

PARAMETRIC STUDY OF THE SMALL PUNCH TEST

L. Iván*, P. Dymáček*

Summary: *The mechanical testing and numerical modeling of the small punch test on miniature disks from heat resistant steel type ČSN 41 5313 were performed. Current intensive methodical and application analysis of the possibilities of these tests is aimed mainly on relation between their results and conventional test results on massive specimens. One of the ways is empirical deduction of these relations another one is the numerical modeling. Finite element method offers good tool for creation of parametric model capable to simulate the process during the test and study the influence of geometrical and material characteristics on the test results. The system OPTISLANG were used for sensitivity studies and optimization of input parameters with the aim of achieve good agreement between numerical and experimental results.*

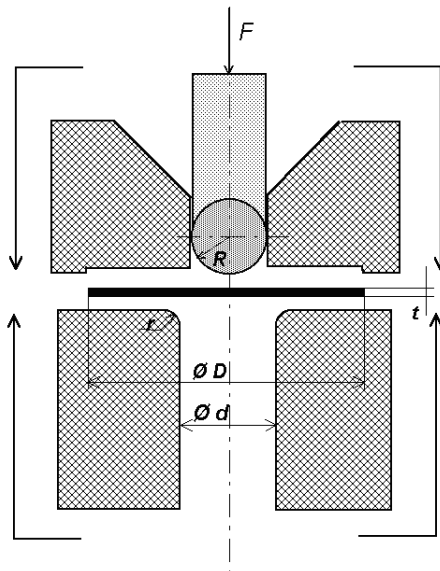
1. Úvod

Protlačovací zkoušky na miniaturních discích (SPT – small punch test) připravených z polotovárů odebíraných přímo z provozovaných částí lze zařadit mezi metody nedestruktivního typu. Pro oblast energetiky a tepelných zařízení se jako velmi perspektivní jeví dva typy těchto zkoušek. Prvním typem je zkouška, při které razník penetruje přes miniaturní vzorek (disk) konstantní rychlostí deflexe (tj. centrální průhyb disku) a určuje se závislost deflexe vs. síla. Zkouška je jistou analogií konvenční tahové zkoušky a označujeme ji v dalším jako zkoušku SPT-CDR (constant deflection rate). Druhým typem je pak jistá analogie creepové zkoušky, tedy zkouška, při které razník penetruje za působení konstantní síly a určuje se časový průběh deflexe. Zkoušku v dalším označujeme jako SPT-CF (constant force). Oba typy zkoušek jsou vedeny až do protržení disku a jako razník se často používá keramická kulička. Zkoušky se provádějí zejména za zvýšených teplot a jako nutná se jeví i možnost provádět je v ochranné atmosféře. Schéma protlačovacího zařízení pro oba typy takovýchto zkoušek je na obrázku 1 (Dymáček, 2006).

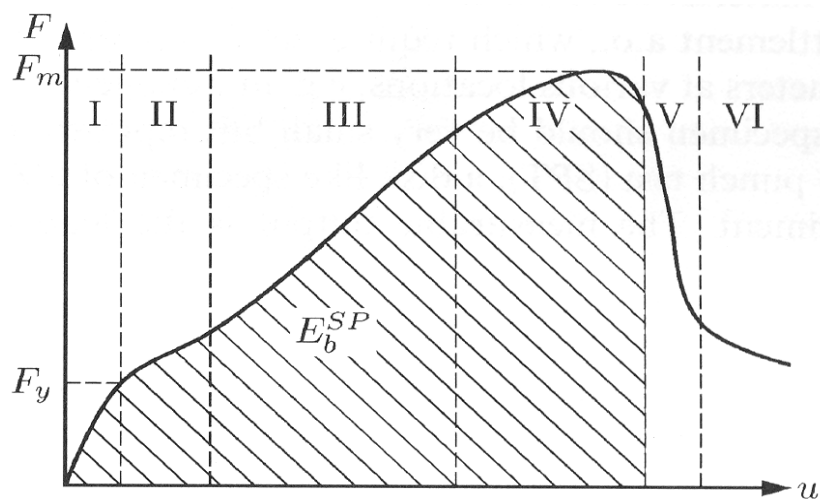
Na obrázku 2 je znázorněna typická závislost zatížení vs. deformace pro tažné kovové materiály. Ta může být rozdělena na několik základních částí (Dymáček, 2006). Část I je definována zejména elastickými vlastnostmi materiálu, část II představuje přechod mezi elastickým a plastickým chováním materiálu, část III představuje oblast, kdy dochází k deformačnímu zpevnění materiálu, v části IV dochází ke geometrickému změkčení a rozvoji poškození, v části V dojde k protržení vzorku a část VI představuje zbytkovou sílu nutnou na protlačení kuličky již protrženým vzorkem.

* Ing. László Iván, PhD.: Sysfem s.r.o; Škrochova 42; 615 00 Brno; e-mail: livan@sysfem.cz

* Ing. Petr Dymáček, PhD.: Ústav fyziky materiálů Akademie věd České republiky, Žižkova 22.; 616 62 Brno; e-mail: pdymacek@ipm.cz



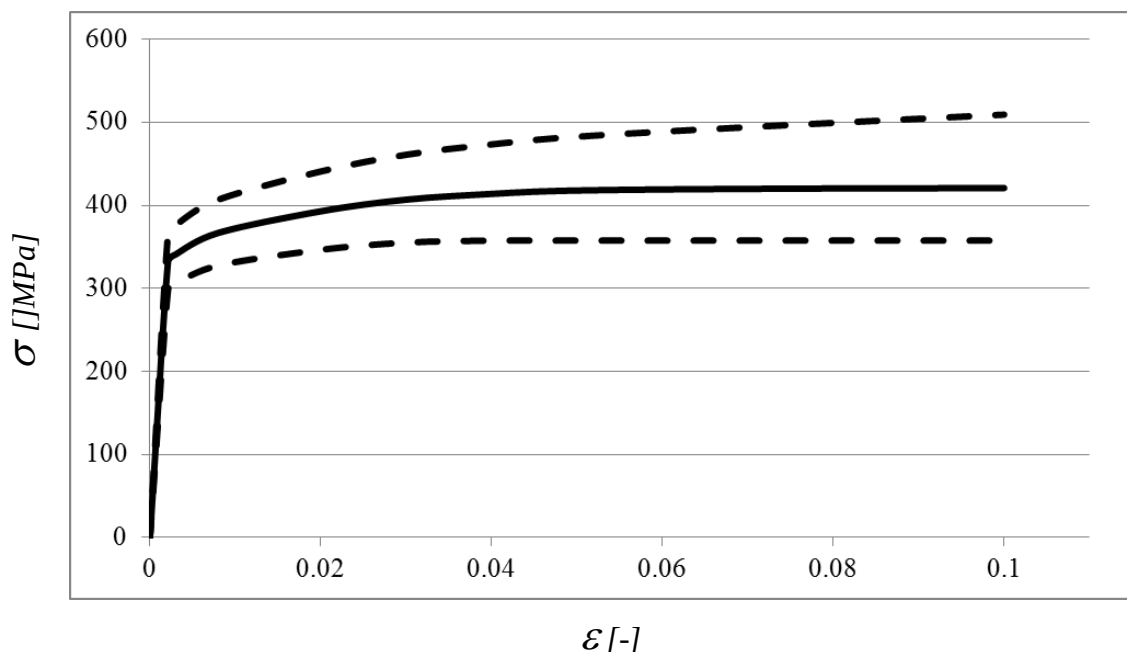
Obrázek1 Schéma zkoušky SPT



Obrázek2 Typická závislost zatížení-deformace SPT

2. Použitý materiál

Materiál zkoumaný v rámci tohoto projektu je žárupevná nízkolegovaná ocel 15 313, která je v České republice hojně používána v energetickém strojírenství. Tepelné zpracování bylo provedeno normalizačním žháním (940 °C/45 min) a následným popouštěním (680 °C/2 h). Materiálové charakteristiky byly stanoveny na základě tahových zkoušek šesti hladkých vzorků za teploty 600 °C s následným statistickým vyhodnocením. Tahová křivka σ - ε je znázorněna na obrázku 3. Elasticko-plastická materiálová křivka během výpočtu byla parametricky definovaná a optimalizační algoritmus vybíral křivku pro simulaci v toleranční oblasti $\pm 10\%$ od nominální křivky. Tato oblast je vyznačen na obrázku čárkovaně. K parametrizaci materiálové křivky byly použity 2 parametry. Jeden z parametrů ovlivňoval celkovou hladinu napětí (výšku) při daném přetvoření, druhý parametr ovlivňoval sklon křivky.



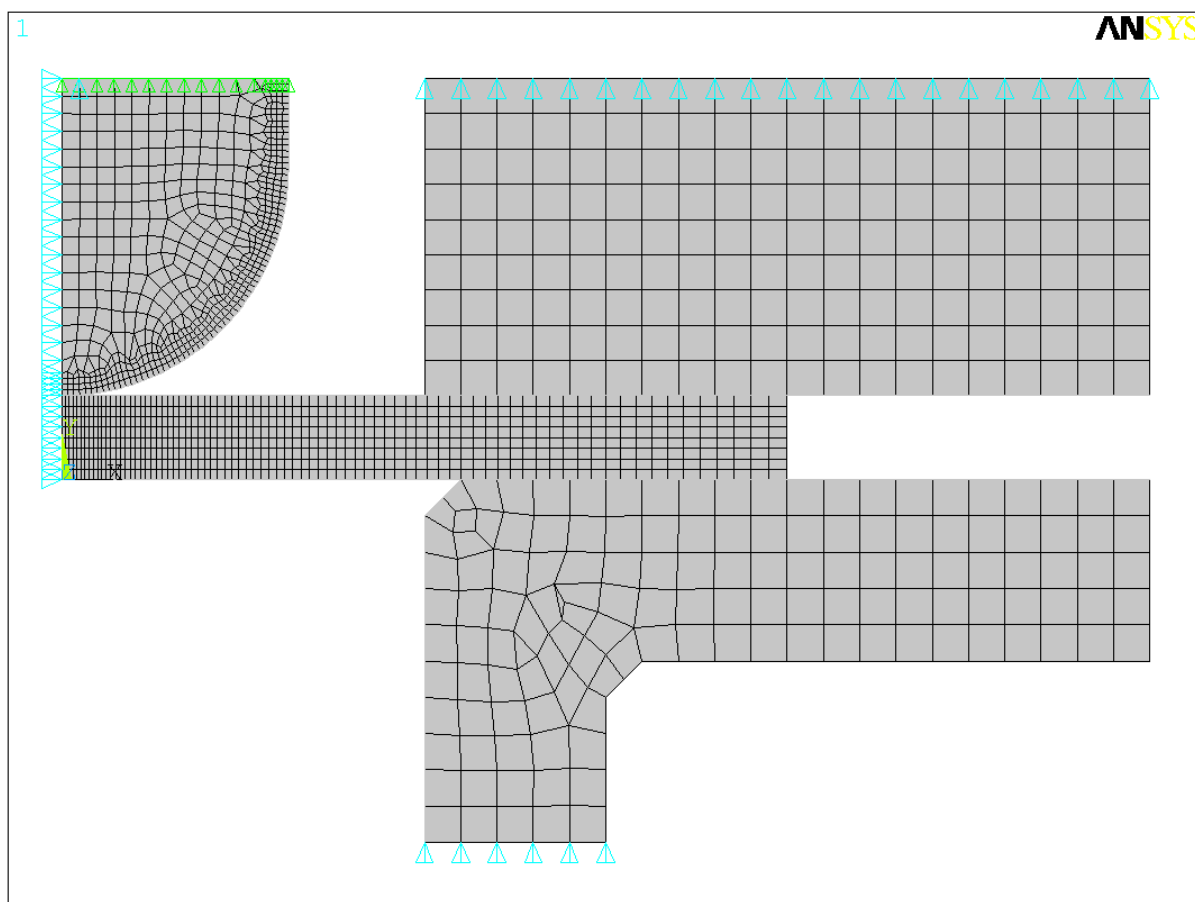
Obrázek3 Tahová křivka $\sigma - \varepsilon$ použitá pro numerický výpočet s vyznačenou oblastí $\pm 10\%$ pro optimalizační výpočet.

3. Parametrický numerický model

Numerický model protlačovací zkoušky byl vytvořen v programovém systému ANSYS za použití axisymetrických prvků PLANE182. Pro modelování kontaktních ploch byly použity prvky CONTA171 a TARGE169. Model na obrázku 4 byl vytvořen parametricky, což znamená, že jeho rozměry či materiálové charakteristiky bylo možné snadno modifikovat změnou jednoho či více parametrů. Pro optimalizační výpočet byly zvoleny tyto 2 parametry: tloušťka protlačovaného vzorku a koeficient tření mezi vzorkem a keramickou kuličkou. Nominální hodnota tloušťky byla 0,5mm a toleranční meze byly 0,45mm až 0,55mm. Koeficient tření mezi vzorkem a keramickou kuličkou byl definován v rozmezí 0,05 až 0,5. Zatížení bylo aplikováno deformačně na čelo tlačného trnu, který je zakončen kuličkou. Řešení úlohy bylo provedeno v rozsahu posunutí kuličky od 0 do 2 mm, toto posunutí přibližně odpovídá prvním čtyřem oblastem z charakteristiky zatížení-deformace.

Numerické výpočty byly řízeny pomocí řídicího textového souboru napsaného v jazyce APDL (Ansys Parametric Design Language). Na základě vstupních parametrů a řídicího souboru sestavil program ANSYS konečnoprvkový model, provedl numerickou analýzu a vyhodnotil závislost zatížení-deformace. V programovém systému Optislang byly nadefinovány vstupní i výstupní parametry výpočtu s příslušnými mezemi pro jednotlivé vstupní parametry (2 materiálové parametry, tloušťka vzorku, koeficient tření). Optimalizační výpočet byl následně řízen programem Optislang, který opakovaně volal a řídil výpočet v systému ANSYS a přitom cíleně měnil hodnoty vstupních parametrů tak, aby bylo dosaženo nejlepší shody mezi výpočtem a experimentem. Cílová funkce byla definovaná takto: minimalizovat rozdíl mezi naměřenou a vypočtenou závislostí „zatížení-deformace“. Vzhledem k tomu, že analýza je vysoce nelineární a bylo předem jasné, že pro určitou konfiguraci vstupních parametrů analýza nemusí konvergovat, byl jako optimalizační algoritmus vybrán evoluční algoritmus. A to proto, že evolučnímu optimalizačnímu

algoritmu nevadí (na rozdíl například od gradientního algoritmu), když nedostane výsledky pro některé kombinace vstupních parametrů. Tento algoritmus si jednoduše řeceno počká na další výsledky.

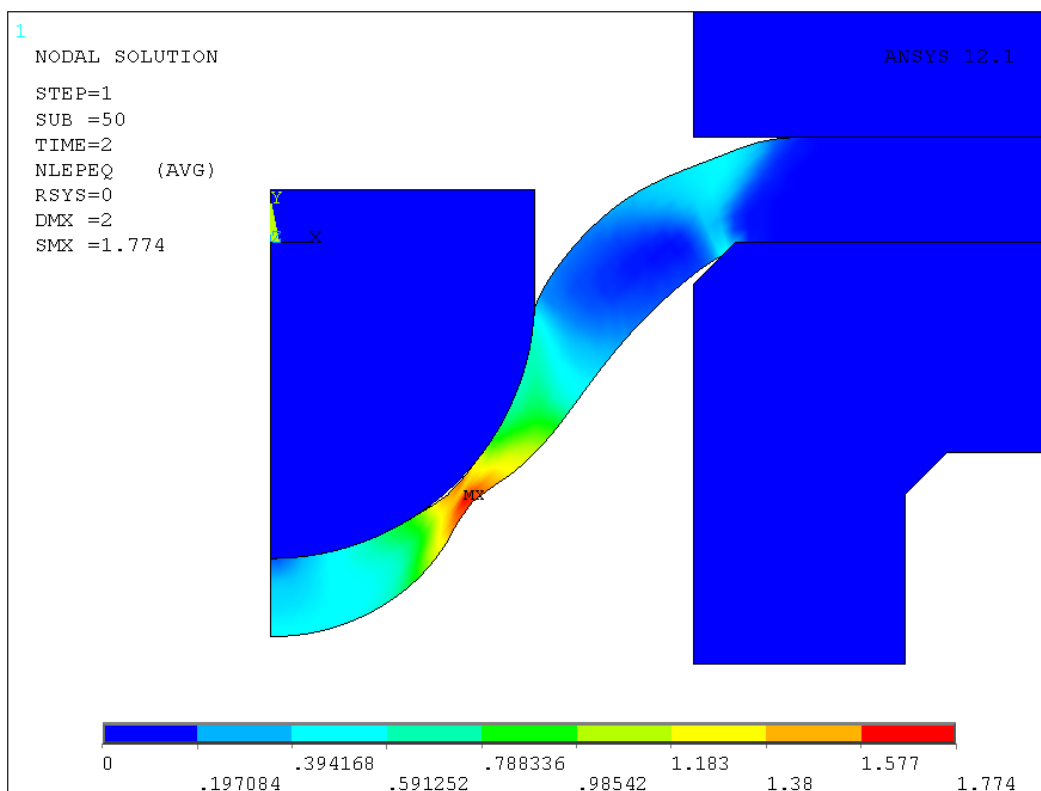


Obrázek4 Konečnoprvkový model protlačovací zkoušky.

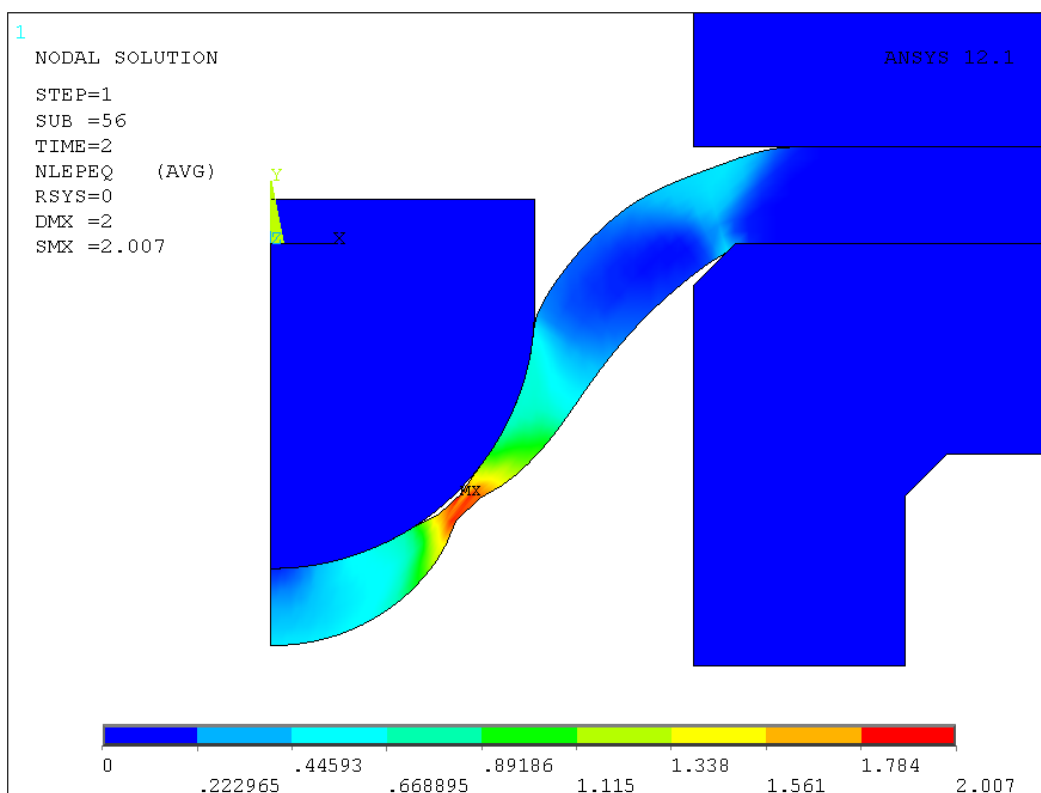
4. Výsledky

V dnešní době převážná většina výpočtových analýz pracuje s nominálními hodnotami vstupních parametrů geometrie, materiálových vlastností i okrajových podmínek a zatížení. Na obrázku 5 a 6 jsou znázorněna kumulativní plastická přetvoření ve vzorku při protlačení 2mm pro nominální a optimalizovanou variantu.

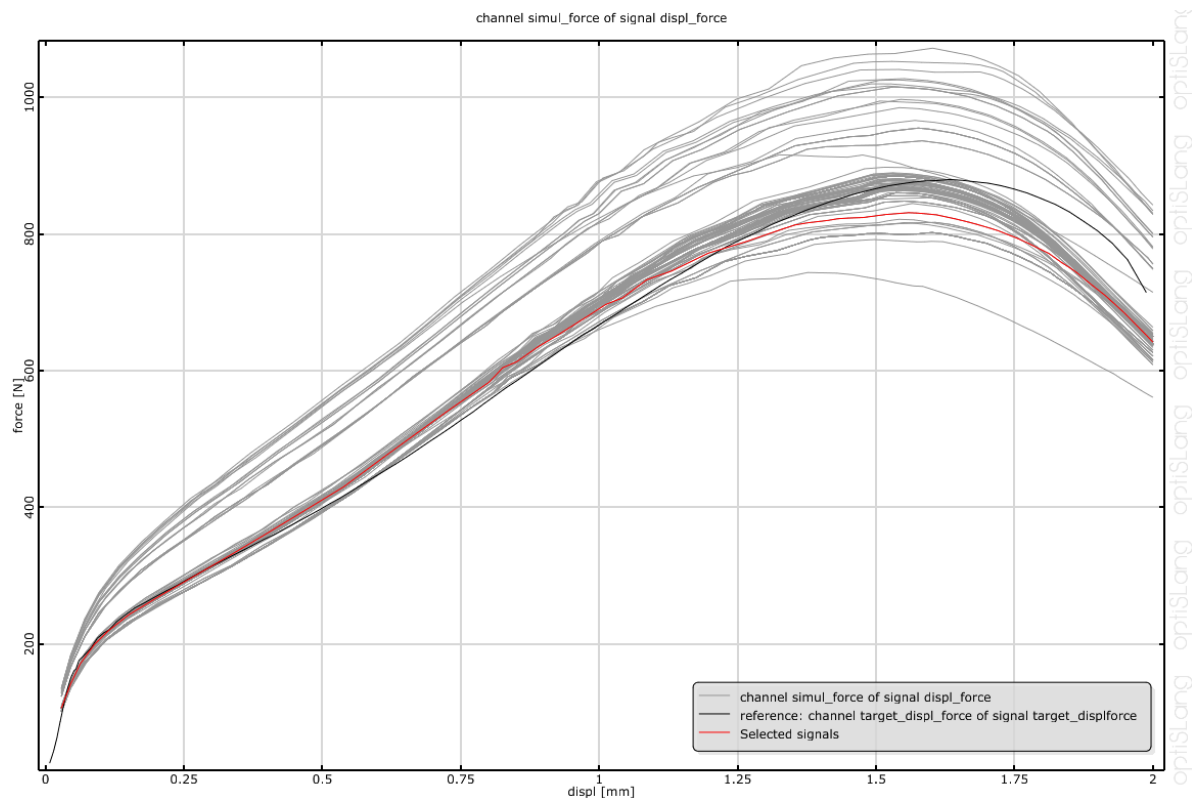
Cílem výše popsané analýzy bylo pomocí moderních optimalizačních algoritmů optimalizovat vybrané vstupní parametry úlohy tak, aby výstupní sledovaná veličina, v našem případě závislost zatížení-deformace, co nejvíce odpovídala naměřeným hodnotám. Jako cílová funkce, která byla minimalizovaná během optimalizace, byl zvolen rozdíl mezi naměřenou a vypočítanou závislostí “zatížení-deformace” na základě euklidovské metriky.



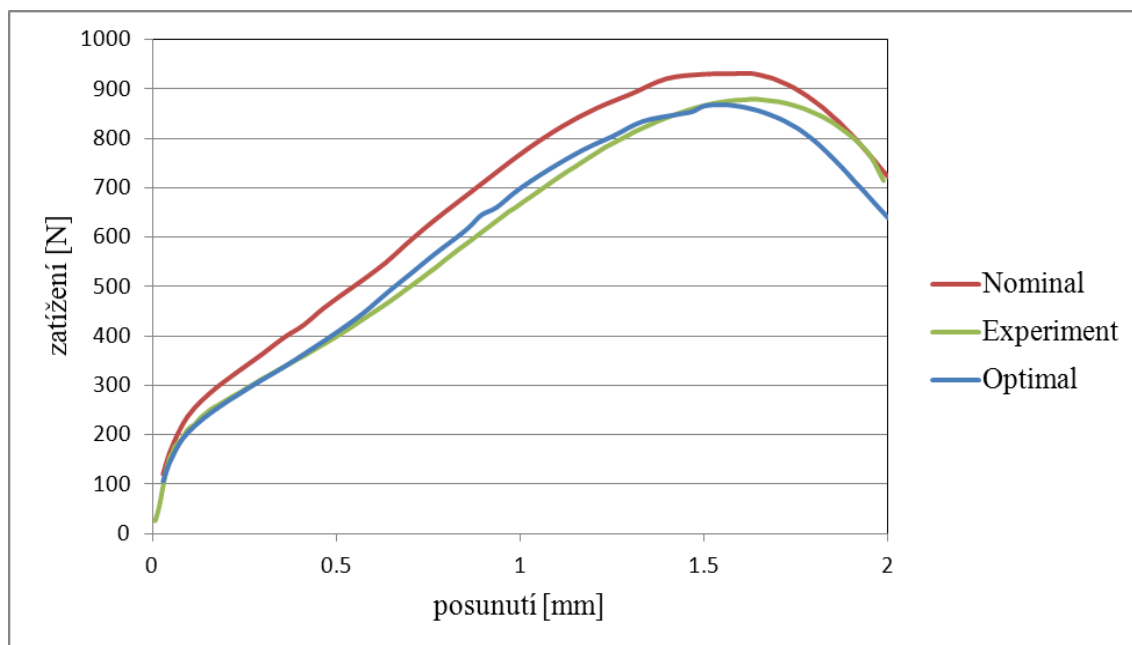
Obrázek5 Kumulované plastické deformace, protlačení 2mm, nominální



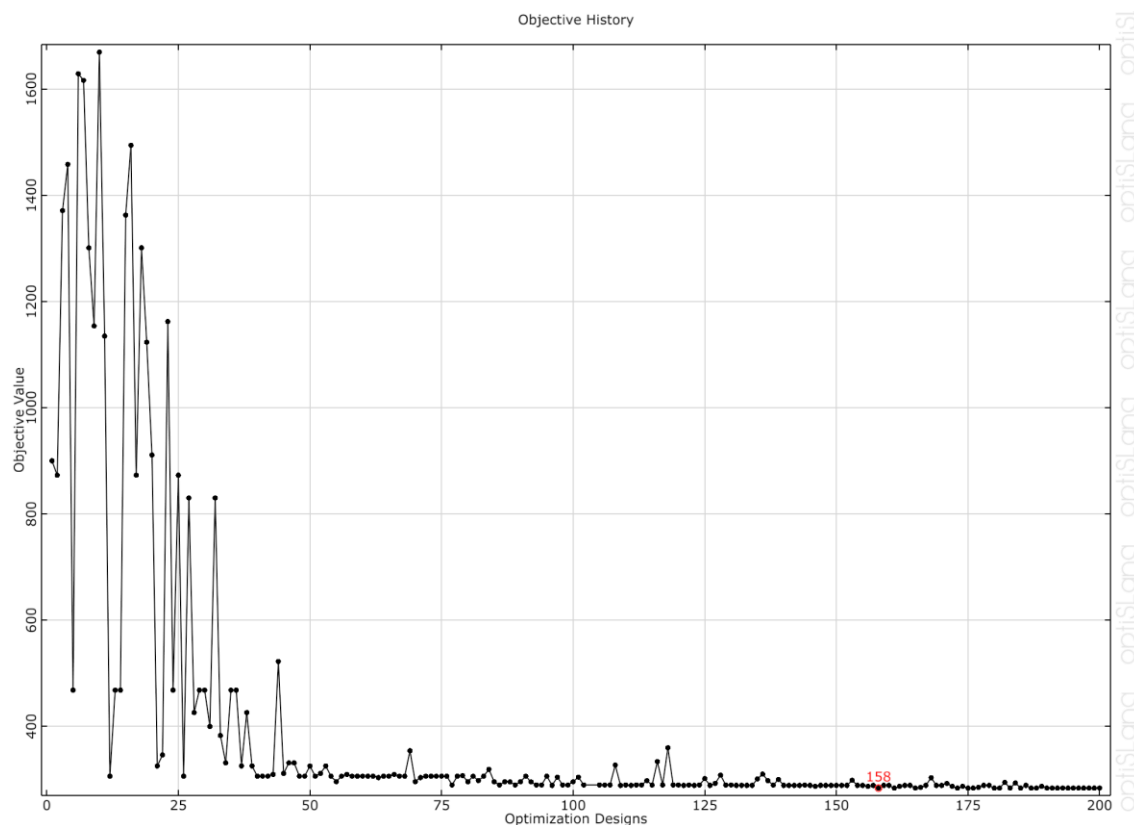
Obrázek6 Kumulované plastické deformace, protlačení 2mm, optimalizované



Obrázek7 Závislost zatížení-deformace pro jednotlivé analýzy během optimalizace.



Obrázek8 Závislost zatížení-deformace pro experiment, nominální a optimalizovanou variantu.



Obrázek9 Průběh cílové funkce během optimalizace.

Na obrázku 7 jsou znázorněny průběhy zatížení-deformace pro jednotlivé analýzy během optimalizace. Během optimalizace bylo provedeno přibližně 200 výpočtů. Na obrázku 8 jsou znázorněny závislosti zatížení-deformace pro experiment, nominální a optimalizovanou variantu. Při srovnání těchto variant je zřejmé, že původní (nominální) varianta je příliš tuhá a vykazuje vyšší hodnoty síly při stejných hodnotách deformace. Optimalizovaná varianta leží výrazně blíže experimentální křivce, podstatný rozdíl je zejména až v poslední fázi, kde dochází ke geometrickému změkčení a rozvoji poškození protlačovaného vzorku. Další simulace v rámci tohoto projektu budou zaměřeny právě na tuto oblast, kde se pomocí různých modelů poškození budeme snažit dosáhnout ještě lepší shody s naměřenými výsledky.

5. Poděkování

Autoři tohoto příspěvku děkují grantové agentuře akademie věd ČR za finanční podporu. (Projekt GA AV IAA200410801)

6. Literatura

Dymáček, P. (2006) Parametric study of the small punch test technique under constant deflection rate conditions. in: *Proc. of the grant workshop New methods of damage and failure analysis of structural parts*, TU of Ostrava, September 4-8, 2006, pp.269-275