

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta strojího inženýrství  
Ústav Strojírenské technologie



**Ing. Miroslav Jopek**

**Modelování mechanického chování  
ocelí za vyšších rychlostí  
deformace**

**Modelling Mechanical Properties  
of Steels at High Strain Rates**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Technologie tváření kovů a plastů

Školitel: Prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Radko Samek, CSc.  
Prof. Ing. Bohumír Strnadel, DrSc.  
Prof. Ing. Jaroslav Buchar DrSc.

Datum obhajoby: 20. 6. 2003

**KLÍČOVÁ SLOVA**

vysoké rychlosti deformace, modelování mechanického chování, materiálové modely, nízkouhlíková ocel TRISTAL, uhlíková ocel ČSN 41 2050.

**KEY WORDS**

high strain rate, modelling mechanical properties, material models, TRISTAL low carbon steel, ČSN 41 2050 carbon steel.

**ULOŽENÍ PRÁCE**

Práce je uložena na Oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství na Vysokém učení technickém v Brně.

# OBSAH

<b>1 ÚVOD</b>	<b>5</b>
<b>2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>6</b>
<b>3 SOUČASNÉ POZNATKY Z TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ ZA VYŠŠÍCH RYCHLOSTÍ DEFORMACE</b>	<b>7</b>
3.1 Konstitutivní rovnice popisující závislost napětí na deformaci, rychlosti deformace a teplotě	8
<b>4 ZKOUŠENÍ VYBRANÝCH OCELÍ POMOCÍ TAYLOROVA TESTU</b>	<b>10</b>
4.1 Vyhodnocení experimentu Taylorova testu	11
<b>5 VÝZKUM A VÝVOJ KOMPONENT</b>	<b>12</b>
<b>6 MODELOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ TAYLOROVA TESTU</b>	<b>13</b>
6.1 Výsledky simulací vysokorychlostního děje	16
<b>7 VYHODNOCENÍ STRUKTURY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ</b>	<b>17</b>
7.1 Vyhodnocení tvrdosti zkušebních vzorků	17
<b>8 MATERIÁLOVÉ MODEL Y VYBRANÝCH TYPŮ OCELÍ</b>	<b>19</b>
8.1 Ocel 12050.3	19
8.2 Ocel TRISTAL	20
<b>9 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ MATERIÁLOVÉHO MODELU U VYBRANÉ SOUČÁSTI VYRÁBĚNÉ ZA STUDENA NA POSTUPOVÉM AUTOMATU TPZD 25</b>	<b>21</b>
<b>10 SHRNU TÍ A ZÁVĚRY</b>	<b>24</b>
<b>11 SUMMARY</b>	<b>27</b>
<b>12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>28</b>
<b>13 SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKACÍ</b>	<b>29</b>
<b>14 CURRICULUM VITAE</b>	<b>32</b>



# 1 ÚVOD

Současný trend rozvoje techniky je charakterizován snahou o zvyšování měrných výkonů strojů, nástrojů, zařízení, v projektování nových konstrukčních celků zejména v leteckém, automobilovém, chemickém a energetickém průmyslu. Probíhají zároveň inovační procesy s cílem zvýšit efektivitu výroby s využíváním netradičních materiálů. Velký přínos v tomto smyslu poskytují tzv. přesné technologie umožňující výrobu dílců „na hotovo“ mezi které bezesporu náleží technologie tváření. Dochází k vzrůstající potřebě hlubšího poznání změn probíhajících v materiálech, jak již účinkem různého typu namáhání, tak současným působením strukturních, konstrukčních, technologických a ostatních provozních faktorů.

V oblasti objemového tváření za studena je materiálový výzkum zaměřen na studium extrémních účinků zatěžování nástrojů i polotovarů a na jejich způsob výroby. V hromadné výrobě jsou velmi atraktivní postupové automaty, které jsou schopny vyrábět součásti s produkcí 300-600 ks/min při rychlostech deformace dosahujících až  $\dot{\varphi} = 10^3 \text{ s}^{-1}$ . Jsou označovány jako vysokorychlostní s rázovým zatěžováním. Rázové účinky jsou charakteristické krátkou dobou zatěžování a styku nástroje s polotovarem a tedy vysokými hodnotami rychlosti deformace při extrémní úrovni zatěžující síly. Hodnota zatěžující síly a rychlosti deformace neumožňují souhrnný popis rázových účinků, neboť nezahrnují jednu z nejvýznamnějších charakteristik tohoto typu namáhání, to je účinek napětového pulsu, a vliv setrvačných sil pro daný typ materiálu. Napětový puls se předává z nástroje na polotovar a šíří se rychlostí zvuku, závislou na vlastnostech materiálu. Změna vlastností materiálu během šíření pulsu spolu s interakcí s povrchem tělesa vede k jeho úplnému nebo částečnému odrazu, popř. částečné absorpci do namáhaného nástroje. Tato absorpce může vyvolat v nástroji jen elastickou deformaci. Odražený tahový puls nesmí interagovat s inicializovaným tlakovým pulsem tak, aby způsobil vnitřní poruchu v zpracovávaném polotovaru.

Ve strojírenské praxi při výrobě součástí složitějších tvarů tváření za studena často dochází následkem vyčerpání zásoby plasticity k porušení dílců ještě v průběhu výrobního procesu. Tento problém lze řešit zpracováním nových technologických postupů, což znamená zvýšení nákladů, protože změnou technologického postupu jde ruku v ruce výroba nových nástrojů z velmi drahých nástrojových materiálů, především ocelí. K řešení těchto problémů přispívá rovněž výzkum lokálního rozložení plastické deformace a simulace daného tvářecího procesu s vhodným software. Modelový objekt je vytvořen tak, aby bylo formulováno vzájemně jednoznačné zobrazení mezi podstatnými procesy na skutečném a modelovém objektu, které zachovává časovou a vzájemnou následnost průběhu procesů. Opakované experimenty, zaměřené na sledování reálně probíhajících procesů na modelovém objektu pro vybrané soubory podmínek, jsou prostředkem pro analýzu potenciálně možného chování skutečného objektu a pro řešení problémů vzhledem k tomuto chování. Modelovým objektem je počítač, technicky a programově vybavený pro počítačovou reprezentaci a sledování procesů zobrazených z primárního objektu. Díky simulaci pak můžeme rozhodnout, zda lze vůbec danou součást vyrobit, a pokud ano, jaký nejvhodnější technologický postup z hlediska ekonomičnosti výroby nutno použít.

Správný výstup simulačního programu je však podmíněn nalezením a zadáním reálného materiálového modelu. Důsledkem nepřesnosti zadání je praktická nepoužitelnost výstupných údajů. Podmínkou vložení správného materiálového modelu je ovšem uskutečnění experimentu při reálných podmínkách zatěžování.

Je pravdou, že výzkum reálných podmínek rázového zatěžování poskytl v současné době matematický popis teorie vln a konstitutivní rovnice, popisující křivky přetvárných odporů. Díky výpočetní technice jsou již známé a běžně používané. Jednotlivé konstanty v konstitutivních rovnicích však nejsou dosud souhrnně popsány. Chybí též popis změn vlastností tvaru materiálu při šíření napětových vln (doba trvání, maximální velikost přenášeného napětí, atd.).

Cílem současného výzkumu je proto stanovení spolehlivých konstitutivních rovnic, které popisují komplexní materiálový model především pro běžně používané konstrukční oceli v šroubárenském, automobilovém a leteckém průmyslu.

Dalším podnětem, který vedl k současnému výzkumu rázových účinků, je nutnost poznání významu materiálových charakteristik, získaných při vyšších nebo vysokých rychlostech deformace, pro interpretaci fyzikálně metalurgických jevů. Nezbytná je ovšem komparace výsledků popsaného materiálového modelu s experimentálními výsledky ve strojírenské praxi a zároveň komparace popsaného modelu s modelem shodného materiálu (týká se strukturních, chemických, tepelných a dalších vlastností), který byl získán na jiných experimentálních zařízeních (hydraulickém lisu, plastometru).

Ke správnému posouzení a popisu materiálového modelu vede ovšem dlouhá cesta, přes znalosti z oblasti fyziky, materiálového inženýrství, teorie a technologie tváření, elektroniky, výpočetní techniky a simulačních softwarů, jakož i zvládnutí (osvojení) dílčích experimentálních technik (metalografie, atd.).

Jako výzkumná základna pro experimentální určování mechanických charakteristik materiálů slouží laboratoř vysokých rychlostí deformace na Ústavu strojírenské technologie, odboru tváření kovů a plastů FSI VUT v Brně.

## 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce bylo vytvořit reprezentativní materiálový model, popsaný spolehlivým konstitutivním vztahem, který zahrnuje fyzikální členy modelu materiálu jako spojitého kontinua určitého typu. To vše provést cestou aplikovaného výzkumu chování a modelování materiálů za vyšších rychlostí deformace prostřednictvím stávajících standardních metod na vybraných tvářitelných materiálech, běžně používaných v automobilovém a šroubářenském průmyslu.

Dalším cílem bylo vytvoření metodického celku, který zahrnuje materiálové modely pro simulaci a technologické aplikace, které jsou jasně popsané strukturou a tepelným zpracováním.

*Pro dosažení vytýčených cílů bylo potřeba:*

### **1 Zaměřit experimentální část zkoušek na dynamické namáhání vybraných uhlíkových ocelí TRISTAL a 12050 pomocí Taylorova testu; s tím souvisí:**

- Výzkum a vývoj komponent pro Taylorův test.
- Posun ve vývoji transportního zařízení (nosiče) zkušební vzorku.
- Vývoj zařízení pro měření dopadové rychlosti vzorku.
- Vývoj experimentální metody pro detekci průběhů napěťových vln na dopadišti.
- Vývoj metody měření rázové síly zkušební vzorku na dopadiště.
- Posouzení vlivu navržených komponent na celkový výsledek experimentu.

### **2 Vyhodnotit experimentální část Taylorova testu se zaměřením na využití:**

- Obrazové analýzy pomocí CCD kamery a softwaru LUCIE sejmutí a vyhodnocení tvaru deformovaného zkušební vzorku.
- Měření mikrotvrlosti na osovém řezu vzorků a jejich grafické zpracování programem SURFER.
- Metalografické výbrusy osových řezů, leptání a snímání na světelném mikroskopu NEOPHOT 32 v místě deformace čel zkušebních vzorků.
- Vyhodnocení závislosti mikrotvrlosti na dopadové rychlosti vzorku.

### **3 Vyhodnotit experimenty s návrhem reprezentativního materiálového modelu, tj. křivek přetvárných odporů a měrné přetvárné práce na vybraných ocelích, popsaného spolehlivým konstitutivním vztahem.**

- Základní rozbor konstitutivního vztahu s vyhodnocením závislosti jednotlivých koeficientů pro souhrnný popis vybraných materiálů.
- Vliv šíření napěťových vln a časových změn zahrnutím do simulačního softwaru.

- Vyhodnocení výsledků dynamických charakteristik materiálů (dyn. meze kluzu).
- Modelování experimentu v simulačním softwaru LS DYNA 3D s uvažováním předcházejících znalostí šíření napěťových vln a struktur materiálů.
- Porovnání výsledků experimentů s výsledkem simulace.

**4 Ověřit nově navržený materiálový model simulací vybrané součásti v simulačním softwaru FORMFEM a v silově-energetické oblasti porovnat výsledky simulace s prakticky naměřenými hodnotami na konkrétní vyráběné součásti pro automobilový průmysl.**

- Navrhnout vhodný způsob měření tvářecí síly na vybraném strojním dílci.
- Porovnat výsledky experimentu v silově-energetické oblasti se simulací.
- Konfrontovat průběh plastického toku materiálu s důležitými parametry počítačové simulace.

### 3 SOUČASNÉ POZNATKY Z TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ ZA VYŠŠÍCH RYCHLOSTÍ DEFORMACE

Převážná většina tvářecích procesů má dynamický charakter a jen malá část technologií probíhá za kvazistatických podmínek. Velká část technologických procesů tváření tedy souvisí ze zcela reálnými rychlostmi pohybu nástroje, tj. za konkrétních rychlostí deformace. Rychlost deformace definovaná z fyzikální podstaty jako derivace logaritmického přetvoření podle času, je jedna z veličin, která má rozhodující vliv na zařazení technologie, mezi kvazistatickými nebo dynamickými procesy. Nejjednodušším příkladem aplikací dynamických procesů v průmyslové praxi jsou technologie objemového tváření za studena, konkrétně pýchování, dopředné a zpětné protlačování nebo kombinace všech třech zmíněných technologií.

**a) Pýchování [1, 2, 3, 4, 5, 6]**

Pýchování je základní technologie objemového tváření za studena. V tomto odstavci budou zmíněny jen základní vztahy pro výpočet rychlosti deformace. Je všeobecně známo, že při pýchování kruhového- rotačně symetrického vzorku je deformace v tečném a radiálním směru totožná. Potom na základě jednoduchého odvození můžeme stanovit rychlost deformace v radiálním a tečném směru:

$$\dot{\varphi}_r = \dot{\varphi}_t = \frac{v_0}{2h} [s^{-1}], \quad (1,3)$$

kde  $v_0$  je okamžitá rychlost pohybu nástroje,  $h$  je okamžitá výška pýchovaného vzorku.

**b) Dopředné protlačování [1, 2, 3, 4, 5, 6]**

Při analýze výpočtu rychlosti deformace budou zmíněny vztahy jen pro redukční část, neboť v této části se nachází ohnisko deformace. Jednoduchým odvozením, které je podrobněji řešeno v literatuře [7], můžeme rychlost deformace v radiálním a tečném směru vypočítat:

$$\dot{\varphi}_r = \dot{\varphi}_t = -v_0 \frac{R_0^2}{R^3} \operatorname{tg} \alpha [s^{-1}], \quad (2,3)$$

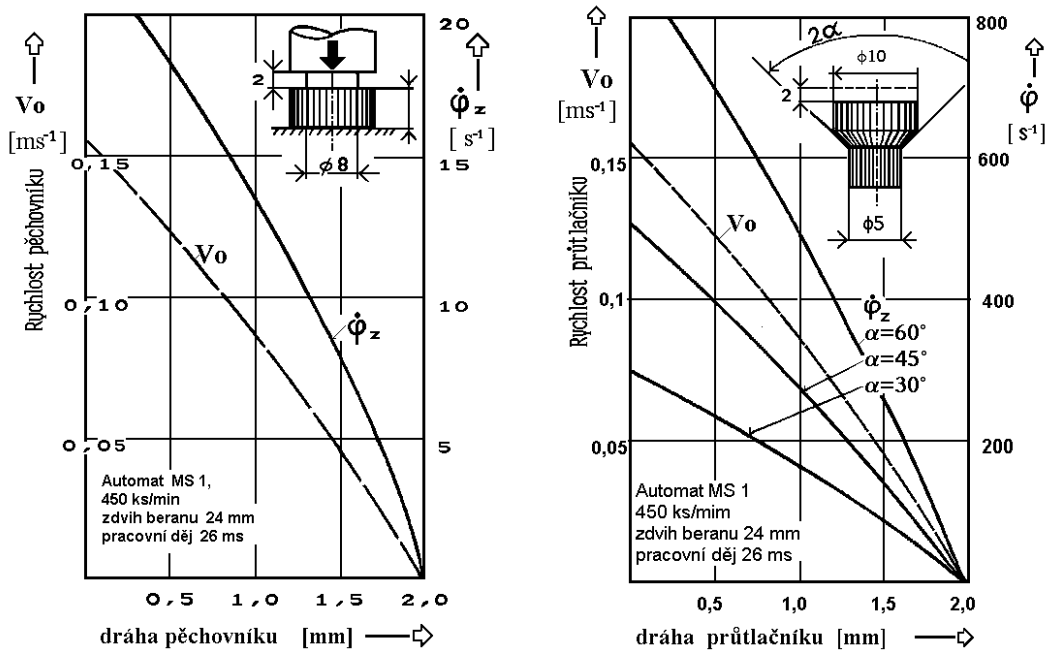
a s uvažováním nestlačitelnosti objemu obdržíme výraz pro okamžitou osovou rychlost deformace v obecném místě kuželové průtláčnice:

$$\dot{\varphi}_z = -\dot{\varphi}_r - \dot{\varphi}_t = 2v_0 \frac{R_0^2}{R^3} \operatorname{tg} \alpha [s^{-1}], \quad (3,3)$$

kde  $v_0$  je okamžitá rychlost nástroje,  $R_0$ ,  $R$  jsou výchozí a okamžité poloměry,  $\alpha$  je redukční úhel.

**c) Experimentálně zjištěné výsledky [1, 2, 3, 4, 5, 6]**

Důvodem uvedení bodů *a), b)* je praktická aplikace vztahů rychlosti deformace na běžně používané tvářecí technologie. U běžně používaných klikových a výstředниковých lisů se doba styku nástroje s tvářeným materiálem pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,5 s. Při rychlosti beranu 0,3 až 0,6 m/s se uvádí rychlost deformace v rozmezí 4 až 25 s<sup>-1</sup>. Současné víceoperační postupové automaty pro objemové tváření drobných strojních a spojovacích dílců, které jsou používány např. v šroubárenském průmyslu, dosahují výrobnosti až 600 ks/min. Doba styku nástroje s polotovarem je v rozmezí 20 až 50 ms. Dosahované rychlosti deformace u protlačovacích nebo pýchovacích operací se pohybují v rozmezí 10<sup>2</sup> až 10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Tato skutečnost je patrná z obr.1.



Obr.1 Rychlostní podmínky pro pýchování a dopředné protlačování [7]

Zkoušky byly prováděny pro konkrétní tvářecí operace na postupovém automatu MS1 [7].

### 3.1 Konstitutivní rovnice popisující závislost napětí na deformaci, rychlosti deformace a teplotě

Stanovení obecně platného matematického modelu deformačního chování tvářené oceli je velmi obtížné a nákladné, zvláště jedná-li se o popis při reálných rychlostech deformací. V současnosti jsou známy konstitutivní modely, zahrnující základní fyzikální parametry, viz. Tab.1, pomocí níž je možno stanovit přirozený přetvárný odpor v závislosti na deformaci, rychlosti deformace, teplotě, popř. porušení vlivem vysoké rázové síly.

Rovnice	Materiálový model – název konstitutivního vztahu	Závislost na:				
		deformaci	rychlost deformace	porušení	teplotě	
1	Plastický materiál	ano	ano	ne	ne	
2	Rovnice na základě mikro- strukturních h procesů	Steinberg	ano	ano	ne	ano
4		Preston- Tonks- Wallace	ano	ano	ne	ano
5		MTS	ano	ano	ne	ano



6	Semi-empirické rovnice	Klopp, Clifton, Shawki	ano	ano	ne	ano
8		Vinh et al.	ano	ano	ne	ano
9		Zerilli-Armstrong	ano	ano	ne	ano
10		Johnson- Cook	ano	ano	ano	ano

Tab.1 Přehled nejčastěji používaných materiálových modelů [8]

### a. Konstitutivní vztah dle Johnsona a Cooka

Jedním z nejčastěji používaných modelů pro BCC materiály (např. oceli) je konstitutivní vztah dle Johnsona a Cooka [8,9,10]. Deformační odpor v tomto vztahu je funkcí deformace, rychlosti deformace a teploty.

$$\sigma = (\sigma_0 + B\varphi^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (1,3.1.)$$

kde  $T^*$  je homologická teplota v rozmezí  $0 < T^* < 1$  definovaná vztahem

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$$

- $\sigma_0$  statická mez kluzu
- B koeficient zpevnění (work hardening coefficient)
- n exponent zpevnění (work hardening exponent)
- C koeficient citlivosti na rychlost deformace (strain rate sensitivity)
- m teplotní koeficient odpevnění (thermal softening coefficient)
- $T_0$  teplota okolí (referenční teplota) při statické mezi kluzu  $\sigma = \sigma_0$ ,
- $T_m$  teplota tavení
- $\dot{\varphi}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$  referenční rychlost přetvoření

Nestabilní deformace – vznik porušení byla počítaná dle vztahu (2,3.1.).

$$\varphi_i = \frac{n\rho C_p}{b\beta(\sigma_0 + B)} - \frac{\sigma_0}{B} \varphi_i^{1-n} \quad (2,3.1.)$$

$C_p$  specifické teplo,  $\rho$  hustota materiálu  
 $b, \beta, n, B$  experimentálně stanovené parametry  
Ze vztahu (1,3.1.) je patrná závislost přirozeného přetvárného odporu na deformaci (prvá část rovnice), na rychlosti deformace (střední část rovnice) a na teplotě (poslední část rovnice). Z tohoto důvodu byl v disertační práci použit tento vztah.

### b. Konstitutivní vztah dle Zerilli a Armstronga

U materiálů namáhaných vyššími rychlostmi deformace se v některých případech projevuje změna mikrostruktury. Poruchy, trhliny, fázové změny, a jejich vzájemné působení mají vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Jedním z empirických konstitutivních vztahů, popisujících chování materiálu, propagují Zerilli a Armstrong [11], a to pro tepelně aktivované pohyby dislokací na bázi mikrostruktur. Pro typické kovy BCC (body centered cubic) a FCC (face centered cubic) analyzují teplotu a rychlost deformace. BCC kovy (oceli) mají větší citlivost na teplotu a rychlost deformace

než FCC kovy [8,12,13,14]. Zjistil, že aktivační plocha  $S$  je závislá na deformaci pro FCC kovy a nezávislá na deformaci pro BCC kovy (oceli).

Pro vyjádření konstitutivního vztahu podle Zerilli a Armstronga je nutné vypočítat aktivační plochu dislokací  $S$ , která závisí na hustotě dislokací  $\lambda$  a šířce bariéry  $l^*$  a velikosti Burgersova vektoru  $b$ . Potom tepelná část napětí se vyjádří ze vztahu (3,3.1.) [8].

$$\sigma^* = \frac{M\Delta G_0}{Sb} e^{-\beta T} \quad (3,3.1.)$$

kde  $M$  je Schmidův faktor,  $\Delta G_0$  je velikost volné energie bariér při  $0^\circ\text{K}$ ,  $S$  je aktivační plocha dislokací při  $0^\circ\text{K}$ ,  $b$  je velikost Burgersova vektoru a  $\beta$  je parametr závislý na deformaci a rychlosti deformace  $\beta = -C_3 + C_4 \ln \dot{\phi}$ .

Pro BCC kovy je  $S = \text{konst.}$  Pro FCC kovy  $= \text{konst} \dot{\phi}^{1/2}$ .

Výpočet deformačního napětí je patrný z rovnice (4,3.1.) [8]

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma^* + kd^{-1/2} \quad (4,3.1.)$$

kde  $\sigma_0$  je statická mez kluzu získaná z kvazistatického kompresního testu,  $d$  je průměrná velikost průměru zrna.

Dosazením do tohoto vztahu se získá konečný popis konstitutivní rovnice dle Zerilli a Armstronga (5,3.1.) a (6,3.1.) [8]:

$$\text{Pro FCC kovy: } \sigma = \sigma_0 + C_2 \dot{\phi}^{\frac{1}{2}} \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\phi}) + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (5,3.1.)$$

$$\text{Pro BCC kovy: } \sigma = \sigma_0 + C_1 \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\phi}) + C_5 \dot{\phi}^n + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (6,3.1.)$$

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  jsou materiálové konstanty

Konstanty  $C_3$  [ $^\circ\text{K}^{-1}$ ] a  $C_4$  [ $^\circ\text{K}^{-1}$ ] se vážou k tepelné aktivaci a efektu na rychlost deformace. Rovněž zahrnují velmi komplexní fenomény jako např. interakci mezi dislokacemi a precipitáty, uchycenými dislokacemi, atd.

Konstanta  $C_2$  [MPa] u FCC kovů především souvisí z průměrnou velikostí zrna v materiálu. Při zatěžování materiálu o průměrné velikosti zrna odpovídá určité napětí. Je všeobecně známo, že mez kluzu roste, když velikost zrna klesá. Tuto závislost popisuje Hall-Petchův vztah.

Konstanta  $C_1$  [MPa] reprezentuje poměr mezi tepelným a rychlostně deformačním efektem,  $n$  je exponent zpevnění,  $C_5$  [MPa] je preexponenciální faktor,  $d$  je průměrná velikost průměru zrna,  $T$  je okamžitá teplota ( $^\circ\text{K}$ ).

Zerilli a Armstrong se rovněž ve vztahu (5,3.1.) a (6,3.1.) zaměřili na efekt vzniku dvojčat za vysokých rychlostí deformace a vysokých deformací s konfrontací s Hall-Petchovým vztahem. Potom vztah  $kd^{-1/2}$  má podobu:

$$\Delta(kd)^{-\frac{1}{2}} = kd^{-\frac{1}{2}} \left[ (N+1)^{\frac{1}{2}} - 1 \right], \quad (7,3.1)$$

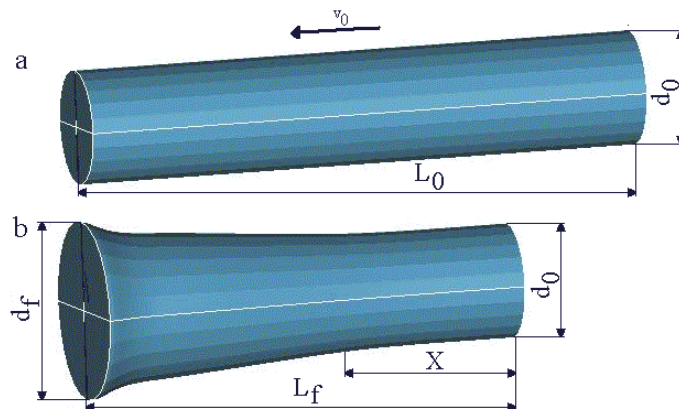
kde  $N$  je průměrný počet dvojčat v zrně.

## 4 ZKOUŠENÍ VYBRANÝCH OCELÍ POMOCÍ TAYLOROVA TESTU

Určení chování vybraných materiálů za vyšších rychlostí deformace se vedle tváření kovů a slitin stává čím dál důležitější v mnoha oblastech strojírenství. Přístupnost experimentálních metod, které umožňují sledování chování materiálů při deformačních rychlostech kolem  $10^3 \text{ s}^{-1}$  a velikostí

plastické deformace až do 150 %, je velmi omezená, ne-li přímo nemožná. Pro zjišťování mechanických vlastností a dynamických charakteristik materiálu se především využívá Taylorova testu-TAT, který se svou koncepcí dobře přibližuje reálnému zatížení a to jak možnou volbou rozměrů vzorku, která je u jiných metod značně omezena, tak i relativně jednoduchou geometrií. Dalším faktem je to, že zařízení pro TAT je instalováno na Ústavu strojírenské technologie, odboru tváření.

U klasického TAT se válcový zkušební vzorek o hustotě  $\rho$ , počáteční délce  $L_0$  a počátečním průměru  $\phi$   $d_0$  nastřeluje počáteční rychlostí  $v_0$  na pevnou desku, o které se předpokládá, že se v průběhu testu nedeformuje (obr.2a). Jako dopadová deska může sloužit i tyč nebo dynamometr, na kterých jsou měřeny deformace vzniklé nárazem zkušebního vzorku. Po dopadu zkušebního vzorku na tyč dojde k okamžitému nárůstu tlaku na jeho povrchu. Tím se vytvoří elastická a plastická tlaková vlna, která se šíří vzorkem. Elastická vlna se pohybuje rychlostí šíření zvuku v materiálu, odrazí se od volného konce zkušebního vzorku a vrací se zpět jako vlna tahová. V jistém místě dojde k interakci obou vln. Elastická vlna se může odrazit od povrchu nebo rozhraní vícenásobně. Předpokládaný výsledný tvar vzorku je na obr. 2b.  $L_f$  je konečná délka vzorku a  $X$  je délka nedeformované jeho části.



Obr. 2 Klasický TAT

#### 4.1 Vyhodnocení experimentu Taylorova testu

Jako vstupní hodnoty pro vyhodnocení experimentu u TAT slouží:

- deformovaný zkušební vzorek (geometrie, mikrostruktura, atd.)
- dopadová rychlost vzorku
- velikost a průběh napěťového pulsu vyvinutý vzorkem na dopadišti
- povrchová teplota vzorku při dopadu

Zkušební vzorek po TAT má typický trychtýřovitý tvar. Změna geometrických parametrů po testu především závisí na dopadové rychlosti a teplotě, při které je vzorek zkoušen. Obr.2a znázorňuje zkušební vzorek z oceli TRISTAL před dopadem, obr.2b po dopadu. U vzorků po experimentu bylo provedeno základní geometrické měření tj. délky vzorků, průměru vzorku na čele deformované a nedeformované části. Měření bylo provedeno pomocí mikrometru s rozsahem 0-25 mm s přesností 0,01 mm několikrát po obvodu vzorku. Po zaznamenání všech prvotních údajů bylo provedeno komplexní sejmутí kontury vzorků pomocí obrazové analýzy a softwaru LUCIE s návazností na CCD kameru se zvětšovací optickou hlavou. CCD kamera byla umístěna ve stojanu umožňující vertikální pohyb a zároveň zajišťující kolmost vzhledem k základně, na kterém je umístěn přípravek se zkušebním vzorkem. Jednotlivé zkušební vzorky byly umístěny do speciálně zkonstruovaného přípravku zabezpečující kolmé sejmутí kontury. Pro kalibrování měřítka v programu LUCIE bylo umístěno v ose vzorku měřící zařízení. Programem byla sejmuta kontura vzorku. Měření bylo provedeno i na čelní straně vzorku sejmутím maximálního deformovaného průměru. Měření čelní plochy – průměru je ukazatelem symetrického nárazu vzorku na tuhou desku u TAT.

## 5 VÝZKUM A VÝVOJ KOMPONENT

Pro získání korektních výsledků potřebných jako vstupní údaje do simulačního programu bylo nutné se zaměřit na několik úkolů (cílů), které významně ovlivňují úspěšný průběh a výsledek testu. Bez vyřešení těchto dílčích úkolů nebylo možné experiment až na výjimky korektně uskutečnit a vyhodnotit. Tím pádem i přenos dosažených výsledků z experimentu do simulačního softwaru včetně okrajových podmínek by byl nekorektní až zcestný. Pro ucelenost jsou v následujících bodech souhrnně uvedeny dosažené výsledky úkolů, se svými klady i zápory a důležitost jejich využití při řešení problematiky tématu disertace.

### 1. Posun ve vývoji transportního zařízení (nosiče) zkušební vzorku

Nosič zkušebních vzorků je důležitým faktorem pro úspěšný výsledek testu. Základním a podstatným cílem nosiče je zaručení transportu zkušební vzorku v celé délce hlavně vzduchového kanónu a kolmý náraz na dopadovou desku (tyč, příp. dynamometr). Vyvinutý polystyrénový nosič má optimální hmotnost, dostatečnou tuhost, protože i při maximální rychlosti nedojde k proražení nosiče vzorkem. V rámci zvolené technologie má polystyrénový granulát dobrou zabíhavost a rozměrovou stálost. Cenová relace polystyrénového granulátu je v rámci roční sériovosti výroby (max. 200 ks nosičů /rok) minimální.[11]

### 2. Vývoj zařízení umožňující zkoušet vzorky za tepla

Pro komplexní a reprezentativní popis materiálových modelů – vstupních dat do simulačního programu chyběla závislost teploty na rychlosti dopadu zkušebních vzorků. Byla vyvinuta metoda umožňující zkoušet materiály při zvýšených teplotách v intervalu teplot od 20-500°C. Tento interval přibližně zodpovídá teplotám, při kterých jsou vyráběny dílce objemovým tvářením za studena. Místo dopadu zkušebních vzorků tzv. dopadiště bylo upraveno tak, že umožňuje umístit snímač teploty vzorků přímo k místu dopadu a snímat tak okamžitou povrchovou teplotu vzorku.[16,17]

### 3. Vývoj zařízení pro měření dopadové rychlosti vzorku

Vyvinutí nového přístroje pro snímání času průletu přineslo mnoho zpřesnění při měření dopadové rychlosti a vyjasnění ovlivňujících faktorů během TAT. Výhodou je vývod BNC konektoru z měřícího zařízení. Tento vývod slouží jako startovací zařízení pro měření průběhu napětíových vln. Zároveň došlo k výraznému omezení vlivu faktorů na výslednou dopadovou rychlost zkušební vzorku. Z původních 9 faktorů se zásluhou tohoto zařízení jejich počet snížil na 2.[15,17,18]

### 4. Detekce průběhu rázové síly při TAT

Rázová síla u TAT je jednou z důležitých výstupních parametrů testu. Velikost a průběh síly nám poskytuje konkrétnější představu o průběhu deformace vzorku. Zároveň může být srovnávacím parametrem mezi experimentem a simulací vysokorychlostního děje. K měření rázové síly byl navržen dynamometr, na kterém byly přilepeny odporové tenzometry s minimálními rozměry, měřící deformaci měrné části dynamometru. Navržený dynamometr byl za statických podmínek cejchován a byla u něj stanovena směrnice zatěžující přímky. Do budoucna by bylo dle experimentů vhodné zaměnit použité odporové tenzometry 3/120 LY 11 na odporové tenzometry 0,6/120 LY 11 nebo za polovodičové tenzometry např. firmy KULITE a to s ohledem na jejich vyšší citlivost a menší měrnou délku měření. Dále by bylo vhodné prodloužit měrnou část dynamometru s ohledem na interferenci rázových pulsů šířících se v dynamometru [15].

### 5. Detekce napětíových vln při dopadu vzorku u TAT

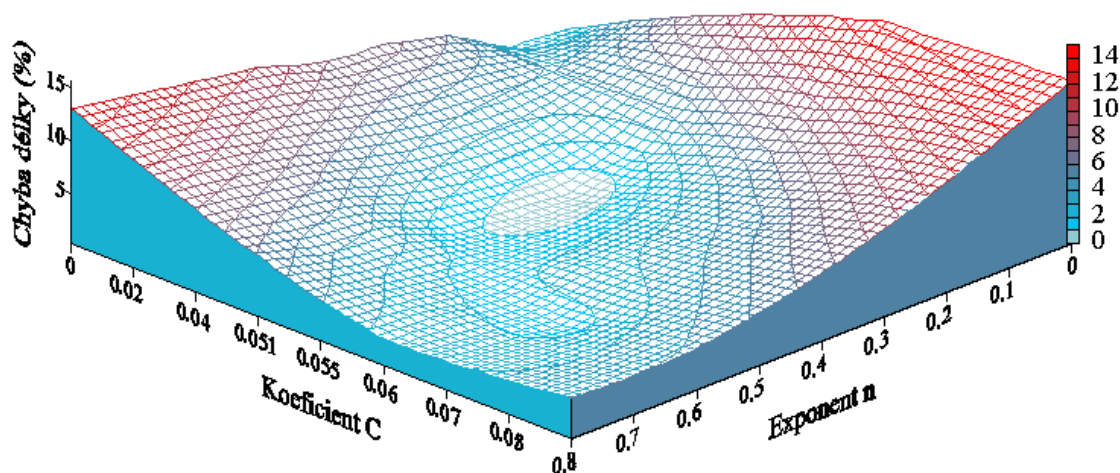
Úkolem detekce napětíových vln šířících se při dopadu vzorku na dopadišti je určení doby trvání napětíového pulsu, jeho velikosti a průběhu na tyči z vysokopevné oceli MARAGING. Díky této úpravě dopadové plochy experiment poskytuje důležitá data (dobu napětíového pulsu, max. velikost a průběh nap. pulsu v tyči po dopadu zkušební vzorku), která jsou zajímavá a důležitá při porovnání simulace a experimentu vysokorychlostního děje [15].

## 6 MODELOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ TAYLOROVA TESTU

Modelování experimentálních výsledků Taylorova testu nespočívá jen ve fiktivním a nahodilém zadání vstupních materiálových parametrů, okrajových podmínek a počáteční geometrie vzorku do simulace a následné simulování děje. Především jde o provedení mnoha experimentů, jejich vyhodnocení a následné a cílené zadání vstupních podmínek do simulací, přesněji řečeno do konstitutivních rovnic, které mají fyzikální význam. Tyto vstupní parametry a podmínky tvoří jasné omezení. Ostatní parametry obsažené v použitých konstitutivních rovnicích se nejprve zadávají na podkladě dřívějších zkušeností. Výsledky simulace testu s takto zadanými parametry se srovnávají se skutečným výsledkem experimentu (tvaru vzorku po deformaci). Co možná nejužší přiblížení výsledků mezi experimentem a simulací je směrodatné pro stanovení všech získaných parametrů v konstitutivní rovnici. Jako nejužší přiblížení je mezi specialisty na tuto tematiku všeobecně považována hranice v rozmezí 5-10%. Výsledné hodnoty parametrů v konstitutivní rovnici, které spolu s jasně definovaným chemickým složením, tepelným zpracováním a okrajovými podmínkami jsou součástí reprezentativního materiálového modelu.

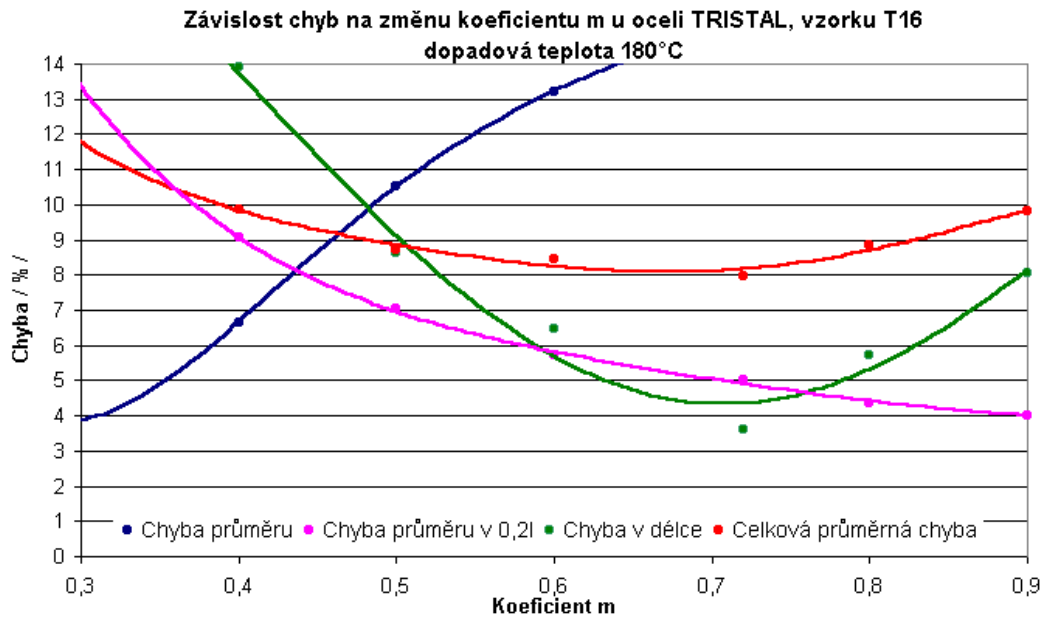
A o co vlastně v simulacích šlo? Z obrazové analýzy jsme získali konečný tvar vzorku po nárazu na tuhou kovadlinu. Získaná data z obrazové analýzy jsme v úvodu modelování porovnávali s hodnotami (změnami) délky a průměru vzorku vzhledem k dopadové rychlosti projektilu. V rámci simulací jsme se mohli spolehnout, že výsledky naměřené dopadové rychlosti jsou adekvátní zadaným hodnotám dopadové rychlosti v simulaci. V experimentu je dopadová rychlost vypočtena z času průletu mezi dvěma fotodiodami, které jsou umístěny 5 mm od dopadistiže (tuhé desky).

U konstitutivního vztahu dle Johnson-Cooka byla sledována závislost mezi jednotlivými parametry jako např. na obr.3. Na obr.3 jsou uvedeny závislosti mezi chybami délky (procentuálními rozdíly mezi experimentem a simulací v délce) na exponentu zpevnění  $n$  a koeficientu citlivosti na rychlost deformace  $C$  pro vzorek T14 z oceli TRISTAL (dopadová rychlost 235,8 m/s).



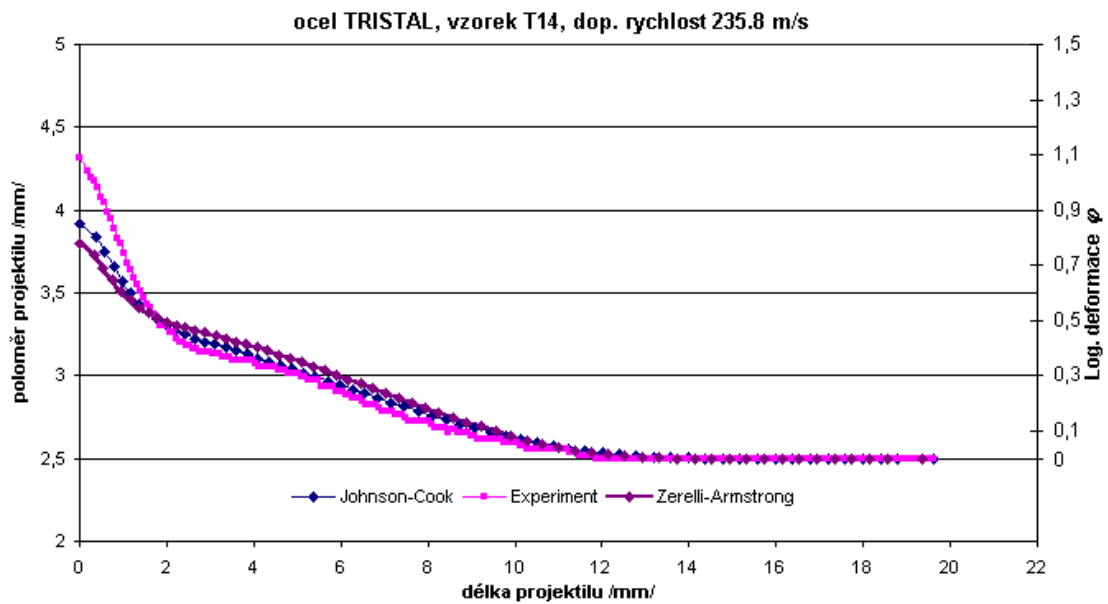
Obr.3 Závislost chyby délky na koeficientu C a exponentu n

Podobně jako u optimalizace exponentu  $n$  a koeficientu  $C$  bylo postupováno i u koeficientu  $m$ . Byly sledovány odchylky-chyby mezi simulací a experimentem u výsledné délky, průměru vzorku u čela dopadu, průměru vzorku v  $0,2 \times$  konečná délka vzorku. Pomocí těchto chyb byla vypočtena průměrná chyba mezi simulací a experimentem. Závislosti chyb na koeficient  $m$  pro ocel TRISTAL, vzorek T16 (dopadová teplota vzorku  $180^{\circ}\text{C}$ ), jsou uvedeny na obr. 4.



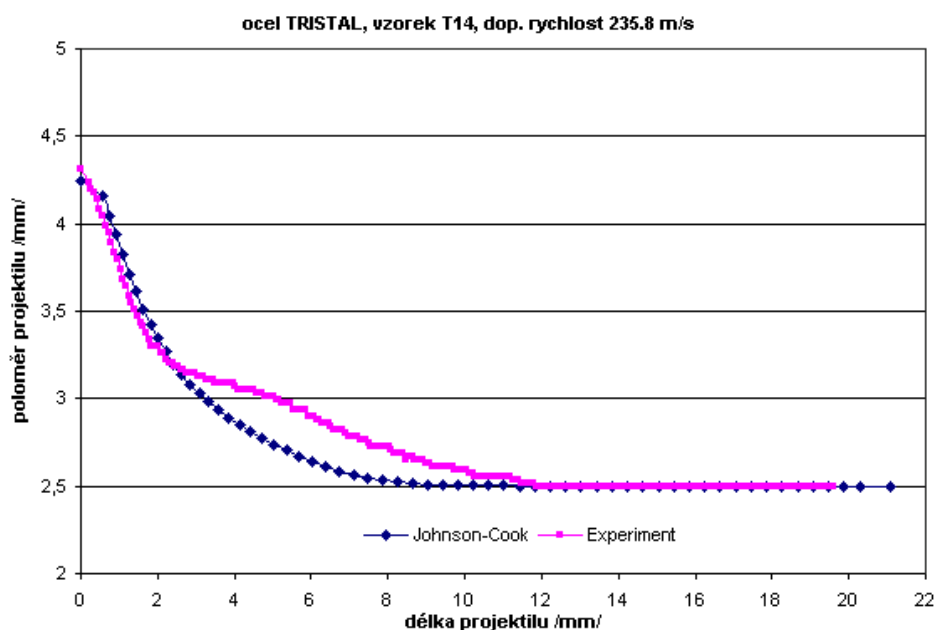
Obr. 4 Závislost chyb na koeficientu m

Předpokládáme-li, že se nám podařilo nalézt hodnoty koeficientu C a exponentu n, potom výsledek simulací pro jednotlivé vzorky z oceli TRISTAL vypadal následovně. Obrázky porovnávají výsledné kontury vzorků získané z obrazové analýzy, dále pak z modelování obou typů konstitutivních rovnic podle Johnson-Cooka a Zerilli-Armstronga. Kontury jsou zobrazeny pro 1/4 vzorku.



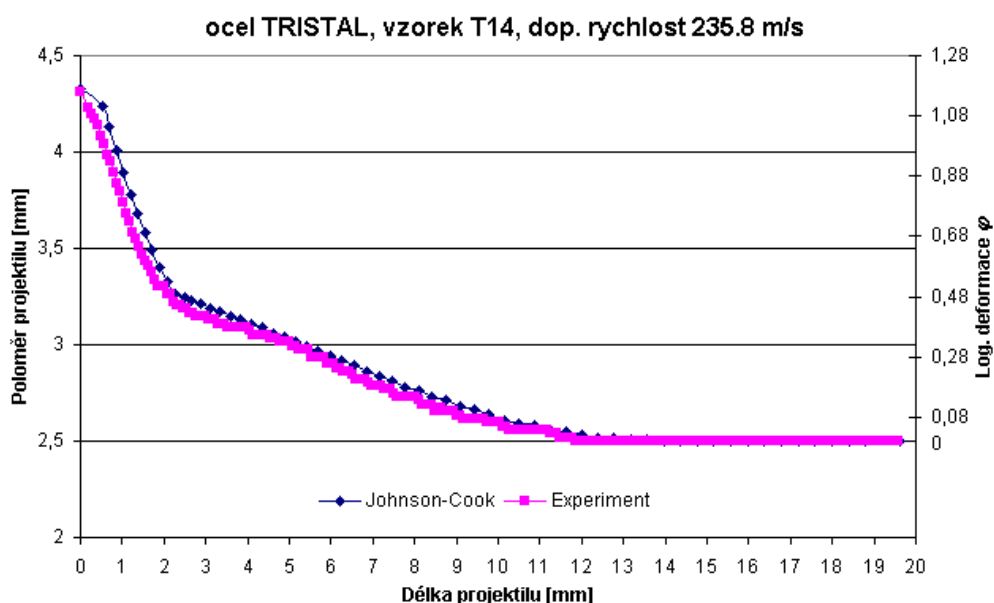
Obr.5 Výsledek experimentu a simulace pro parametr  $n=0,3$  a  $C=0,051$  vzorek T14

Z předchozího obrázku je vidět, že v oblasti od čela dopadu do vzdálenosti asi 2 mm není věrohodné kopírování kontury vzorku u simulace a kontury vzorku u experimentu, ale od 2 mm do konce vzorku již simulace a experiment korespondují. Z tohoto důvodu byly provedeny simulace se změněnými parametry v konstitutivním vztahu.



Obr.6 Výsledek experimentu a simulace pro parametr  $n=0$  a  $C=0,051$  vzorek T14

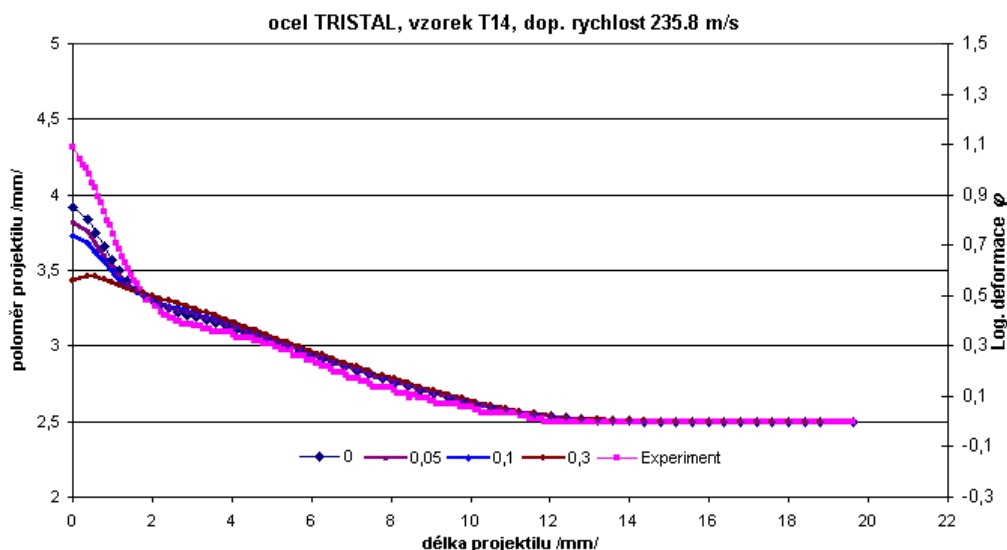
Jestliže spojíme výsledek simulace s parametry konstitutivní rovnice  $n=0,3$ ,  $C=0,051$  (obr.5) a  $n=0$ ,  $C=0,051$  (obr.6) dostaneme výsledný tvar simulace, který je v následujícím obrázku porovnáván s konturou vzorku experimentu.



Obr.7 Kontura vzorku pro konstitutivní rovnici dle Johnson-Cooka při skloubení změněných parametrů v této rovnici

### Vliv součinitele tření na konturu simulovaných vzorků

U softwaru LS DYNA 3D je součinitel tření definován a zadáván podle Coulomba. Podívejme se nyní na dosažené výsledky simulací při změněných kontaktních podmínkách u vzorku T14 z oceli TRISTAL.



Obr.8 Výsledek experimentu a simulace pro různé součinitele tření u vzorku T14

Na obr.8 jsou zobrazeny výsledky simulace pro různé součinitele tření. Je patrné, že součinitel tření výrazně ovlivňuje výslednou konturu vzorku. Při vyšším součiniteli tření ( $f=0,3$ ) je patrný vznik efektu tzv. „soudečkovitosti“ u čela dopadu. Tento efekt při klesajícím součiniteli tření nebyl tak výrazný. U nulového souč. tření se efekt „soudečkovitosti“ změnil na efekt „trychtýřkování“, který více odpovídal skutečnosti a to nejen u znázorněného vzorku T14, ale i vzorků, které byly zatěžovány nižšími dopadovými rychlostmi. Ze všech dosažených výsledků modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace vyplynulo, že experimentům blíže odpovídaly hodnoty nulového součinitele tření.

## 6.1 Výsledky simulací vysokorychlostního děje

Typ konstitutivní rovnice					
Johnson – Cook			Zerilli – Armstrong		
parametr	TRISTAL	12 050.3	parametr	TRISTAL	12 050.3
$\rho$	7870 (kg/m <sup>3</sup> )	7870 (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	7870 (kg/m <sup>3</sup> )	7870 (kg/m <sup>3</sup> )
G	8,077 E+01	8,077 E+01	G	8,077 E+01	8,077 E+01
A	273 MPa	305 MPa	C1	273 MPa	305 MPa
Q <sub>t</sub>	600 (J/kgK)	600 (J/kgK)	T <sub>0</sub>	300 °K	300 °K
$\dot{\phi}_0$	1 s <sup>-1</sup>	1 s <sup>-1</sup>	pc	10000 MPa	10000 MPa
T <sub>m</sub>	1800°K	1800°K	n	0,3	0,24
B	401 MPa	850 MPa	C2	211	720
C	0,051	0,052	C3	0,006	0,005
m	0,72	0,88	C4	0,00065	0,00055
T <sub>0</sub>	300 °K	300 °K	C5	320	297
n	0,3	0,24	f	0	0
f	0	0			

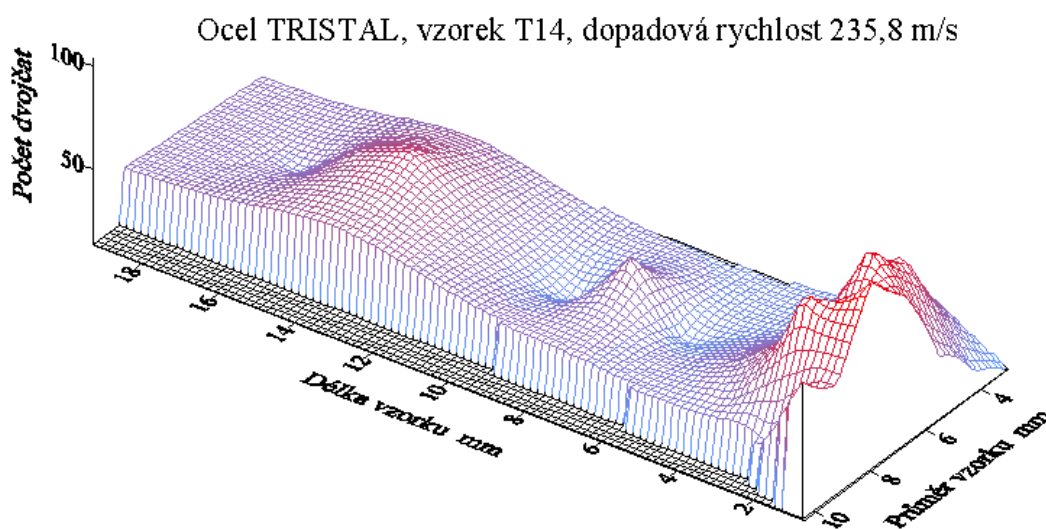
Tab.2 Výsledné hodnoty parametrů použité v simulačním programu LS DYNA3D [21-27]



# 7 VYHODNOCENÍ STRUKTURY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Ve snaze zjistit, co se děje se strukturou zkoušených ocelí, zejména oceli TRISTAL a oceli 12050.3 jsme se pokusili nejdříve vysledovat deformační procesy.

Zjistili jsme, že na zatížené straně vzorků dochází k velkému spěchování zrn a patrnému výskytu deformačních dvojčat, zatímco na nespěchované části vzorku jsou zrna bez sebemenší deformace. Jako zajímavá se jevila myšlenka zmapovat počet mechanických dvojčat v celém řezu vzorku. Obzvláště zmapování počtu mechanických dvojčat je zajímavé z hlediska provedených výsledků zmapování (mikro)tvrdosti v závislosti na plastické deformaci (změně geometrických parametrů) vzorků. Pokusili jsme se proto použít nízkouhlíkovou ocel TRISTAL a klasickou metalografii. Výsledek je na obr.9.



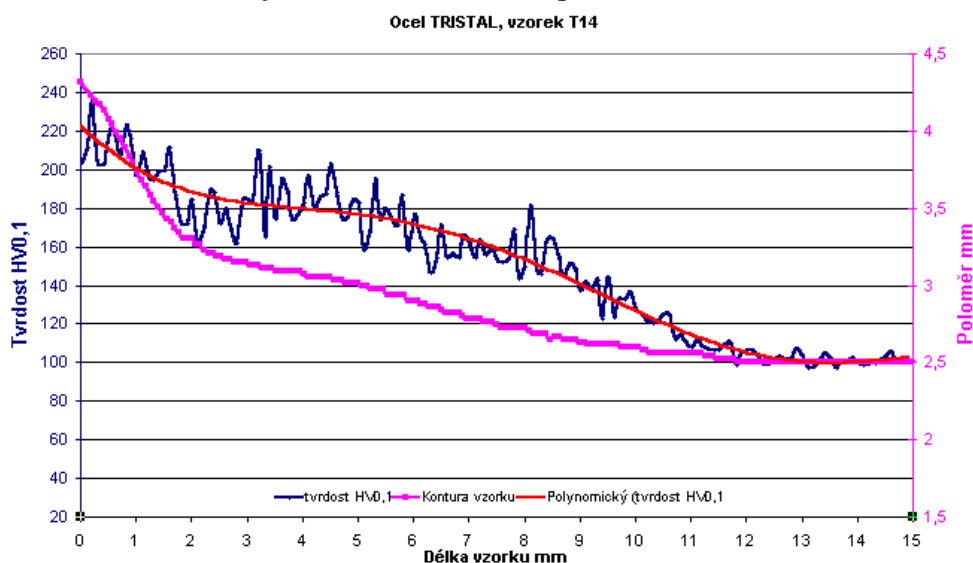
Obr.9 Počet dvojčat v závislosti na délce vzorku u vzorku T14 z oceli TRISTAL

Počet dvojčat na ose Z není nijak normován (je to počet dvojčat na jeden záběr v mikroskopu) a záběry se mírně překrývají, aby byla zaručena návaznost. Obrázky struktury byly získány na osovém řezu vzorku a byla měřena jeho jedna polovina (tj na šířku velikost poloměru) do průměru byla data zrcadlově převrácena. I když vezmeme v úvahu poměrně velkou chybu měření a nutnost určit tyto závislosti na větším počtu vzorků a materiálů je zřejmé, že ve vzdálenosti asi 3 mm od dopadového čela nastává u tohoto vzorku výrazný pokles počtu dvojčat. Dá se tedy předpokládat, že ve vzdálenosti kolem tří milimetrů nastává u tohoto vzorku změna mechanismu z dvojčatění na dislokační skluz. U vzorků, které byly namáhány za nižších dopadových rychlostí (150-200 m/s) byl tento poznatek obdobný, tedy u dopadového čela vzorku byl jednoznačně patrný výskyt mechanických dvojčat. Se zvětšující se vzdáleností od dopadového čela vzorku se počet dvojčat snižoval. U malých dopadových rychlostí vzorku (30 až 150 m/s) byl výskyt mechanických dvojčat nízký. Všechny tyto změny a průběhy počtu mechanických dvojčat souvisí nejen s dopadovými rychlostmi, ale taky v návaznosti na velikost logaritmické deformace.

## 7.1 Vyhodnocení tvrdosti zkušebních vzorků

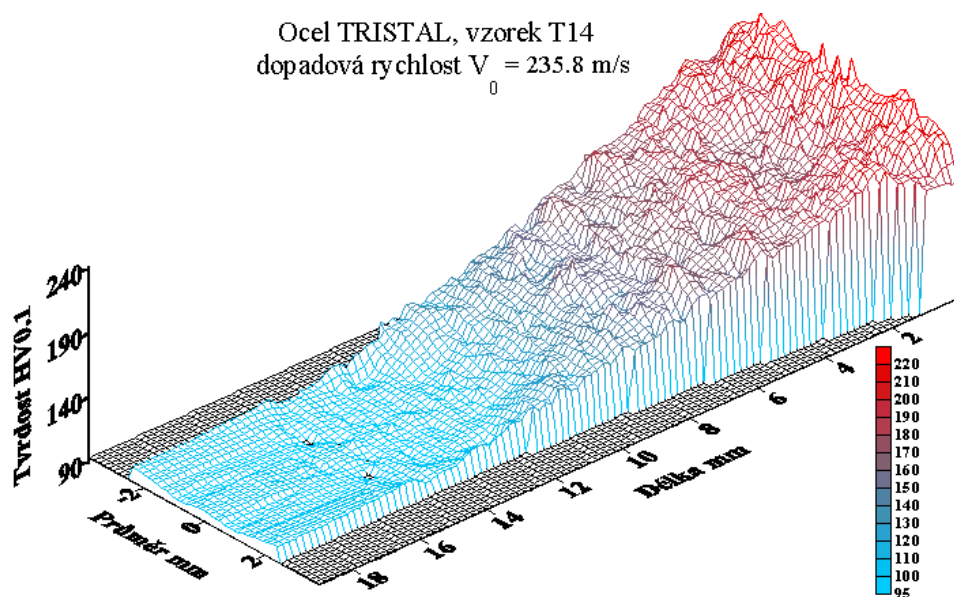
Jako míru plastické deformace lokálně zjistitelnou na exponovaném vzorku byla zvolena (mikro)tvrdost. Odpovídá-li v daném materiálu dosažená úroveň plastické deformace deformačnímu napětí v daném bodě hypotetického tahového (tlakového) diagramu pak s jistou licencí můžeme tvrdost přiřadit úrovni plastické deformace v místě vpichu. Je zde samozřejmě možná námitka, že metalografická příprava osového řezu zvedne poněkud tvrdost (při pečlivé přípravě k tomu nedojde),

ale i pak by to zvednutí hodnot tvrdosti bylo malé a reprezentovalo by na větší části řezu konstantní aditivní příspěvek k výsledné hodnotě tvrdosti. Pro větší názornost jsou na obr.10 zobrazeny závislosti mezi plastickou deformací sejmutím tvaru vzorku a průběhem tvrdosti na délce vzorku.



Obr.10 Závislost tvrdosti HV0,1 a poloměru vzorku na délce vzorku pro vzorek T14, ocel TRISTAL

Z obr.10 je možno vypořadovat několik skutečností. Pomocí obrazové analýzy a důkladného měření mikrotvrdomosti byla vypořadována jednoznačná vazba mezi měřeními a to jak pro ocel TRISTAL, tak i pro ocel 12050.3. Na obr.10 je porovnání tvrdosti a kontury vzorku pro ocel TRISTAL pro vzorek T14, jehož dopadová rychlost byla 235,8 m/s. Je vidět, že průběh tvrdosti věrohodně kopíruje konturu vzorku. Stojí za pozornost všimnout si „zlomu“ cca 2 mm od čela dopadu. Je vidět, že změna tvrdosti se projevila i v tomto zlomu, jakož i následný vznik „soudečkovitého“ tvaru. Obdobné výsledky byly dosaženy i u oceli 12050.3. Závislosti nebyly pozorovány jen u znázorněného vzorku T14, ale i u vzorků zatěžovaných nižšími dopadovými rychlostmi. Vazba mezi konturou vzorků a tvrdostí byla jednoznačná i za nižších dopadových rychlostí. Na obr.11 je znázorněna mapa naměřené tvrdosti v podélném řezu vzorku T14.



Obr.11 Tvrdost HV0,1 pro ocel TRISTAL, vzorek T14

## 8 MATERIÁLOVÉ MODELY VYBRANÝCH TYPŮ OCELÍ

Materiálový model je určitým komplexním souhrnem materiálových hodnot - struktury materiálu, chemického složení, typu a způsobu tepelného zpracování až po informace o mechanických vlastnostech reprezentující závislosti jako např. křivek deformačních odporů a křivek přetvárné práce za různých rychlostí deformace a různých teplot, atd. Pro modelování mechanického chování vybraných typů ocelí za vyšších rychlostí deformace nepostačovaly jen základní informace o ocelích tj. informace o chemickém složení, typu tepelného zpracování. Pro podrobnější specifikaci ocelí musely být provedeny takové zkoušky, jejichž data byla potřebná a cíleně vkládaná do simulací. Proto část disertace se zabývala vybranými typy zkušebních metod, včetně jejich vyhodnocení. Hlavní důraz byl kladen na zkoušky a modelování chování ocelí za vyšších rychlostí deformace zejména u Taylorova testu viz kapitola 6 tezí.

### 8.1 Ocel 12050.3

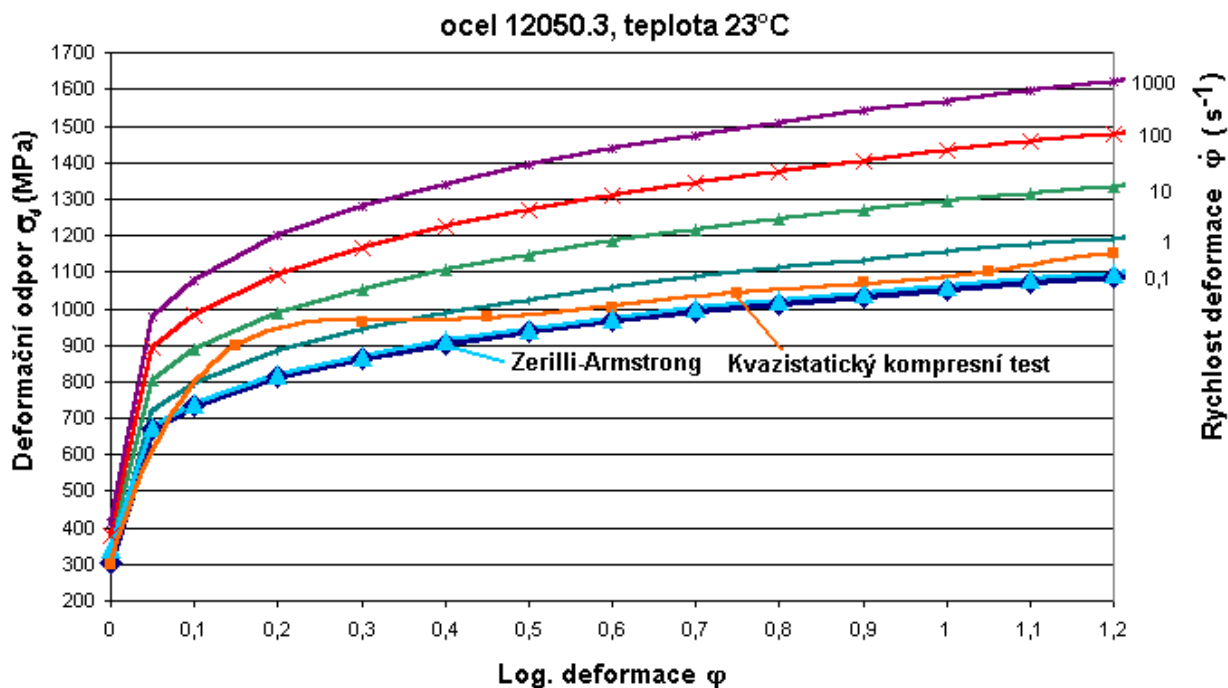
Konstrukční ušlechtilá ocel 12 050 je dostatečně známou a hojně využívanou ocelí. Je vhodná pro kalení a zušlechťování. Součásti vyráběné z této oceli mají široké uplatnění v průmyslové praxi. Nejčastěji jsou používána na vysoko namáhané součásti jako např. šrouby, matice, táhla a hřídele atd. Procentuální složení jednotlivých látek v oceli 12 050.3 je uvedeno v Tab. 3.

<b>Ocel ČSN 41 2050</b>	<b>Chemický prvek</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>
	<b>% látky</b>	0,51	0,69	0,25	0,023	0,017	0,15
	<b>Chemický prvek</b>	<b>Cu</b>	<b>Sn</b>	<b>Al</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	
	<b>% látky</b>	0,12	0,005	0,037	0	0	

Tab. 3 Aktuální chemické složení uhlíkové oceli ČSN 41 2050

Ve výchozím dodaném stavu o střední tvrdosti  $HV_5=196$  jde perliticko-feritickou strukturu s výrazným lamelárním perlitem a feritickým síťovím. Žiháním naměkko při  $700^\circ\text{C}/24$  hod v peci byla dosažena téměř dokonalá sferoidizace cementitu v oblasti perlitu a neúplného síťoví feritu. Důsledkem žihání naměkko byl pokles střední tvrdosti  $HV_5=175$

Po žihání naměkko byly porovnávány střední tvrdosti jednotlivých tyčí a to jak u zadní stěny pece, tak u dveří pece. V obou případech nebyla zjištěna odchylka a byla naměřena střední tvrdost  $HV_5 = 175$ . Na obr.12 jsou zobrazeny křivky deformačních odporů za pokojové teploty  $23^\circ\text{C}$ . Pro porovnání jsou kromě křivek deformačních odporů z rovnice dle Johnson-Cooka za různých rychlostí deformace ( $0,1$  až  $1000 \text{ s}^{-1}$ ) zobrazeny i křivky dle rovnice Zerilli-Armstronga a z kvazistatického kompresního testu



Obr.12 Křivky deformačních odporů pro ocel 12050.3

## 8.2 Ocel TRISTAL

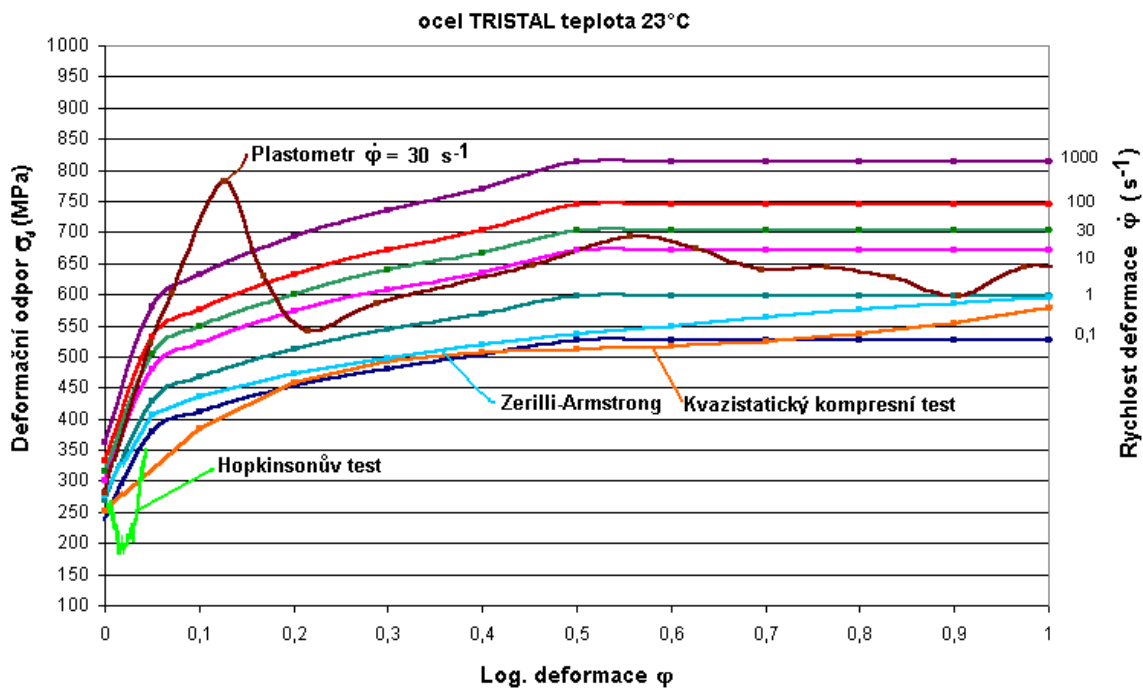
Nízkouhlíková ocel „TRISTAL“ je vyráběna firmou Moravia Steel a.s. Třinec (dříve firmou Třinecké železářny a.s.) pod podnikovou normou TZ 002500 [19]. Před rokem 1990 byla ocel používána výhradně v tzv. speciální výrobě. Výhodou oceli je vysoký stupeň tvařitelnosti za studena případně i za poloohřevu. Významné je její použití při výrobě součástí objemovým tvářením za studena a plánuje se její využití i za poloohřevu. V současnosti se využívá k výrobě jednak tenkostěnných průtlaků např. pístů, tlakových nádob, tak součástí vyráběných kombinovaným tvářením za studena jako např. pístnic a přípojek. Tyto součásti jsou použity v důležitých automobilových celcích např. v brzdách a řízení. TRISTAL je konstrukční nelegovaná ocel s předepsaným obsahem C, Mn, Si, P, S. Je vhodná k cementování. Po kalení se vyznačuje menší pevností v jádře a má zaručenou svařitelnost. Chemické složení oceli TRISTAL bylo zjišťováno pomocí spektrální analýzy na zkušební stroj Spectrometer LECO GDS 750. V následující tabulce jsou uvedeny zjištěné výsledné hodnoty chemického složení nízkouhlíkové oceli.

Ocel TRISTAL	Chemický prvek	Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
	% látky	99,04	0,1	0,38	0,07	0,012	0,008	0,05	0,04
	Chemický prvek	Cu	Co	Nb	Sn	Sb	As	Al	B
	% látky	0,1	0,009	0,004	0,006	0,007	0,01	0,021	0,001

Tab. 4 Chemické složení nízkouhlíkové oceli TRISTAL

Ve výchozím dodaném stavu o střední tvrdosti  $HV_5=188$  jde převážně o feritickou ocel s výskytem perlitických útvarů, zejména při trojných bodech. Perlitické kolonie byly žháním naměkko při  $700^\circ\text{C}/24$  hod v peci dokonale přeměněny na globulární tvar cementitu s výrazným poklesem střední tvrdosti  $HV_5=88$ .

Po žihání naměkko byly porovnávány střední tvrdosti jednotlivých tyčí a to jak u zadní stěny pece, tak u dveří pece. V obou případech nebyla zjištěna odchylka a byla naměřena střední tvrdost  $HV_5 = 88$ .



Obr. 13 Křivky deformačních odporů pro ocel TRISTAL

Křivky deformačních odporů jsou uvedeny pro různé rychlosti deformace. Pro porovnání jsou zobrazeny i křivky získané z jiných zkušebních metod jako např. z kvazistatické zkoušky, z plastometru a Hopkinsonova testu. Ostatní závislosti jsou získány z výsledku simulací pro konstitutivní vztah dle Johnson - Cooka. Pro porovnání je zobrazena i křivka získána ze simulace pro konstitutivní vztah dle Zerilli-Armstronga. V závislostech deformačních odporů získané z rovnice J-C jsou zohledněny změny jednotlivých parametrů v konstitutivní rovnici. Spojíme-li závislosti deformačních odporů s různými parametry konstitutivní rovnice J-C do jedné závislosti deformačních odporů na log. deformaci získáme následující křivky viz obr. 13.

## 9 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ MATERIÁLOVÉHO MODELU U VYBRANÉ SOUČÁSTI VYRÁBĚNÉ ZA STUDENA NA POSTUPOVÉM AUTOMATU TPZD 25

Veškeré výše dosažené výsledky výzkumu by byly neúplné nebýt praktického uplatnění a přenosu výsledků výzkumu do praxe. V technologiích objemového tváření za studena se mnoho součástí vyrábí na postupových automatech, jejichž dosahované rychlosti deformace překračují možnosti získaných materiálových modelů za kvazistatických podmínek. Výzkumem bylo zjištěno, že Taylorův test se svým způsobem přibližuje namáhání součástí při výrobě objemovým tvářením za studena a je tedy ideálním prostředkem pro získání materiálových modelů za vyšších rychlostí deformace.

Cílem experimentu bylo ověřit tok materiálu a velikost tvářecích sil u experimentu a simulace v programu FORMFEM. Do simulace v programu FORMFEM byly vloženy výsledky materiálového modelu oceli 12050.3 získaných z výsledků výzkumu modelování mechanického chování oceli za vyšších rychlostí deformace především z výsledků modelování Taylorova testu.



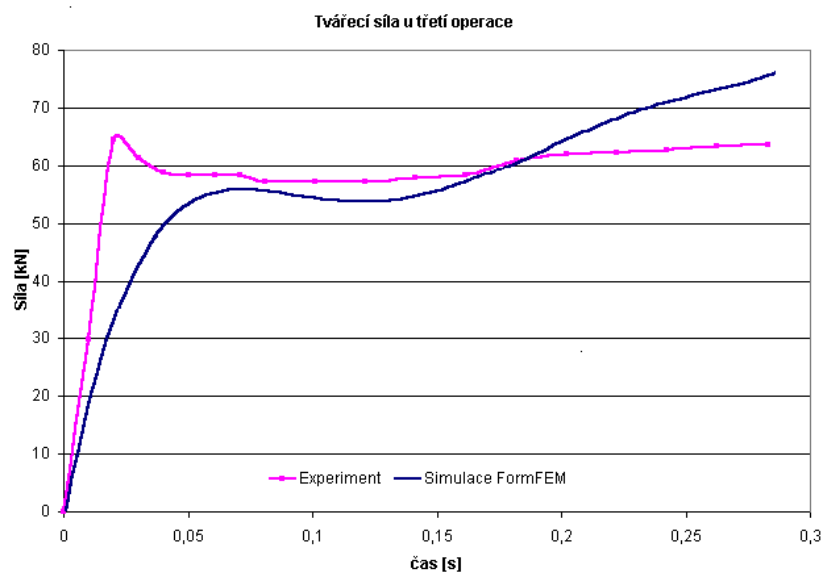
Obr.14 Výrobní postup součásti „GRED“

K praktickému ověření experimentu a simulace na základě získaného materiálového modelu oceli 12050.3 byly zvoleny dvě po sebe následující operace: dopředné protlačování–3 operace a pěchování hlavy-4 operace. Pro operace 3 a 4 byly sestrojeny a cejchovány dynamometry, které byly umístěny do dutiny nástroje.

### Výsledky měření

#### Průběh tvářecí síly u třetí operace (redukce průměru $\phi 17,2$ mm na $\phi 14,8$ mm)

Vstupními hodnotami materiálového modelu u simulace byly křivky deformačních odporů získané za rychlostí deformace  $0,1$  až  $1000 \text{ s}^{-1}$  a teplot  $23$ ,  $100$  a  $200^\circ\text{C}$ . Jako výrobní stroj byl použit postupový automat TPZD 25 s počtem zdvihů  $60 \text{ min}^{-1}$ , zdvihem beranu  $330 \text{ mm}$ , s horním a spodním nástrojem absolutně tuhým. Součinitel tepelné vodivosti  $30 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  a měrná tepelná kapacita  $600 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  dle [20] součinitel tření  $0,1$ . Závislost experimentální a simulované tvářecí síly na čase u třetí operace je zobrazen na následujícím obr.15.



Obr.15 Porovnání simulovaného a naměřeného průběhu tvářecí síly u 3 operace



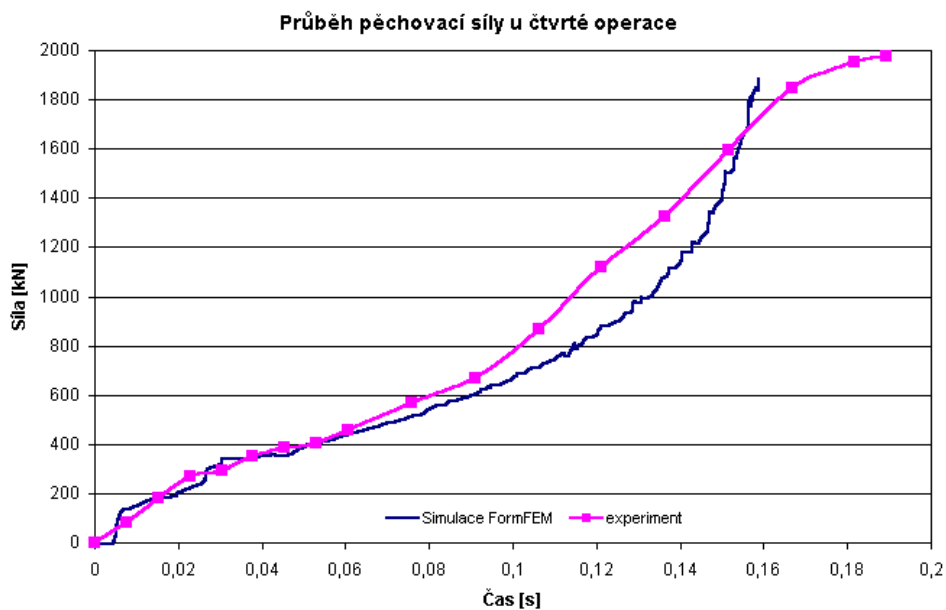
Z předcházejícího obrázku je u experimentálního průběhu patrný prudký vzestup síly, poté pokles a následné postupné narůstání síly. Domnívám se, že prudký vzestup tvářecí síly může souviset s rozvojem plastické deformace. Pravděpodobně nejprve dochází k elastickému namáhání materiálu, až do doby, kdy dojde k překonání poruch na hranicích zrn. Tento rozvoj plastické deformace se projevil poklesem tvářecí síly. Při zvyšování deformace docházelo k postupnému zpevňování materiálu, což se projevilo postupným zvětšováním tvářecí síly.

Experimentálně naměřená tvářecí síla je v průběhu mírně vyšší než simulovaná. V konečné fázi dosahovala simulovaná síla vyšších hodnot než experimentálně naměřená. Maximální experimentální tvářecí síla byla 64,5 kN, zatímco simulovaná byla 77 kN. Konečný rozdíl sil je možné vysvětlit tím, že u simulace byl nástroj zadán absolutně tuhý, a proto i konečná síla dosahovala vyšších hodnot.

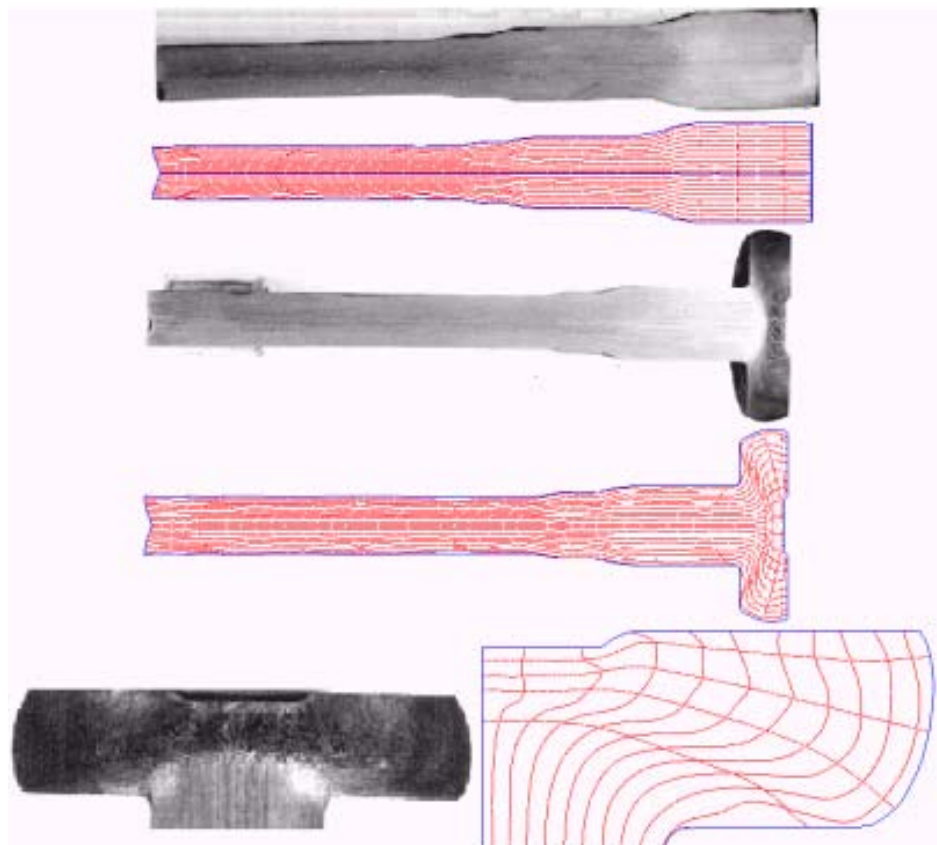
Průběh tvářecí síly u čtvrté operace- pěchování hlavy z  $\phi 20$  mm na  $\phi 49$  mm.

Závislost experimentálně naměřeného a simulovaného průběhu pěchovací síly na čase je zobrazeno na následujícím obr.16. Maximální experimentálně naměřená pěchovací síla u čtvrté operace byla 1976,7 kN, zatímco maximální pěchovací síla u simulace byla 1890 kN.

Nejen tvářecí síly jsou jednoznačným ukazatelem dosažených výsledků. Z tohoto důvodu byl sledován v jednotlivých operacích tok materiálu. Na dále uvedených obrázcích je znázorněn tok materiálu u obou operací a to vždy s porovnáním experimentu a simulace.



Obr.16 Porovnání simulovaného a naměřeného průběhu pěchovací síly u 4.operace



Obr.17 Skutečný a simulovaný tvar součásti

Z obr.17 je patrná relativně dobrá shoda mezi experimentem a simulací. Vyhodnotíme-li rozdíl tvářecích sil a toku materiálu mezi simulací a experimentem zjistíme, že zadáme-li co nejpřesnější materiálový model s okrajovými podmínkami do simulačního programu můžeme očekávat i daleko přesnější výsledky blížíící se reálnému namáhání materiálu. Obzvláště když jsme zadali křivky deformačních odporů nejen za vyšších rychlostí deformace, ale i za vyšších teplot. Pro určení křivek deformačních odporů při modelování mechanického chování materiálů za vyšších rychlostí deformace se jako ideální jeví právě Taylorův test.

## 10 SHRNU TÍ A ZÁVĚRY

Disertační práce byla zaměřena na modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace. Jejím cílem bylo vytvořit reprezentativní materiálový model, popsaný spolehlivým konstitutivním vztahem, který zahrnoval fyzikální členy modelu materiálu jako spojitého kontinua určitého typu. Dalším cílem bylo vytvoření metodického celku efektivně integrujícího materiálové modely pro simulaci a technologické aplikace s jasně popsanou strukturou a tepelným zpracováním.

Toto bylo provedeno cestou aplikovaného výzkumu chování a modelování materiálů za vyšších rychlostí deformace prostřednictvím stávajících standardních zkušebních metod. Pro výzkum metodiky modelování byly vybrány dvě typické oceli využívané zejména v technologiích objemového tváření za studena, a to ocel TRISTAL a uhlíková ocel 12050.3. U vybraných ocelí bylo provedeno tepelné zpracování – žihání naměkko s jasně definovanou dobou a průběhem tepelného zpracování. Byla zaznamenána jejich struktura před tepelným zpracováním a po jeho provedení. Dále bylo s použitím spektrometru LECO vyhodnoceno jejich přesné chemické složení. Po zjištění potřebných informací o vybraných ocelích byly provedeny základní mechanické zkoušky, a to nejen za kvazistatických, ale také za dynamických podmínek zatěžování. Za kvazistatických podmínek zatěžování byly provedeny tahové zkoušky s vyhodnocením základních mechanických charakteristik -



meze kluzu, meze pevnosti, tažnosti, kontrakce atd., a rovněž i vyhodnocení exponentu zpevnění. Za kvazistatických podmínek byly zároveň uskutečněny kompresní testy na lisu CZR 600 na Ústavu strojírenské technologie, odboru tváření kovů a plastů FSI VUT v Brně s vyhodnocením křivek deformačních odporů, přetvárné práce apod.. Zkoušky byly realizovány za pokojových teplot i za vyšších teplot (100°C a 200°C). Za dynamických podmínek zatěžování byly provedeny kompresní zkoušky na váčkovém plastometru na Žilinské univerzitě v Žilině. Dále proběhla realizace dynamické zkoušky na zařízení Hopkinsonova testu na ÚST, odboru tváření kovů a plastů FSI VUT v Brně. U těchto testů byly vyhodnoceny křivky deformačních odporů, křivek přetvárné práce.

Pro vypracování komplexní metodiky modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace bylo využito zejména experimentálních výsledků získaných z aplikace Taylorova testu s podloženými vědeckými analýzami fyzikálních parametrů v konstitutivních vztazích. Důležitá byla zejména kvantifikace míry shody mezi Taylorovým testem, simulacemi a experimenty.

Jakým způsobem bylo toto dosaženo?

Pro přesnější a objektivnější zadávání vstupních parametrů do simulace byly provedeny některé úpravy na zařízení Taylorova testu. Důraz byl kladen na oblast vývoje transportního zařízení (nosiče) zkušební vzorku, vývoje zařízení pro měření dopadové rychlosti vzorku, vývoje experimentální metody pro detekci průběhů napětíových vln na dopadišti a vývoje metody měření rázové síly zkušební vzorku na dopadiště. Byla provedena úprava zařízení umožňující zkoušet vzorky za vyšších teplot. V experimentální části Taylorova testu bylo využito obrazové analýzy. Pomocí CCD kamery a softwaru LUCIE byly sejmuty a vyhodnoceny tvary jednotlivě deformovaných zkušebních vzorků namáhaných za různých dopadových rychlostí. V osovém řezu jednotlivých vzorků bylo provedeno měření mikrotvrdosti s následným grafickým zpracováním v programu SURFER. Dále byly provedeny metalografické výbrusy osových řezů, leptání a snímání na světelném mikroskopu NEOPHOT 32 v místě deformace čel zkušebních vzorků. Pro podrobnější vyhodnocení struktury vzorků bylo provedeno snímání na rastrovacím a transmisním elektronovém mikroskopu PHILIPS.

Ke skutečně reprezentativním výsledkům výzkumu chování materiálů za vyšších rychlostí deformace nepostačuje provést několik simulací vysokorychlostního děje se zkusnými vstupními parametry, ale je zapotřebí uskutečnit mnoho experimentů za reálných podmínek zatěžování. Tyto podmínky, spolu se současným sledováním struktury materiálů, je nutno zohlednit při simulacích a návrhu materiálového modelu.

V rámci modelování Taylorova testu v simulačním softwaru LS DYNA 3D byl proveden základní rozbor použitých konstitutivních vztahů dle Johnson-Cooka a Zerilli-Armstronga s vyhodnocením závislosti jednotlivých koeficientů pro souhrnný popis vybraných ocelí. Rozbor jednotlivých koeficientů, které zahrnují fyzikální členy v rámci materiálového modelu, byl důležitý pro návrh reprezentativního materiálového modelu, tj. křivek přetvárných odporů a měrné přetvárné práce pro oceli TRISTAL a 12050.3.

Jakých konkrétních výsledků modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace bylo dosaženo?

Na základě výsledků porovnání simulace a experimentu lze předpokládat, že u oceli TRISTAL v rozmezí log. deformace průměru od  $\varphi=0,48$  do  $\varphi=0,50$  dochází ke změně exponentu zpevnění  $n$  (hardening exponent) a parametru citlivosti na rychlost deformace  $C$  (the sensitivity-to-strain-rate parameter).

Jak vyplývá z výsledků optimalizace, minimální průměrný rozdíl mezi simulací a experimentem byl zjištěn při hodnotě exponentu citlivosti na rychlost deformace  $m=0,72$  (sensitivity-to-strain-rate exponent)

Je patrné, že součinitel tření výrazně ovlivňuje výslednou konturu vzorku. Při vyšším součiniteli tření ( $f=0,3$ ) vzniká efekt tzv. „soudečkovitosti“ u čela dopadu. Tento efekt při klesajícím součiniteli tření nebyl tak výrazný. U nulového součinitele tření k efektu „soudečkovitosti“ nedošlo, patrný však byl efekt „trychtýřkování“, který více odpovídal skutečnosti a to nejen u znázorněného vzorku T14,

ale i vzorků, které byly zatěžovány nižšími dopadovými rychlostmi. Ze všech dosažených výsledků modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace vyplynulo, že experimentům blíže odpovídaly hodnoty nulového součinitele tření. Pro všechny ostatní simulace mechanického chování ocelí za vyšší rychlostí deformace byly použity modely, v kterých byl zadán součinitel tření  $f=0$ . Tento součinitel nejlépe odpovídal dosaženým experimentálním výsledkům. Ze simulací vyplynulo, že vysokorychlostní děj není výrazně ovlivňován třecími podmínkami na rozhraní čela vzorku a dopadiště.

Ke komplexnímu popisu vysokorychlostního děje může být použito jednoho typu rovnice, ale s různými parametry, a to zejména u oceli TRISTAL. Toto zjištění vedlo k myšlence hlubšího výzkumu zaměřeného především na strukturní změny.

Pokud připustíme, že se nám podařilo prokázat nedostatečnost sebelepší konstitutivní rovnice pro simulaci plastického chování kovu v širokém rozsahu rychlostí plastické deformace - v našem případě celého vzorku použitého pro Taylorův test - a rovněž vyloučíme jako příčinu konstitutivní rovnice, pak zbývá jediné vysvětlení - při určité rychlosti deformace dochází k něčemu, co konstitutivní rovnice nedokáže popsat (nepředvídá) a chceme-li dosáhnout shody experimentu a simulace, musíme změnit její konstanty. Změnit konstanty dané konstitutivní rovnice (pokud jsme zvolili některou, která má vztah k fyzikální realitě) a **ne** vyměnit rovnici. Dosavadní výsledky rovněž naznačují, že rychlost deformace, při které dojde ke změně "vysokorychlostního" na "nízkorychlostní" mechanismus plastické deformace je charakteristická pro danou ocel.

Uvedená zjištění jsou pozoruhodná z toho důvodu, že rovnice vycházejí z odlišných fyzikálních podkladů, tj. rovnice J-C popisuje závislost mezi deformací, rychlostí deformace a teploty, zatímco Z-A má souvislost se strukturou materiálu. Dobrá shoda mezi simulacemi a experimenty byla prokázána právě u takových parametrů rovnic, které v konečném důsledku popisují výše zobrazené křivky deformačních odporů.

Výzkumem bylo zjištěno, že Taylorův test se svým způsobem přibližuje namáhání součástí při výrobě objemovým tvářením za studena a je tedy ideálním prostředkem pro získání materiálových modelů za vyšších rychlostí deformace.

Jak již bylo v úvodu závěru řečeno nebyly oceli TRISTAL a uhlíková ocel 12050.3 vybrány náhodně, nýbrž byly účelově vybrány na základě současných trendů a požadavků výroby a výrobců součástí technologií objemového tvářením za studena. Z tohoto důvodu byly provedeny praktická měření na vybraných strojních součástech vyráběných z vybraných typů ocelí TRISTAL a 12050.3. Výsledky experimentu byly porovnány v silově-energetické oblasti se simulací v programu FORMFEM a s teoretickým výpočtem. Jako vstupní hodnoty do simulace byly použity právě získané výsledky materiálových modelů získané z modelování mechanického chování za vyšších rychlostí deformace, především z výsledků Taylorova testu. Křivky deformačních odporů nebyly zadány jen za různých rychlostí deformace, ale i za vyšších teplot. Jak ze simulace v programu FORMFEM vyplývá, rychlosti deformace dosahují při běžných technologických postupech objemového tvářením za studena hodnoty blízké se  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Simulace a praktické zkoušky byly provedeny pro postupový automat TPZD25. Mimo srovnání v silově-energetické oblasti byl porovnáván i průběh plastického toku materiálu.

### **Kde by se měl ubírat další vývoj modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace?**

Myslím, že by bylo přínosné na bázi aplikace Taylorova testu dále systematicky pokračovat v stanovování reprezentativních materiálových modelů u ostatních typů ocelí vybraných podle obecných výrobních trendů a požadavků výrobců součástí technologií objemového tvářením za studena.

Z takto získaných materiálových modelů dále vhodné pokračovat ve vytváření databází, které by byly přínosné nejen pro vědecké pracovníky, ale i technology a konstruktéry v průmyslové praxi.

V disertační práci jsem kromě shrnutí důležitých teoretických poznatků usiloval rovněž o poskytnutí praktických výsledků a závěrů modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace využitelných pro další rozvoj tohoto vědního oboru.

**Hlavní přínosy disertační práce v oblasti rozvoje vědního oboru jsem stručně shrnul do následujících bodů:**

-Komplexní metodika modelování mechanických vlastností ocelí podložená vědeckými analýzami fyzikálních parametrů.

-Kvantifikace míry shody mezi Taylorovým testem, simulacemi Taylorova testu a experimenty.

## **11 SUMMARY**

The dissertation was focused on modelling mechanical properties of steel at high strain rates. The main aim was to create a representative material model using a confidential constitutive equation, which includes the physical terms of the material model as a specific type of a continuum. Another aim of this work was to create a methodical complex which integrates effectively material models for simulation and technological applications with clearly described structure and heating conditions.

This was performed by means of an applied research of behaviour and modelling the mechanical properties of materials at high strain rates, using the standard tests. Two common types of steel – low carbon steel TRISTAL and carbon steel ČSN 41 2050 – which are especially used in cold forming technologies, were chosen for the research of the modelling methodics.

Both types of steel were heat-treated – spheroidised with strictly determined time and processing conditions. Their structure was registered before the heat-treatment and also after its realization. By using the spectrometer LECO, the specific chemistry of the steels was evaluated. After taking the useful information about the steels, the basic mechanical tests were performed – in both quasistatic and dynamic conditions. In quasistatic conditions, the tensile tests were realized, too, and the basic mechanical parameters - yield stress, yield strength, tensibility and the hardening exponent - were evaluated. Except all of this, the compress tests and evaluation of flow stress curves and effort curves were realized by using the CZR 600 testing machine. The quasistatic compress tests were carried at three different temperatures – a room temperature, 100°C and 200°C. In dynamic conditions, compress tests using Cam plastometer and Hopkinson pressure bar test were provided. Especially experimental results of Taylor Anvil Test with well-founded scientific analysis of physical parameters in constitutive equations, were used to create a comprehensive methodology of modelling the mechanical behaviour of steels at high strain rates.

Quantification of coincidence measure between Taylor Test, simulations and experiments was very important. As we have found out, something that the constitutive equation just can not describe is happening at a specific strain rate and we have to change its parameters, as far as we want to achieve the coincidence between experiments and simulations. Only a change of the equation is not effective, an essential task is to change the parameters.

We have discovered that Taylor Test with its fracture comes near practical loading of components in cold forming processes and therefore it's ideal for acquirement the material models of high strain rates deformation.

Main contributions of the dissertation work are:

- a creation of a comprehensive methodology of modelling the mechanical behaviour of steels at high strain rates

- quantification of coincidence measure between Taylor Test, simulations and experiments.

## 12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BLAŠČÍK F., POLÁK K.: Teória tvárnenia. Alfa, Bratislava, 1985.
- [2] ČABELKA J.: Mechanická technológia. Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava, 1967.
- [3] FOREJT M.: Teorie tváření. VUT Brno, 1992.
- [4] MIELNIK E. M.: Metalworking Science and Engineering. Mc Graw-Hill, Inc., New York, Hamburg, London, 1991, pp. 976.
- [5] LANGE K.: Cold and Warm Extrusion. Chap. 15, Umformtechnik, London, Paris, Tokyo, 1988.
- [6] LANGE K.: Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Band 2, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [7] FOREJT M.: Konstitutivní vztahy pro rychlosti deformace v technologiích tváření. 2. mezinárodní konference FORM 95, Brno, 1995, str. 77-82.
- [8] MEYERS M. A.: Dynamic Behaviour of Materials. A Wiley-Interscience Publication, New York, 1994.
- [9] GILLIS P. P., GROSS T. S.: Effect of Strain Rate on Flow Properties. Metals handbook, Ninth Edition, Volume 8 – Mechanical Testing. American Society for Metals, Ohio, 1985.
- [10] OSAKADA K.: Effects of Strain Rate and Temperature in Forming Processes of Metals. Journal de Physique III, Colloque C3, 1997, pp. 37-44.
- [11] SMALLMEN R.E.: Modern Physical Metallurgy. Butterworths London, 1962
- [12] ZERILLI F. J., ARMSTRONG R.W.: Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations, J. of Applied Physics 61 (5) 1987, pp. 1816-1825
- [13] ARMSTRONG R. W., ZERILLI F. J.: Dislocation Mechanics Based Analysis of Material Dynamics Behavior. Journal de Physique, Colloque C3, Supplément au n. 9, Tome 49, 1988, 529-534.
- [14] BUY F., FARRE J., KLEPACZKO J.R., TALABART G.: Evaluation of the Parameters of Constitutive Models for b.c.c. Metals Based on Thermal Activation. J. PHYS III, Colloque C3, 1997.
- [15] JOPEK M.: Vývoj komponentů potřebných k správnému posouzení Taylorova testu. Development of a new components needed to right appreciation of Taylor Anvil Test. In *Vědecko pedagogická konference ke 100. výročí FSI*. Poster a příspěvek ve sborníku prací doktorandů FSI VUT v Brně, prosinec 5.-6. 2000, s. 129-132. ISBN 80-214-1764-1.
- [16] JOPEK M., PERNICA Z., FOREJT M.: Chování materiálů za vyšších teplot a rychlostí deformace. In *Metody oceny struktury oraz własności materialów 2001*. Proceedings of the „XVI. Miedzynarodowe sympozjum“ at the Komorni Lhotka, December 11.-13., 2001. Volume 1. *Mechanika 2001 – Zeszyty naukowe Politechniki Opolskiej*, Nr. 279/2001, zeszyt 72, s. 85-88. ISSN 1429-6055.
- [17] FOREJT, M., BUCHAR J., JOPEK, M., BŘEZINA J., KREJČOVÁ, J., PERNICA, Z.: Mechanické vlastnosti vybraných ocelí za vyšších rychlostí deformace. Výsledky experimentálních zkoušek a simulací ocelí 12050.3, TRISTAL, 11320 5R a 14 220.3, sestavené do databáze materiálových modelů, uložené na webovských stránkách Odboru

technologie tváření kovů a plastů, Ústavu strojírenské technologie, FSI VUT v Brně. Vyrobeno v roce 2001 v rozsahu 30 stran.

- [18] JOPEK M.: Měření rychlosti dopadu vzorku u Taylorova testu. Speed measurement by Taylor test. In *FORM 2000*. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International conference presented by the TU Institut of Technology of Brno, September 19-20, 2000. Edited by Forejt Milan. Published by Brno University of Technology, printed by PC-DIR, Co. Ltd, Brno 2000, pp. 95-100. ISBN 80-214-1661-0.
- [19] Podniková norma TZ 002500 Třinecké železářny a.s.
- [20] ELFMARK J. A KOL.: Tváření kovů. SNTL, 1992, DT 621.77.
- [21] FOREJT M., JOPEK M., BUCHAR J.: Constitutive Equations for the Behaviour of BCC Steels at High Strain Rates. In *metal 2000 Ostrava*. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Metalurgical Conference, Symposium B presented by the TANGER s.r.o. and CSNMT, Ostrava, May, the 16-18<sup>th</sup> 2000. Published by TANGER Ostrava, pp. 214/1-214/6. CD ROM, ISBN 80-85988-48-8.
- [22] JOPEK M., FOREJT M., BUCHAR J.: Plastic deformation at real compression rates. In *METAL FORMING 2000*. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference presented by the Hgf TU Krakow, Poland, 3-7 September 2000. Ed. Pietrzyk at al. Published by Balkema, Rotterdam, 2000, pp. 729-732.
- [23] FOREJT M., BUCHAR J., JOPEK M.: High strain rates compression loading of BCC steels. In *CO-MAT-TECH 2000*. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International research conference, presented by the MTF STU Trnava, Slovakia, October 19.-20., 2000. Volume 1, edited by Milan Turňa. Published by STU Bratislava, 2000, pp. 45-50. ISBN 80-227-1413-5.
- [24] JOPEK M., FOREJT M.: Modelování mechanického chování uhlíkové oceli TRISTAL. In *JUNIORMAT '01*. Sborník mezinárodní konference vydán ČSNMT a ÚMI FSI VUT Brno, 19.-20. září 2001. Vydání 1. Tiskárna Cicero Ostrava, s. 176-177. ISBN 80 214-1885-0.
- [25] JOPEK M.: Modeling Mechanical Properties of Carbon Steels at High Strain Rates. In *3th International Conference of PhD Students*. Proceedings presented by the University of Miskolc, Hungary, August 13.-19. 2001. Volume 1. Printed by ENGINEERING SCIENCES, pp. 211-216. ISBN 963 661 480-6.
- [26] FOREJT M., KREJČÍ J., JOPEK M.: Optimalizace parametrů dynamických modelů tvářených materiálů. In *FORM 2002*. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International conference presented by the TU Institut of Technology of Brno, September 16.-18., 2002. Edited by Forejt Milan. Published by Brno University of Technology, printed by PC-DIR, Co. Ltd, Brno 2002, pp. 37-40. ISBN 80-214-2162-2.
- [27] FOREJT, M., BUCHAR, J. JOPEK, M., KREJČÍ, J.. Parametric numerical studies of the Taylor test. In *METAL 2002 Hradec nad Moravicí. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Metalurgical & Materials Conference, Symposium B*. 1<sup>st</sup> ed. Ostrava, TANGER, TU-VŠB and CSNMT, Ostrava, May 14 - 16 2002. Volume 1. p 80/1-80/7. CD ROM, ISBN 80-85988-73-9.

## 13 SEZNAM AUTOROVÝCH PUBLIKACÍ

- [1] FOREJT M., JOPEK M., BUCHAR J.: Plastické deformace při vysokých rychlostech deformace. Plastic deformation at high strain rates. in *TECHNOLÓGIA '99* Bratislava. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference presented by the STU Bratislava, September 8.-9. 1999. Volume 1. Printed by STU Bratislava 1999, pp. 286-289. ISBN 80-227-1255-8.

- [2] FOREJT M., JOPEK M., BUCCHAR J.: Constitutive Equations for the Behaviour of BCC Steels at High Strain Rates. In *metal 2000 Ostrava*. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Metalurgical Conference, Symposium B presented by the TANGER s.r.o. and CSNMT, Ostrava, May, the 16-18<sup>th</sup> 2000. Published by TANGER Ostrava, pp. 214/1-214/6. CD ROM, ISBN 80-85988-48-8.
- [3] JOPEK M., FOREJT M., BUCCHAR J.: Plastic deformation at real compression rates. In *METAL FORMING 2000*. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference presented by the Hgf TU Krakow, Poland, 3-7 September 2000. Ed. Pietrzyk at al. Published by Balkema, Rotterdam, 2000, pp. 729-732.
- [4] JOPEK M.: Měření rychlosti dopadu vzorku u Taylorova testu. Speed measurement by Taylor test. In *FORM 2000*. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International conference presented by the TU Institut of Technology of Brno, September 19-20, 2000. Edited by Forejt Milan. Published by Brno University of Technology, printed by PC-DIR, Co. Ltd, Brno 2000, pp. 95-100. ISBN 80-214-1661-0.
- [5] FOREJT M., JOPEK M., BUCCHAR J.: chování tvářené oceli při vysokých rychlostech deformace. Form 2000 – 5<sup>th</sup> International Conference "Forming Technology, Tools and Machines", Brno, str. 101-106.
- [6] FOREJT M., BUCCHAR J., JOPEK M.: High strain rates compression loading of BCC steels. In *CO-MAT-TECH 2000*. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International research conference, presented by the MTF STU Trnava, Slovakia, October 19.-20., 2000. Volume 1, edited by Milan Turňa. Published by STU Bratislava, 2000, pp. 45-50. ISBN 80-227-1413-5.
- [7] BUCCHAR J., FOREJT M., JOPEK M., KŘIVÁNEK I.: Evaluation of constitutive relations for high strain rate behaviour using the Taylor Test. Journal Phys. IV France 10, 2000, pp. Pr9-75-Pr9-80. ISSN.
- [8] JOPEK M., FOREJT M.: Vliv rychlosti deformace na strukturní změny uhlíkových ocelí. In *Metody oceny struktury oraz własności materialów i wyrobów 2000*. Proceedings of the „XV. Miedzynarodowe sympozjum“ at BTU FME Brno, December 6.-8., 2000. Volume 1. *Mechanika 2000 – Zeszyty naukowe Plitechniky Opolskiej*, Nr. 263, zeszyt 63, s. 193-197. ISSN 1429-6055.
- [9] JOPEK M.: Vývoj komponentů potřebných k správnému posouzení Taylorova testu. Development of a new components needed to right appreciation of Taylor Anvil Test. In *Vědecko pedagogická konference ke 100. výročí FSI*. Poster a příspěvek ve sborníku prací doktorandů FSI VUT v Brně, prosinec 5.-6. 2000, s. 129-132. ISBN 80-214-1764-1.
- [10] FOREJT M., JOPEK M., KREJČÍ J.: Effect of Deformation Changes on Microstructure of Forming Steels. In *METAL 2001 Ostrava*. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Metalurgical Conference, Symposium B presented by the TANGER, TU-VŠB and CSNMT, Ostrava, May 15.-17., 2000. Printed by TANGER Ostrava, pp. 21/1-21/6. CD ROM, ISBN 80-85988-56-9.
- [11] FOREJT M., JOPEK M., KREJČÍ J., KREJČOVÁ J.: Deformation of Steel for Forming Applications During Taylor Test in Dependence on Impact Velocity. In *TECHNOLÓGIA 2001 Bratislava*. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference presented by the STU Bratislava, September 11.-12, 2001. Volume 2. Printed by STU Bratislava, pp. 748-751. ISBN 80-227-1567-0.
- [12] JOPEK M., FOREJT M.: Modelování mechanického chování uhlíkové oceli TRISTAL. In *JUNIORMAT '01*. Sborník mezinárodní konference vydán ČSNMT a ÚMI FSI VUT Brno, 19.-20. září 2001. Vydání 1. Tiskárna Cicero Ostrava, s. 176-177. ISBN 80 214-1885-0.

- [13] PERNICA Z., JOPEK M., FOREJT M.: Zkoušení materiálu pomocí Hopkinsonova testu. In *JUNIORMAT '01*. Sborník mezinárodní konference vydán ČSNMT a ÚMI FSI VUT Brno, 19.-20. září 2001. Vydání 1. Tiskárna Cicero Ostrava, s. 127-128. ISBN 80 214-1885-0.
- [14] JOPEK M.: Modeling Mechanical Properties of Carbon Steels at High Strain Rates. In *3th International Conference of PhD Students*. Proceedings presented by the University of Miskolc, Hungary, August 13.-19. 2001. Volume 1. Printed by ENGINEERING SCIENCES, pp. 211-216. ISBN 963 661 480-6.
- [15] FOREJT M., KREJČÍ J., JOPEK M., BUCHAR J.: Relations between structure of material, strain rate and numerical simulations. In *CO-MAT-TECH 2001*. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International research conference, presented by the MTF STU Trnava, Slovakia, October 25.-26., 2001. Volume 1, printed by STU Bratislava, 2001, pp. 64-69. ISBN 80-227-1591-3.
- [16] JOPEK M., PERNICA Z., FOREJT M.: Chování materiálů za vyšších teplot a rychlostí deformace. In *Metody oceny struktury oraz własności materialów 2001*. Proceedings of the „XVI. Miedzynarodowe sympozjum“ at the Komorní Lhotka, December 11.-13., 2001. Volume 1. *Mechanika 2001 – Zeszyty naukowe Politechniki Opolskiej*, Nr. 279/2001, zeszyt 72, s. 85-88. ISSN 1429-6055.
- [17] FOREJT M., BUCHAR J., JOPEK M., BŘEZINA J., KREJČOVÁ J., PERNICA Z.: Mechanické vlastnosti vybraných ocelí za vyšších rychlostí deformace. Výsledky experimentálních zkoušek a simulací ocelí 12 050. 3, TRISTAL, 11 320 5R a 14 220.3, sestavené do databáze materiálových modelů, uložené na webových stránkách Odboru technologie tváření a plastů, Ústavu strojírenské technologie, FSI VUT v Brně. Vyrobeno v roce 2001 v rozsahu 30 stran.
- [18] FOREJT M., JOPEK M., ŘIHÁČEK V., POKORNÝ J.: Měření tvářecích sil na postupovém automatu TPZD 25. Interní zpráva, červen 2001.
- [19] FOREJT M., KREJČÍ J., JOPEK M.: Optimalizace parametrů dynamických modelů tvářených materiálů. In *FORM 2002*. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International conference presented by the TU Institut of Technology of Brno, September 16.-18., 2002. Edited by Forejt Milan. Published by Brno University of Technology, printed by PC-DIR, Co. Ltd, Brno 2002, pp. 37-40. ISBN 80-214-2162-2.
- [20] FOREJT, M., BUCHAR, J. JOPEK, M., KREJČÍ, J.. Parametric numerical studies of the Taylor test. In *METAL 2002 Hradec nad Moravicí. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Metallurgical & Materials Conference, Symposium B*. 1<sup>st</sup> ed. Ostrava, TANGER, TU-VŠB and CSNMT, Ostrava, May 14 - 16 2002. Volume 1. p 80/1-80/7. CD ROM, ISBN 80-85988-73-9.
- [21] FOREJT, M., KREJČÍ, J., JOPEK, M., BUCHAR, J, PERNICA, Z.: Dynamic models of formed materials. *Acta Mechanica Slovaca*. 2002, Ročník 6. Číslo 2, pp. 21-26. ISSN 1335-2393
- [22] FOREJT, M., BUCHAR J., JOPEK, M., BŘEZINA J., KREJČOVÁ, J., PERNICA, Z.: Mechanické vlastnosti vybraných ocelí za vyšších rychlostí deformace. Výsledky experimentálních zkoušek a simulací ocelí 12050.3, TRISTAL, 11320 5R a 14 220.3, sestavené do databáze materiálových modelů, uložené na webovských stránkách Odboru technologie tváření kovů a plastů, Ústavu strojírenské technologie, FSI VUT v Brně. Vyrobeno v roce 2001 v rozsahu 30 stran.
- [23] FOREJT, M., JOPEK, M., ŘIHÁČEK, V., POKORNÝ, J.: Měření tvářecích sil na postupovém automatu TPZD 25. Interní zpráva, červen 2001.

## 14 AUTOROVO CURRICULUM VITAE

Jméno: Ing. Miroslav Jopek

Datum narození: 10.8.1975 ve Frýdku – Místku, okr. Frýdek – Místek

Trvalý pobyt: Sadová 339/27, 679 04 Adamov

Rodinný stav: ženatý

Národnost: česká

E-mail: Jomi@post.cz



### Přehled dosaženého vzdělání:

1989–1993 SPŠ strojní ve Frýdku- Místku

1993-1998 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Odbor tváření

1998-2001 Interní postgraduální studium

### Absolvovaná praxe:

1994–2001 Každoroční dvouměsíční praxe v R+B Filter GmbH, Langenbrettach, Německo

1998 Šmeral Brno a.s., konstruktér

2001 Týdenní stáž European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Ispra, Itálie

2001-2002 Základní vojenská služba, Prostějov

2002- Šmeral Brno a.s., vedoucí konstruktér

### Pracovní aktivity:

- v rámci Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy ČR školení v programu AutoCAD.
- Výzkumný záměr ÚST FSI VUT Brno CEZ, Rozvoj progresivních vysoce přesných technologií.
- Grantový projekt Grantové agentury České republiky, GAČR 101/ 99/ 0373- Modelování mechanického chování ocelí při reálných podmínkách tváření
- Grantový projekt FSI VUT Brno: FP 310041- Vývoj zkoušení materiálů za vyšších teplot a rychlostí deformace

### Jazykové znalosti:

anglický jazyk, německý jazyk

### Další:

PC gramotnost: Windows, Office, internet, CAD (AutoCAD, VariCAD). Simulační softwary: FORMFEM, FORM2D, LS DYNA 3D.

Řidičský průkaz skupiny A/50, B, BE, C, CE.