



CHARPY V-NOTCH IMPACT TEST: MODELLING AND EXPERIMENT

Lísek Michal & Kozák Vladislav *

***Summary:** This paper describes dynamic modelling of V-notch Charpy specimen during pendulum impact test using the explicit program LS-Dyna. Manganese cast steel considered for storage and transport container for spent nuclear fuel (ŠKODA) was selected as an experimental material. The elastoplastic behaviour was described by Johnson-Cook model and compared with experiments.*

1. Úvod

Instrumentovaná rázová zkouška rázem v ohybu Charpyho tělesa je jednou z důležitých experimentálních metod pro určování základních materiálových charakteristik. Měření závislosti síla-čas umožňuje mimo jiné zjistit nárazovou práci, výpočet dynamické meze kluzu a kritického lomového napětí či při použití těles s trhlinou dynamickou lomovou houževnatost a dynamické R-křivky. V současné době pro provádění této zkoušky platí následující normy: EN ISO 14556: 1999 Steel-Charpy V-Notch Pendulum Impact Test, ESIS Draft 10 September 1999, Draft 9, March 2000. Detailnější informace lze nalézt v [1]. Otázkou však zůstává určení polí napětí a deformace v okamžiku porušení materiálu. Proto je nezbytné vytvořením numerických modelů chování Charpyho tělesa a jeho následné ověření experimentálními zkouškami. To pak umožní lépe poznat a pochopit chování materiálu při mezních stavech. Cílem tohoto příspěvku je zdůraznit význam zkoušek na instrumentovaném kyvadlovém kladivu a nastínit problémy, vznikající při numerickém modelování této zkoušky.

2. EXPERIMENTÁLNÍ DATA

Pro studium byla použita litá manganová ocel o následujícím složení: (hm %): 0,09C, 1,18Mn, 0,37Si, 0,01P, 0,025S, 0,12Cr, 0,29Ni, 0,29Cu, 0,03Mo a 0,028Al. Základní charakteristiky nezbytné pro následující modelování jsou uvedeny v Tab.1 a na Obr.1. Experimentální zkoušky na instrumentovaném kladivu byly provedeny dle normy ISO 14556 Steel-Charpy V-Notch Pendulum Impact Test v teplotním rozsahu od -100°C až do pokojové teploty. Za stejných podmínek byly provedeny numerická simulace. Z průběhu zkoušky byly získány informace o chování materiálu, hodnota absorbované energie, záznam síla - čas, síla - přemístění. Tyto údaje byly použity pro srovnání experimentu a numerické simulace.

Presentovaná analýza probíhala pro zvolenou teplotu, u které se předpokládá porušení na základě maximálního hlavního napětí σ_1 , tj. v oblasti malých plastických deformací (SSY-small scale yielding). Tento předpoklad vycházel z experimentálního záznamu F-t. Numerická simulaci Charpyho zkoušky pak byla provedena pro teplotu -70°C a porovnána s výsledky experimentu.

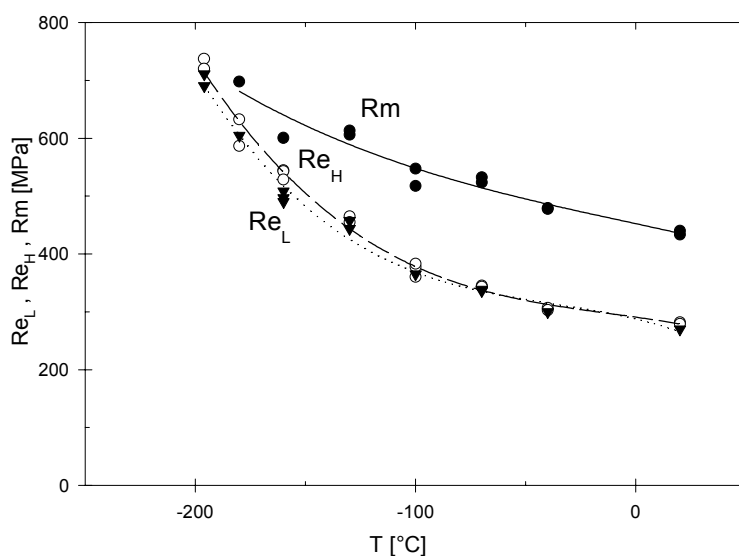
* Ing. Michal Lísek, ÚFM AV ČR Brno, Žižkova 22, michal.lisek@post.cz, Ing. Vladislav Kozák, CSc., ÚFM AV ČR Brno, Žižkova 22, kozak@ipm.cz.

Celkový počet experimentálních zkoušek pro teplotu -70°C byl 13, z toho 8 bylo standardně vyhodnoceno podle normy uvedené výše. Zbývajících 5 zkoušek nebylo zahrnuto pro srovnávání s numerickým modelem. Výsledky zpracování jsou prezentovány v Tab.1.

Tabulka 1: Základní charakteristiky určené z dynamické rázové zkoušky

	F_{gy} střední	U_{gy} střední	W_{gy} střední	U_{max} -střední	W_{max} -střední
	[KN]	[mm]	[J]	[mm]	[J]
Střední hodnota	13,53	0,465	4,02	1,347	11,91

Z experimentu bylo zjištěno, že pro testovaný materiál při teplotě -70°C je celkový čas celé expozice $t = 0,00010\text{--}0,00013$ s. V numerické simulaci tohoto experimentu však není modelovaná finální část. (V okamžiku psaní tohoto příspěvku jsou testovány různé typy poškození).



Obr.1: Teplotní závislost statické meze kluzu a meze pevnosti

3. NUMERICKÁ SIMULACE CHARPYHO ZKOUŠKY

Pro řešení numerické simulace byl použit program LS-Dyna, přičemž geometrii a síť byla generována programem Ansys. LS-Dyna - explicitní řešič, pro řešení dynamických problémů používá Metodu centrálních diferencí (MCD). Ta vytvoří soustavu rovnic a v rámci integrace časového kroku řeší jednotlivé rovnice postupně za sebou. Délka konvergence se odvíjí od velikosti časového kroku a velikosti elementu. Pro krátké děje je tato metoda velmi výhodná.

V současné době využíváme tento přístup při řešení rychlých dynamických dějů. LS-Dyna v sobě zahrnuje velkou databázi materiálových parametrů a pro uvedené řešení byl použit model materiálu Johnson – Cook. Ten zachycuje změnu chování materiálu závislou na rychlosti deformace a na teplotě.

Geometrický model

Při vytváření geometrického modelu byly vstupní podmínky velmi dobře známy. Geometrie tělesa a podpor jsou dány normou ISO 14556, dále pak zatížení je dáno rázovou energií a rychlostí kladiva pro daný typ zkoušky a ta je přesně určena. V našem případě je rázová energie rovna 300 J a to odpovídá

rychlosti 5 m.s^{-1} . Jelikož v modelu bylo využito dvojnásobné symetrie těles, pak MKP model je tvořen 7726 elementy a 9602 uzly.

Johnson-Cook

Tento model popisuje elastoplastické chování materiálu závislé na rychlosti deformace. První člen rovnice (1) popisuje závislost meze kluzu na plastickém přetvoření, A-mez kluzu, B-směrnice zpevnění, n-koeficient zpevnění.

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \epsilon^p / \epsilon_0) \cdot (1 - T^m) \quad (1)$$

Druhý člen popisuje závislost meze kluzu na rychlosti plastického přetvoření, ϵ^p -efektivní plastické deformace, ϵ_0 -deformace při $\epsilon_0 = 1 \text{ s}^{-1}$, C-směrnice udávající zpevnění v rozsahu $\epsilon_0 = 1 - 1.10^5 \text{ s}^{-1}$. Třetí člen popisuje závislost meze kluzu na teplotě materiálu, m-koeficient materiálové závislosti na teplotě, homologovaná teplota $T = (t - T_r) / (T_m - T_r)$ kde T_r -je teplota zkoušky, T_m -teplota tání daného kovu. Další vstupní parametry pro tento model jsou modul pružnosti ve smyku a specifické teplo.

Příprava vstupních dat

Jak vyplývá z rovnice (1), pro model Johnson–Cook je nezbytné získat experimentálně provedenou dynamickou tahovou zkoušku při rychlosti deformace $\epsilon_0 = 1 \text{ s}^{-1}$. Protože tyto údaje nebyly známy, byl proveden přepočítat dat ze statické tahové zkoušky. Pro náš případ byly tyto hodnoty zjištěny pomocí empirických vztahů podle predikce vlivu teploty na rychlosti a zatěžování na mez kluzu [4]. Tento přepočítat byl již několikrát úspěšně použit a vypočtená data odpovídají předpokládanému chování materiálu.

Vztah pro určení meze kluzu:

$$R_e(t, \epsilon^*) = R_e(20^\circ\text{C}, 10^{-3} \text{ s}^{-1}) - \sigma + A \exp [-(t+273) \cdot (B_1 - B_2 \cdot \ln \epsilon^*)] \quad (2)$$

Kde A, B₁, B₂, σ jsou konstanty a jsou funkcí parametru $(R_e + R_m)/2$. Pro výpočet meze kluzu v závislosti na rychlosti zatěžování byly použity následující hodnoty:

A = 1348,5 MPa B₁ = 83,1145.10⁻⁴ B₂ = 3,788.10⁻⁴ σ = 55,5 MPa
Hodnota $R_e(20^\circ\text{C}, 10^{-3} \text{ s}^{-1}) = 261 \text{ MPa}$, záznam statické tahové zkoušky je na Obr.2.

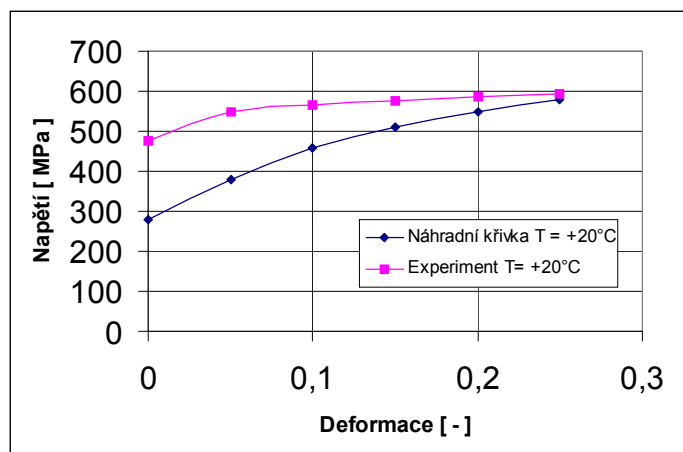
Námi vypočtená a aproximovaná data pro model Johnson - Cook model vypadají takto:

A = 475 MPa B = 180 MPa A = 0,3 C = 0,0458
T_m = 200 °K T_r = 1600 °K m=1

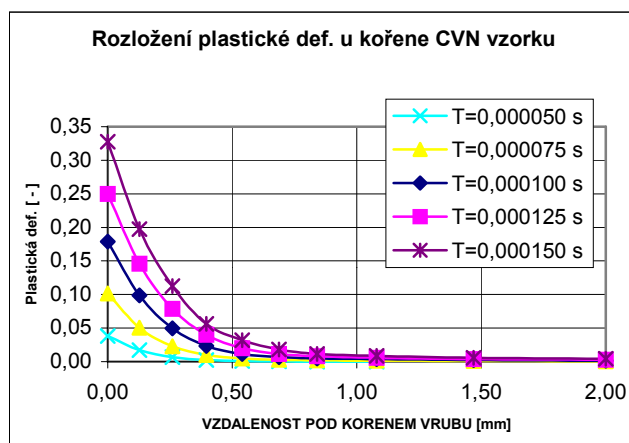
Hodnota $R_e(20^\circ\text{C}, 1 \text{ s}^{-1}) = 475 \text{ MPa}$, odhadnutá dynamická tahová zkouška je na Obr.2.

4. IMPLEMENTACE DAT A ŘEŠENÍ

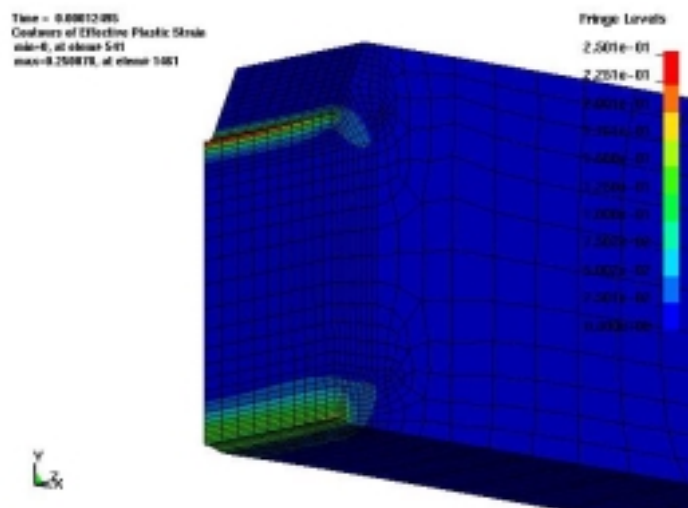
Po implementaci vstupních dat jsme získali řešení numerické simulace průběhu zkoušky. Výsledky byly podrobeny pečlivému porovnání s experimentálními výsledky. Zaznamenali jsme rozložení plastické deformace u kořeně CVN vzorku v závislosti na čase Obr.3. Na Obr.4 je zobrazeno rozložení plastické deformace na modelu v různých časových okamžicích. Záznam napětí σ_1 pod kořenem vrubu v různých časových okamžicích je na Obr.5. Na Obr.6 je záznam normovaného hlavního napětí a plastické deformace, výsledky potvrzují oprávněnost použití teorie malých plastických deformací a možnost následného křehkého porušení. Rozložení hlavního napětí σ_1 na modelu je na Obr.7.



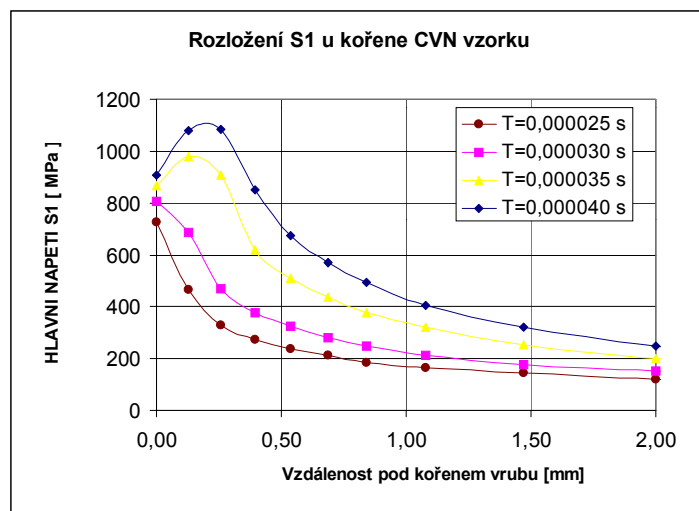
Obr.2: Závislost σ - ϵ pro -70°C , experiment a implementovaná náhradní křivka.



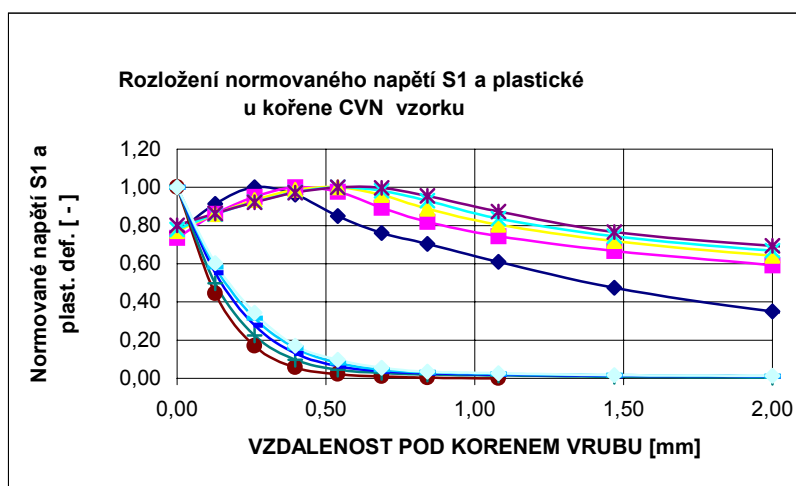
Obr.3: Rozložení plastické deformace před čelem vrubu.



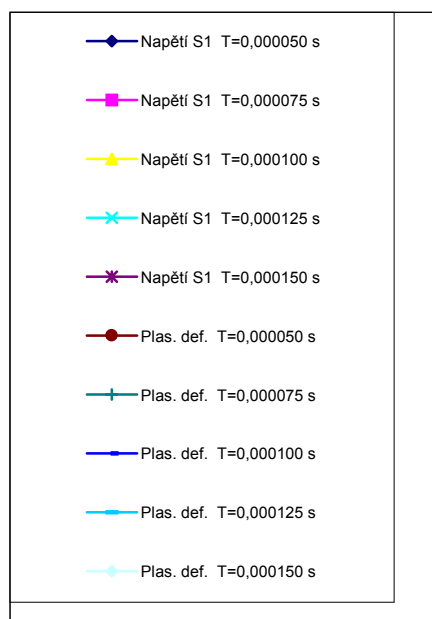
Obr.4: Rozložení plastické deformace na modelu v $t=0,000125$ s.

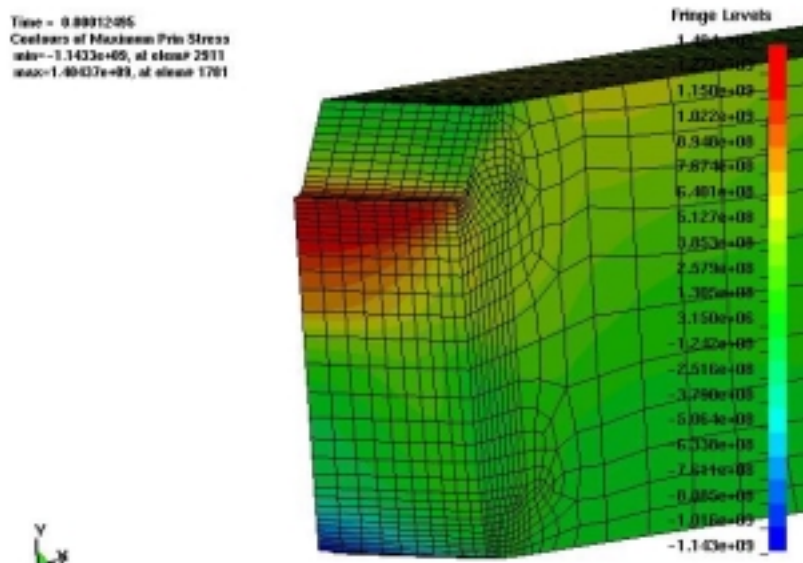


Obr.5: Rozložení hlavního napětí před kořenem vrubu.

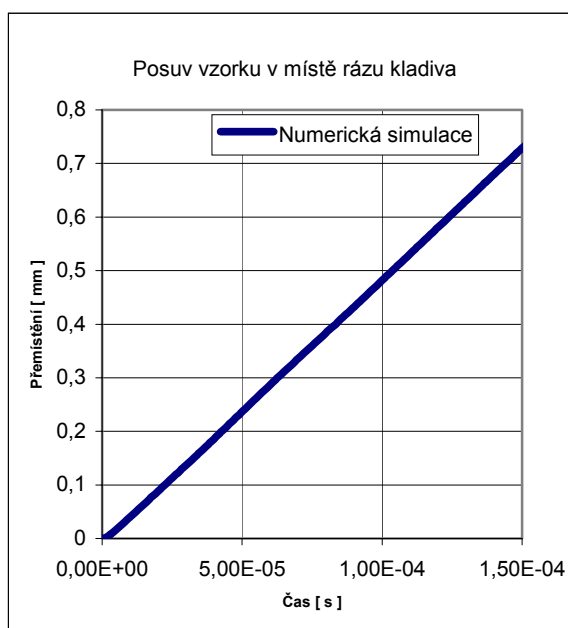


Obr.6: Závislost normovaného hlavního napětí a plastické deformace.

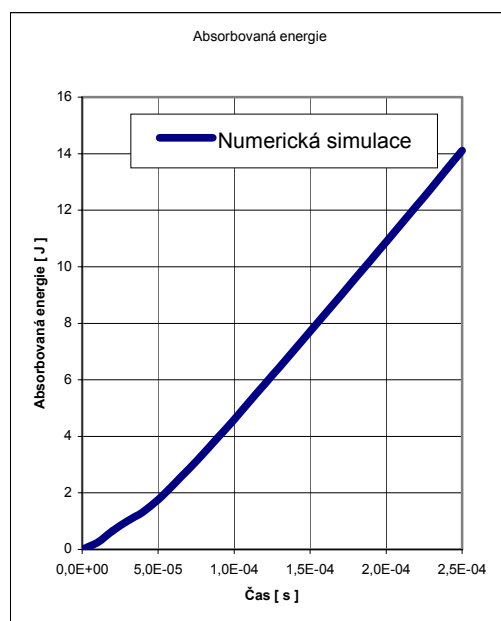




Obr.7 : Rozložení hlavního napětí v t=0,000125 s.



Obr.8: Závislost přemístění - čas.



Obr.9 Závislost energie - čas.

5. VYHODNOCOVÁNÍ DYNAMICKÉ MEZE KLUZU A KRITICKÉHO LOMOVÉHO NAPĚTÍ

Z hodnoty F_{gy} lze určit dynamickou mez kluzu a kritické lomového napětí pro příslušnou rychlost deformace.

$$F_{gy} = c \cdot R_e^d \quad \text{případně } c \cdot (R_e)^d. \quad (3)$$

Kde c je konstanta, která u oceli nízké a střední pevnosti má hodnotu $c=21 \pm 1 \text{ mm}^2$. Vztah byl odvozen na základě experimentu [2].

Kritické lomové napětí σ_{FC} : je definováno jako lokální špička největšího hlavního napětí $\sigma_1^{\max}$ v malé plastické zóně před kořenem vrubu v okamžiku iniciace náhlého nestabilního lomu. Parametr σ_{FC} je funkcí mikrostruktury oceli a udává její okamžitou odolnost proti iniciaci štěpným lomem. Bylo prokázáno, že hodnota σ_{FC} pro nízkouhlikové a nízkolegované oceli nezávisí na teplotě a rychlosti zatěžování. Hodnotu kritického lomového napětí lze určit ze síly při teplotě křehkosti t_{Bv} ($F_{gy}=F_m$), platí zde závislost

$$\sigma_{FC} = K_{\sigma} \cdot R_e^d, \quad (4)$$

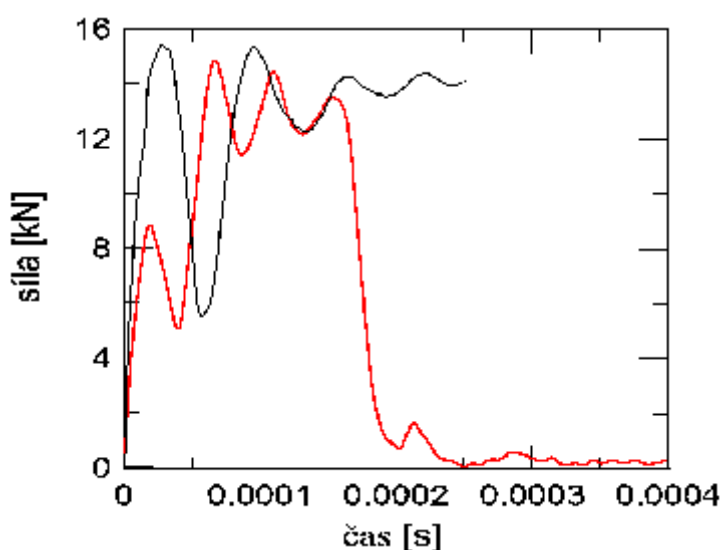
kde K_{σ} je plastický součinitel koncentrace napětí v plastické zóně a je funkcí zátěžné síly a pro F_{gy} má hodnotu 2,2. Kritické lomové napětí σ_{FC} spolu s teplotní závislostí dynamické meze kluzu v podstatě určují polohu tranzitní křivky KV na ose teplot.

Tabulka 2: Porovnání experimentálních dat s výsledky získanými na základě numerické simulace experimentu

	Experiment	Num. Simulace. $t = 0,000100$	Num. Simulace. $t = 0,000125$	Num. Simulace. $t = 0,000150$
F_{gy} střední	13,53 kN	15 kN	12,6 kN	13,35 kN
R_e^d	644 MPa	714 MPa	600 MPa	635 MPa
σ_{FC}	1417 MPa	1571 MPa	1320 MPa	1397 MPa
U_{gy} střední	0,465 mm	0,481 mm	0,605 mm	0,728 mm
W_{gy} střední	4,02 J	4,6 J	5,8 J	7,68 J

6. ZÁVĚR

Měření závislosti síla na čas nám umožňuje zjistit absorbovanou energii v průběhu rázu pro různé časové okamžiky a následné zjištění mat. charakteristik F_{gy} , σ_{CF} atd. Příklad srovnání záznamu závislosti síly na čase experimentu a numerické simulace je na Obr.10. Vyhodnocované místo je v místě kontaktu vzorku a kladiva.



Obr.10: Porovnání závislosti síla – čas. (Červenou je označen typický průběh experimentální závislosti).

7. PODĚKOVÁNÍ

Práce byla provedena v rámci projektu 101/00/0170 Grantové Agentury České republiky.

8. LITERATURA

1. Holzmann, M., Dlouhý, I.: Použití instrumentovaného kyvadlového kladiva pro hodnocení houževnatosti a tranzitního chování ocelí, Zváranie 49, č. 11-12, (2000), s. 256.
2. Holzmann, M. - Vlach, B. - Man, J.: The influence of loading rate on the ductile –brittle transition and cleavage fracture stress of 2,25 Cr – 1 Mo steel. In ECF 6, Fracture control of engineering structures, Vol. II, s.1705, Warley, West Midlands, U.K., EMAS, 1986.
3. Server, W. L.: Transaction ASME, J. Eng. Mater. Technology, 1978, s. 183.
4. Holzmann, M. - Vlach, B. - Man, J.: Predikce vlivu teploty a rychlost zatěžování na mezi kluzu konstrukčních oceli, Kovové Materiály, 6, 1986, str. 654.
5. Manuály LS-Dyna.