že:

- a) pro materiál 12010 je při započtení všech vzorků lomová hodnota kritériální veličiny  $C6 = 0.36$  s hodnotou variačního koeficientu  $V_k = 0.19$ .

- b) pro materiál 15260 je při započtení všech vzorků lomová hodnota kritériální veličiny  $C6 = 0.36$  s hodnotou variačního koeficientu  $V_k = 0.14$ .
- c) průměrné lomové hodnoty kritériální veličiny  $C6$  jsou pro oba zkoumané materiály shodné. Zde je podstatný rozdíl oproti předchozím kritériím. Důvodem je zřejmě tvar definičního vztahu kritéria, jehož základem je poměr  $\sigma_1 / (\sigma_1 - \sigma_H)$ .

Kritérium Brozzo bylo úspěšné při predikci místa tvárného lomu pro všechny simulace pěchovaných vzorků z obou zkoumaných materiálů. Na základě vyhodnocení dosažených výsledků lze předpokládat, že veličina  $C6$  je veličinou charakteristickou pro proces vzniku a rozvoje tvárného porušení pro materiály 12010 a 15260.

### 3.3 SHRUTÍ A DISKUSE VÝSLEDKŮ TESTOVANÝCH KRITÉRIÍ TVÁRNÉHO LOMU

Z analýzy všech výsledků vyplývají pro hodnocená kritéria následující závěry:

- Kritéria **maximálního přetvoření** a **Freudenthal** byla **neúspěšná při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky** z obou zkoumaných materiálů
- Kritérium **hydrostatického napětí** bylo při predikci místa vzniku tvárného lomu **úspěšné pouze pro některé pěchované vzorky**.
- Kritérium **Ghosh** bylo **úspěšné při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky** z obou zkoumaných materiálů. Rozptyl hodnot kritériální veličiny  $C8$  je však pro oba materiály vysoký s hodnotou variačního koeficientu  $V_k \geq 0.5$ . **Kritérium proto nelze použít obecně pro stanovení limitů tvařitelnosti.**
- Kritérium **maximálního tahového napětí** bylo **úspěšné při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky** z obou zkoumaných materiálů. Rozbor lomových hodnot kritériální veličiny  $C1$  však ukazuje podstatnou závislost na podmínkách experimentu. **Obecně proto kritérium nelze použít při stanovení limitů tvařitelnosti.**
- Kritéria **Cockroft-Latham, Brozzo, Oh a Oyane** byla **úspěšná při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky** z obou zkoumaných materiálů. Rozbor hodnot kritériálních veličin u těchto kritérií umožňuje s technicky přijatelnou mírou přesnosti vyslovit předpoklad, že **tyto kritériální veličiny při použití odpovídajícího kritéria dobře charakterizují rozvoj poškození a vznik tvárného lomu pro oba studované materiály.**

Přehledné výsledky úspěšnosti všech hodnocených kritérií jsou uvedeny v tab. 4. V tab. 5 jsou uvedena kritéria tvárného lomu, která byla na základě všech dosažených výsledků hodnocena jako nejúspěšnější při predikci místa vzniku tvárného lomu a z hlediska možného obecnějšího využití při stanovení limitů tvařitelnosti. Pro tato kritéria obsahuje tabulka průměrné lomové hodnoty kritériálních veličin určené ze všech vzorků a hodnoty variačního koeficientu. Pro kritérium Oyane je uveden koeficient korelace.

Materiál	Hodnocené hledisko	Hodnocená kritéria								
		maximálního tahového napětí	maximálního přetvoření	Freudenthal	Cockroft-	hydrostatického napětí	Brozzo	Oh	Ghosh	Oyane
Materiál 12010	Identifikace místa lomu	x	o	o	x	x*	x	x	x	x
	Určení limitů tvařitelnosti	o	-	-	x	-	x	x	o	x
Materiál 15260	Identifikace místa lomu	x	o	o	x	x*	x	x	x	x
	Určení limitů tvařitelnosti	-	-	-	x	-	x	x	o	x

Tab. 4. Hodnocení úspěšnosti zkoumaných kritérií tvárného lomu  
(x úspěšné o neúspěšné x\* částečně úspěšné - nezkoumáno)

Hodnoty kritériálních veličin získané ze všech vzorků		Hodnocená kritéria								
		Cockroft-Latham C4		Brozzo C6		Oh C7		Oyane A9, C9		
		průměr [MPa]	variační koef.	průměr [-]	variační koef.	průměr [-]	variační koef.	A9 [-]	C9 [-]	Korelační koef.
1	12010	136	0.22	0.36	0.19	0.31	0.17	0.31	0.51	-0.94
2	15260	273	0.20	0.36	0.14	0.31	0.18	0.44	0.60	-0.92

Tab. 5. Lomové hodnoty kritériálních veličin vybraných kritérií tvárného lomu

### 3.4 PRAKTICKÁ APLIKACE KRITÉRIÍ TVÁRNÉHO LOMU PŘI NÁVRHU TECHNOLOGICKÉHO PROCESU VÝROBY ŠROUBU

Vybraná kritéria byla aplikována pro predikci možného vzniku tvárného lomu při výrobě šroubů tvářením za studena. Zde jsou uvedeny výsledky stanovení lomových kritériálních veličin pro šroubovou ocel 23MnB4 a identifikace možných nebezpečných míst v procesu výroby šroubů tvářením za studena.

Aplikace zvolených kritérií tvárného lomu – kritérium **Brozzo, Cockcroft-Latham, Freudenthal a Oh** - na proces tváření šroubů se skládá ze dvou hlavních částí:

1. Stanovení lomových hodnot kritériálních veličin vybraných kritérií tvárného lomu pro materiál 23MnB4 na základě srovnání výsledků petchovacích experimentů a jejich numerických simulací.
2. Výpočet hodnot kritériálních veličin v polotovaru šroubu s cílem určit nebezpečná místa z hlediska možného vzniku tvárného lomu.

#### 3.4.1 Stanovení lomových hodnot kritériálních veličin pro materiál 23MnB4

Postup stanovení lomových hodnot kritériálních veličin je popsán v kapitole 2.2. Byly vypočteny simulace 5 petchovacích zkoušek vzorků z oceli 23MnB4, které byly experimentálně provedeny v rámci řešení *Výzkumných záměrů*

č. CEZ:J22/98:262100003 a č. CEZ:J22/98:262100001. Po konverzi výsledků byly pro všechny vzorky spočteny lomové hodnoty kritériálních veličin a určeny jejich průměrné hodnoty pro každé z vybraných kritérií tvárného lomu.

		V1	V2	V3	V4	V5	průměr	směrodatná odchylna	variační koeficient
1	Brozzo	0.63	0.60	0.57	0.65	0.62	0.61	0.03	0.05
2	Cockroft [MPa]	383	369	346	420	382	380	27	0.07
3	Oh	0.54	0.51	0.48	0.56	0.53	0.52	0.03	0.06

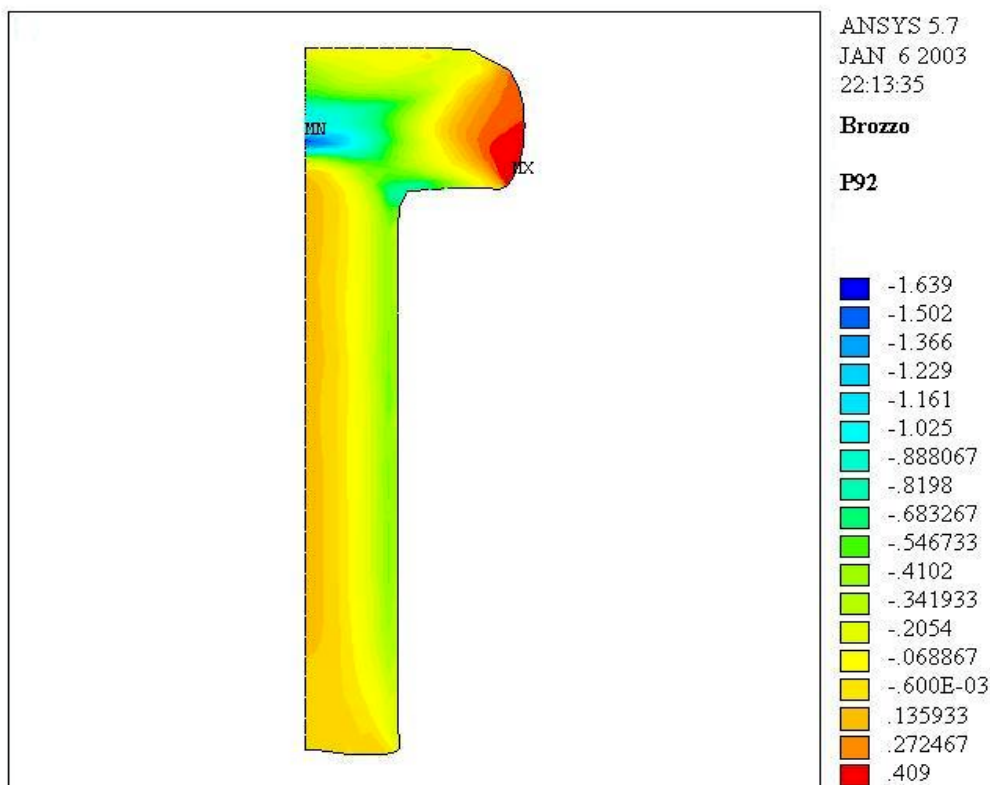
Tab. 6. Hodnoty kritériálních veličin vybraných kritérií pro materiál 23MnB4

V tab. 6 jsou uvedeny lomové hodnoty kritériálních veličin vybraných kritérií tvárného lomu pro materiál 23MnB4. Z provedených simulací a srovnání s experimenty vyplývá, že kritéria Brozzo, Cockcroft-Latham a Oh spolehlivě indikují místo vzniku tvárného lomu na vnějším obvodu ve středu petchovaných

vzorků. Zde nastává maximum jejich kritériálních veličin, což je v souladu s experimentem. Kritérium Freudenthal naopak při určení místa vzniku tvárného lomu selhává. Výsledky těchto kritérií při určení místa vzniku tvárného lomu pro materiál 23MnB4 jsou podle očekávání shodné s výsledky pro materiály 12010 a15260.

### 3.4.2 Výpočet rozložení kritériálních veličin ve šroubu

Numerické simulace šroubu M8 pro dva výchozí polotovary označené P92 ( $\varnothing 9,2$  mm, výška 30 mm) a P117 ( $\varnothing 11,7$  mm, výška 18 mm) z oceli 23MnB4 byly provedeny v práci [9]. Po konverzi výsledků byly pro vybraná kritéria spočteny průběhy rozložení kritériálních veličin na průřezu vyrobeného šroubu. Podle rozložení kritériálních veličin ve šroubu lze usoudit na místa, potenciálně nebezpečná z hlediska vzniku tvárného lomu. Příklad grafického znázornění průběhu kritériální veličiny C6 kritéria Brozzo ve šroubu je uvedeno na obr. 6.



Obr. 6. Kritérium Brozzo – rozložení kritériální veličiny C6 v průřezu šroubu M8, materiál 23MnB4, polotovar P92.

Z obr. 6 je patrné, že veličina C6 nabývá maximální hodnoty na obvodu hlavy šroubu. V tomto místě indikuje kritérium Brozzo možný vznik tvárného lomu. Maximální hodnoty kritériální veličiny C6 jsou pro polotovar P117 (s vyšším

průměrem) výrazně nižší, než pro polotovary P92. Je-li maximální hodnota kritériální veličiny v průřezu vyrobeného šroubu nižší než kritická lomová hodnota této veličiny, tvárný lom dle daného kritéria při tváření šroubu nenastane. Jak vidíme z tab. 7, jsou tyto hodnoty u kritéria Brozzo pro oba polotovary ve šroubu nižší, než kritická lomová hodnota. To znamená, že při kontrole kritériem Brozzo je technologie výroby šroubu z hlediska vzniku tvárného lomu pro oba výchozí polotovary bezpečná.

Výsledky kritérií Cockroft-Latham a Oh jsou analogické. Obě kritéria opět nabývají maxima na obvodu hlavy šroubů a pro obě jsou tyto maximální hodnoty nižší, než je kritická lomová hodnota. Zároveň jsou maximální hodnoty kritériálních veličin výrazně nižší pro polotovar P117 než pro polotovar P92. Kritérium Freudenthal predikuje pro polotovar P117 možný vznik tvárného lomu na vnějším obvodu v místě spojení hlavy a dřívku šroubu. Pro polotovar P92 nabývá kritérium maxima uprostřed hlavy šroubu.

Lomové hodnoty kritériálních veličin a maximální hodnoty ve šroubu pro kritéria Brozzo, Cockroft-Latham a Oh jsou uvedeny v tab. 7.

Materiál <b>23MnB4</b>		Hodnoty kritériální veličiny		
		Max. hodnota P92	Max. hodnota P117	Kritická lomová hodnota
1	Brozzo [ - ]	0.4	0.3	0.61
2	Cockroft-Latham [MPa]	254	197	380
3	Oh [ - ]	0.4	0.3	0.52

*Tab. 7. Hodnoty kritériálních veličin vybraných kritérií tvárného lomu pro materiál 23MnB4*

Z dosavadních praktických provozních poznatků vyplývá, že problémy se vznikem tvárného lomu při výrobě šroubů nastávají většinou na obvodu hlavy šrouby. Z toho plyne, že kriteria Brozzo, Cockroft-Latham a Oh indikují možné místo porušení při výrobě šroubů správně. Kritérium Freudenthal bylo naopak při predikci místa porušení neúspěšné.

## 4 ZÁVĚR

Základním cílem předkládané disertační práce bylo posoudit kvalitu vybraného souboru kritérií tvárného lomu jak z hlediska jejich úspěšnosti při identifikaci místa vzniku tvárného lomu v průběhu tvářecího procesu, tak z hlediska možnosti jejich obecného použití při stanovení limitů tvařitelnosti. Nejvyšší vybraná kritéria tvárného lomu měla být integrována do uceleného programového systému – postprocesoru MKP, který by umožňoval zpracování výsledků numerických simulací tvářecích procesů z různých MKP systémů.

Dosažené výsledky lze stručně shrnout takto:

- Byla navržena metodika verifikace a hodnocení kritérií tvárného lomu založená na srovnání experimentálních výsledků vybraných vhodných skupin pýchovacích zkoušek a výsledků numerických simulací těchto zkoušek.
- Z dostupných experimentálních prací byly vybrány vhodné skupiny pýchovacích zkoušek, které pokrývají co nejširší rozpětí třecích podmínek a geometrických parametrů.
- V prostředí programového systému konečných prvků ANSYS byl vytvořen numerický model pro simulaci pýchovacích zkoušek.
- Model numerické simulace byl verifikován porovnáním naměřených pýchovacích sil a vypočtených reakčních sil při simulaci.
- Byla provedena řada simulací pýchovacích zkoušek pro vybraný interval hodnot koeficientu tření  $f$  mezi kovadly a čelem. Na základě srovnání výsledků těchto simulací s experimenty byly stanoveny optimální hodnoty koeficientu tření  $f$  pro všechny tři režimy pýchování.
- Byly realizovány simulace všech experimentálně provedených pýchování pro oba zvolené pýchované materiály 12010 a 15260, pro třecí režimy s drážkovanými, hladkými a mazanými kovadly a pro definované geometrické charakteristiky vzorků.
- V prostředí ANSYSu byl sestaven a odladěn konverzní program, který vytváří z výsledků simulace soubor napětových a deformačních veličin s jednotným formátem, obsahující data potřebná pro výpočet podmínek tvárného lomu u jednotlivých hodnocených kritérií.
- V prostředí MathCADu byl vytvořen systém programů, který zpracuje data z výsledkového souboru simulace pýchování v ANSYSu a pro všechna vybraná kritéria predikce tvárného lomu vypočte hodnoty kritériálních veličin. Tento systém lze použít rutinně pro výpočty podmínek tvařitelnosti podle jednotlivých kritérií tvárného porušení.
- Byly zpracovány všechny provedené simulace pýchování a pro každou simulaci spočteny lomové hodnoty kritériálních veličin všech hodnocených kritérií tvárného lomu.

- Byla hodnocena skupina 9 vybraných kritérií tvárného lomu – kritérium maximálního tahového napětí, maximálního přetvoření, Freudenthal, Cockroft-Latham, hydrostatického napětí, Brozzo, Oh, Ghosh a Oyane.
- Byla posouzena úspěšnost jednotlivých kritérií při určení místa vzniku tvárného lomu a určeny průměrné lomové hodnoty kritériálních veličin.
- Z vybraných úspěšných kritérií byl sestaven MKP postprocesor, který je na základě konverze dat schopen rutinně zpracovávat MKP simulace tvářecích procesů. Lze ho využít k vyhodnocení experimentálních zkoušek tvařitelnosti, určení lomových hodnot kritériálních veličin, charakterizujících proces tvárného lomu pro daný materiál, a k určení limitů tvařitelnosti v přípravné etapě návrhu technologie tvářecích procesů.

Vybraná skupina kritérií tvárného lomu byla hodnocena z hlediska úspěšnosti při predikci místa vzniku porušení a z pohledu možnosti jejich obecné aplikace ke stanovení limitů tvařitelnosti. Z analýzy všech výsledků vyplývají pro hodnocená kritérií následující závěry:

- Kritéria maximálního přetvoření, Freudenthal a hydrostatického napětí byla neúspěšná při predikci místa vzniku tvárného lomu.
- Kritérium Ghosh bylo sice úspěšné při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky z obou zkoumaných materiálů, ale pro vysoký rozptyl hodnot kritériální veličiny C8 je nelze obecně použít pro stanovení limitů tvařitelnosti.
- Kritérium maximálního tahového napětí bylo úspěšné při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky z obou zkoumaných materiálů. Závislost lomových hodnot kritériální veličiny C1 na podmínkách experimentu však také vylučuje obecné použití tohoto kritéria při stanovení limitů tvařitelnosti.
- Kritéria Cockroft-Latham, Brozzo, Oh a Oyane byla úspěšná při predikci místa vzniku tvárného lomu pro všechny pěchované vzorky z obou zkoumaných materiálů. Příslušné kritériální veličiny charakterizují rozvoj poškození a vznik tvárného lomu pro oba studované materiály. Tato kritéria byla zařazena do postprocesoru MKP. Kritéria Cockroft-Latham, Brozzo a Oh byla aplikována na proces výroby šroubu tvářením za studena. Všechna kritéria identifikovala místo možného vzniku tvárného lomu na obvodu hlavy šroubu, což se shoduje s dostupnými provozními poznatky.

Vzhledem k tomu, že se podařilo vytvořit metodiku hodnocení kritérií tvárného lomu, analyzovat vlastnosti jednotlivých kritérií tvárného lomu a začlenit vybraná kritéria do postprocesoru simulačních výpočtů, můžeme považovat hlavní cíle disertační práce za splněné.

Lze zároveň konstatovat, že výsledky předložené práce mohou posloužit jako východisko pro další výzkum problematiky predikce vzniku tvárného porušení a určování limitů tvařitelnosti. Kritéria, hodnocená podle dosažených výsledků jako



úspěšná, je vhodné podrobit dalšímu zkoumání, zejména v podmínkách změněné metodiky prováděných experimentů. Za prvé by se jednalo o zpřesnění detekce vzniku tvárného porušení. Dalším krokem by byla realizace odlišného typu experimentu, který by ve srovnání s petchovací zkouškou zaručil výrazně odlišnou historii napěťových a deformačních veličin při rozvoji porušení. Tímto způsobem by bylo možno ověřit a zpřesnit výsledky, dosažené v rámci této práce. V neposlední řadě se jeví jako účelné použít navrženou metodiku hodnocení kritérií a zpracované programové vybavení pro ověření spolehlivosti dalších kritérií tvárného lomu. Případná úspěšná kritéria by mohla být zařazena do vytvořeného MKP postprocesoru, čímž by se zvýšila jeho účinnost a rozšířily možnosti použití.

## 5 VÝBĚR Z POUŽITÉ LITERATURY

- [ 1] Atkins A. G., Mai Y. W.: Elastic and plastic fracture. Ellis Horwood, Chichester, 1988.
- [ 2] Brozzo P., DeLuca B., Rendina R.: A new method for the prediction of formability limits in metal sheets. Proceedings of the 7th Biennial Conference of the International Deep Drawing Research Group 1972.
- [ 3] Clift S. E., Hartley P., Sturgess C. E. N., Rowe G. W.: Fracture prediction in plastic deformation processes. Int. J. Mech. Sci. 1990.
- [ 4] Cockroft M. G., Latham D. J.: Ductility and the Workability of metals. J. Inst. Met. 1968.
- [ 5] Freudenthal A. M.: The Inelastic Behavior of Solids. Wiley 1950.
- [ 6] Ghosh A. K.: A criterion for ductile fracture in sheets under biaxial loading. Metall. Trans. 1976.
- [ 7] Hartley P., Pillinger I., Sturgess C.: Numerical Modeling of Material Deformation Processes, kap. 16: Fracture in Forming Processes ( S. E. Clift). Springer-Verlag 1992.
- [ 8] Janíček L., Maroš B.: Experimentální posouzení vlivu úpravy geometrie vzorků na přetvárný odpor. Sborník konference TECHNOLÓGIA92, Slovensko.
- [ 9] Janíček L., Petruška J., Maroš B., Rusz S.: Cold forming of bolts without thermal treatment, J.Mat.Proc.Technol. 125-126 (2002), 341-346
- [10] Janíček L., Petruška J.: Porovnání experimentálního přístupu a simulace MKP pēchovacího procesu. Sborník konference FORM'97 Brno.
- [11] Konečný R.: Analýza meze tvařitelnosti polotovarů z vybrané oceli. Diplomová práce, FS VUT Brno 1998.
- [12] Norris D. M., Reaugh J. E., Moran B., Quinones D. F.: A plastic strain mean-stress criterion for ductile fracture. J. Eng. Mat. Tech 1978.
- [13] Osakada K., Mori K.: Prediction of Ductile Fracture in Cold Forging. Ann. CIRP 1978.
- [14] Oyane M., Sato T., Okimoto K., Shima S.: Criteria for ductile fracture and their applications. Journal of Mechanical Working Technology, 4 (1980).
- [15] Petruška J., Janíček L.: Computationally-experimental workability determination of compressed cylindrical specimen with surface defect. Journal of Materials Processing Technology 80-81 (1998).
- [15] Rice J. R., Tracey D. M.: On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. J. Mech. Phys. Solids 17 (1969)
- [16] Wifí A. S.: On the finite element analysis of workability limits in metal forming processes. Advances in Materials Processing and Technologies, Kuala-Lumpur 1998.

## 6 SEZNAM AUTOROVÝCH PRACÍ ZAMĚŘENÝCH NA DISKUTOVANOU PROBLEMATIKU

- [1] Šuta J.: „Predikce porušování kovů při tváření“. Teze doktorandského studia, UMT FS VUT Brno, 2001.
- [2] Šuta J., Petruška J., Janíček L.: „Predikce porušování kovů při tváření“. Sborník konference Aplikovaná mechanika 2002, Ostrava 2002.
- [3] Šuta J., Petruška J., Janíček L.: „Posouzení vhodnosti kritérií tvárného lomu při výpočtové analýze tvářecích procesů“. Sborník národní konference Inženýrská mechanika 2002, Svratka 2002.
- [4] Šuta J., Petruška J., Janíček L.: „Reliability of selected ductile fracture criteria“. Přijato k publikaci ve sborníku národní konference Inženýrská mechanika 2003, Svratka 2003.
- [5] Šuta J., Petruška J., Janíček L.: „Problems of calibration and application of fracture criteria in forming“. Přijato k publikaci ve sborníku mezinárodní konference Advances in Materials and Processing Technology, AMPT2003, Dublin, 2003.

## 7 ŽIVOTOPIS

Narodil jsem se 19. června 1962 v Přerově. Základní školu jsem absolvoval v ZDŠ Pavlovice u Přerova v letech 1968–1977. Poté jsem nastoupil na gymnázium Jakuba Škody v Přerově, kde jsem maturoval v roce 1981. Ve studiu jsem pokračoval na strojní fakultě Vysokého učení technického v Brně. Studium oboru Automatické systémy řízení ve strojírenství jsem ukončil státní zkouškou v roce 1985.

V srpnu 1985 jsem nastoupil do Přerovských strojíren v Přerově a začal pracovat jako systémový analytik podnikového výpočetního střediska.

Od roku 1990 pracuji v Přerovských strojírnách v oddělení statických a dynamických výpočtů. Zde se provádí statické, dynamické a tepelné analýzy konstrukcí a strojů z oblasti drtící a mlecí techniky a výroby cementu.

V roce 1997 jsem začal externí formou studovat obor Inženýrská mechanika na Fakultě strojní VUT Brno v postgraduálním doktorandském studiu. Mým školícím pracovištěm je Ústav mechaniky těles FSI VUT Brno. Téma mé disertační práce zní: „Porušování kovů při tváření“. Práce je orientována do oblasti objemového tváření. Studium je zaměřeno na problematiku predikce porušování kovů v průběhu tvářecích procesů. Cílem práce je zhodnotit kvalitu skupiny vybraných kritérií tvárného lomu a z úspěšných kritérií vytvořit programový nástroj pro určování limitů tvařitelnosti v reálných technologických procesech.

## 8 SUMMARY

Exhaustion of formability and ductile fracture is a serious limiting factor of industrial forming processes and reliable prediction of fracture in the design stage of the process is highly desirable. Together with recent development of FE simulation of metal forming, many fracture criteria were proposed and used to solve this problem.

There is briefly described the method of fracture criteria verification and their characteristic quantities identification in this thesis. Attention is concentrated to a group of relatively simple, industrially applicable criteria, starting from the criterion of plastic work intensity up to the two-parametric Oyane criterion. Reliability of the criteria for a number of different steels was evaluated, using compression tests of specimens under different geometrical and frictional conditions (using grooved, smooth or smooth and lubricated tool-specimen interface with various height to diameter specimen ratio). Fracture prediction of individual criteria was then compared with the test results.

Based on the analysis of results, following important conclusions could be done:

2. Maximal strain, Freudenthal and mean stress criteria were not successful in prediction of ductile fracture localisation.
3. Maximum tensile stress and Ghosh criteria were successful in prediction of ductile fracture localisation, but they were not reliable for quantitative determination of workability limits.
4. Cockroft-Latham, Brozzo, Oh a Oyane criteria were successful in both ductile fracture localisation and quantitative evaluation of workability limits.

Successful criteria were then incorporated into the FE postprocessor and applied to the simulation of bolts production, consisting of two sequential processes – forward extrusion of shaft and compression of head. This FE postprocessor can be used generally for ductile fracture prediction in FE simulation of forming processes.