

Vyhodnocování výsledků SPT

Miroslav Varner*, Václav Koula**, Hana Krausová***

*ČKD Blansko Engineering, **DAKEL ZD Rpety, ***Energetický ústav, FSI, VUT v Brně
Contact e-mail: varnerm@seznam.cz

Abstract

Small punch test (SPT) is known as a powerful NDT tool for existing structures material properties determination. The paper presents a description and results of SPT computer simulations performed with the steels in a wide range of yield strength and tensile strength both. The true tension diagrams of these steels are created by the Holomon formula. Conventional mechanical properties of the steels are verified from the results of computer simulation of tensile tests, too. True mechanical properties are used for SPT simulation of steels. Relationships of loads and puncher displacements are shown in the paper. Subsequently parameters SPT, i.e. the maximum load, puncher displacement at maximum load, plastic tangent at the initial stage of SPT and "plastic load" are carried out. Intersection plastic tangent and axis of load determines "yield load". Causal relations between the characteristics of static strength steels and SPT parameters are shown as graphic results. As a substantial can be marked influence of hardening exponent in causal relations and correlation of yield strength with "yield load". Two generally independent methods of estimating of yield strength and tensile strength from SPT results are presented.

Key words: simulation, small punch test, evaluation, mechanical properties of steel, finite element method

1. Úvod

Protlačovací zkouška - small punch test (SPT) - je často používána pro ověření mechanických vlastností ocelí stávajících konstrukcí [1], [2] a [3]. Zkušební tělesa SPT jsou malá. Imperfekce geometrie konstrukce vzniklé odběrem vzorků jsou tedy z hlediska pevnosti konstrukce nevýznamné. To je důvod zařazení SPT do nedestruktivních zkoušek. V současné době jsou publikovány postupy stanovení mechanických vlastností ocelí založené na počítačové simulace SPT se sofistikovaně řízenou optimalizací parametrů skutečného tahového diagramu[4] a [5]. Tyto postupy jsou náročné na technické, programové i personální vybavení pracoviště. Proto se v praxi mechanické vlastnosti ocelí stále odhadují jednoduchými empirickými vztahy odvozenými z výsledků zkoušek [6], [7], [8] a [9].

Komerční programy umožňují řešit velmi složité úlohy stanovení napětí a deformací včetně simulace elasto-plastického chování těles s respektováním velkých deformací a tření. Dosažené výsledky simulací tahových zkoušek a SPT [10] a [11] ukazují na možnost využít výsledky počítačové simulace jako věrohodný zdroj informací při studiu kauzálních vztahů mezi vlastnostmi ocelí a výsledky SPT.

Přípravné práce zahrnovaly vytvoření skutečných tahových diagramů [12] modelových ocelí s předem zadanými hodnotami meze kluzu $R_{p0.2}$, meze pevnosti R_m a simulaci tahových zkoušek a SPT modelových ocelí. Získané poznatky o vztazích materiálových vlastností a výsledků SPT jsou využity při návrhu metodik odhadu meze kluzu a meze pevnosti z výsledků SPT.

2. Modelové oceli

Vlastnosti modelových ocelí použité při simulaci jsou určeny modulem pružnosti $E = 210\,000$ MPa, Poissonovým číslem $\nu = 0.3$ a skutečnými tahovými diagramy. Skutečné tahové diagramy jsou vytvořeny s použitím Holomonova vztahu $\sigma = k \cdot \varepsilon_p^n$, kde σ je skutečné napětí, ε_p

Table 1 Mechanical properties of model steels

k [MPa]	n [-]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
931	0.05	682	761	19	74
1212	0.09	682	885	20	67
1530	0.13	682	1027	24	69
849	0.05	622	694	16	72
1105	0.09	622	806	20	68
1395	0.13	622	937	24	66
775	0.05	568	633	16	71
1010	0.09	568	737	21	68
1274	0.13	568	856	24	69
484	0.05	355	396	15	57
631	0.09	355	461	21	68
796	0.13	355	536	25	69

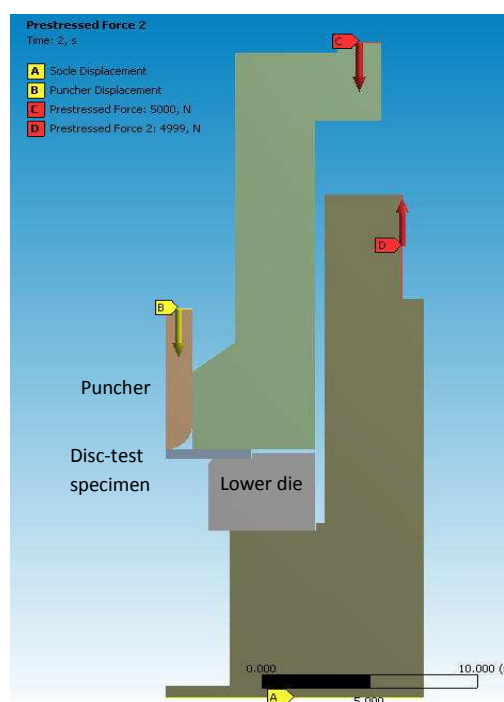


Fig. 1 Geometric model of SPT fixture

je plastická deformace, k je koeficient deformačního zpevnění a n je exponent deformačního zpevnění. Mechanické vlastnosti modelových ocelí jsou stanoveny počítačovou simulací tahových zkoušek [11]. Hodnoty tažnosti A a kontrakce Z jsou vypočítány, jakmile napětí HMM dosáhne maximální zadané hodnoty skutečného napětí v 90% plochy zúženého průřezu zkušební tyče. Mechanické vlastnosti modelových ocelí získané vyhodnocením výsledků simulace tahových zkoušek jsou uvedeny v tabulce 1.

3. Simulace SPT

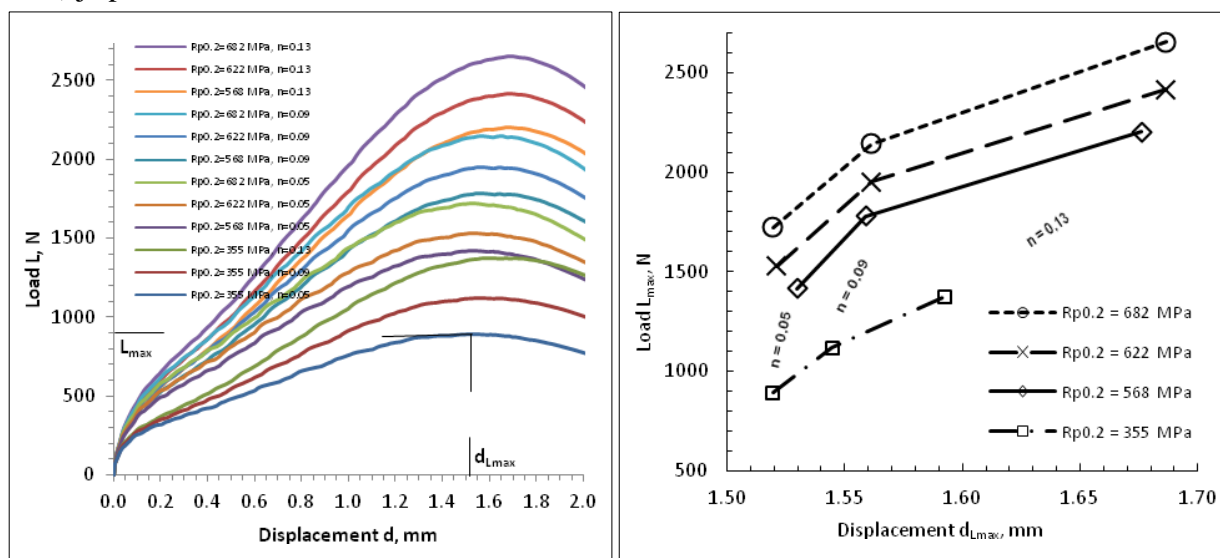
Geometrický model zahrnuje zatěžovací přípravek a zkušební těleso – disk $\Phi=8$ mm a výšce $\nu=0.5$ mm [11]. Model přípravku se zkušebním tělesem je vytvořen s využitím rotační symetrie vzhledem k svislé ose přípravku. Tření v kontaktu mezi díly přípravku a diskem je uvažováno hodnotou součinitele tření $f = 0.07$. Upnutí zkušebního tělesa v přípravku zajišťují síly C a D od převlečné matice. Geometrický model

zatěžovacího přípravku je zobrazen na obr. 1. Materiály dílů přípravku (oceli, lisovnice - INCONEL625 a děrovač - korund) se uvažují příslušnými hodnotami modulu pružnosti a Poissonova čísla. Model materiálu lisovnice (INCONEL625) navíc zahrnuje izotropní zpevnění. V prvním kroku simulace SPT se zkušební disk upne do zkušebního přípravku silami C a D. V druhém kroku je disk upnut silami C a D a disk se postupně zatěžuje přemístěním děrovače, až je dosaženo předepsané hodnoty 2.1 mm.

4. Vztahy mezi vlastnostmi materiálu a výsledky simulace SPT

Zatěžovací diagramy simulovaných SPT modelových ocelí označených mezí kluzu a exponentem zpevnění, tj. závislosti zatěžovací síly L na přemístění děrovače d jsou vykresleny na obr. 2.

Maximální zatížení L_{max} v závislosti na přemístění při maximálním zatížení d_{Lmax} je pro modelové oceli charakterizované mezí kluzu $R_{p0.2}$ a exponentem zpevnění n vykresleno na obr. 3. Maximální zatížení L_{max} a přemístění d_{Lmax} se zvětšuje s mezí kluzu oceli i jejím exponentem zpevnění. Závislost mezí pevnosti R_m na přemístění d_{Lmax} (pro meze kluzu i exponenty zpevnění ocelí) je podobná.

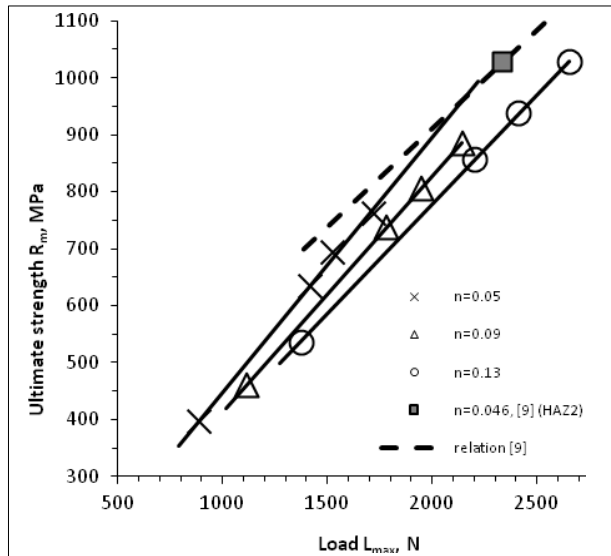


Obr. 2 Load-displacement curve for model steels

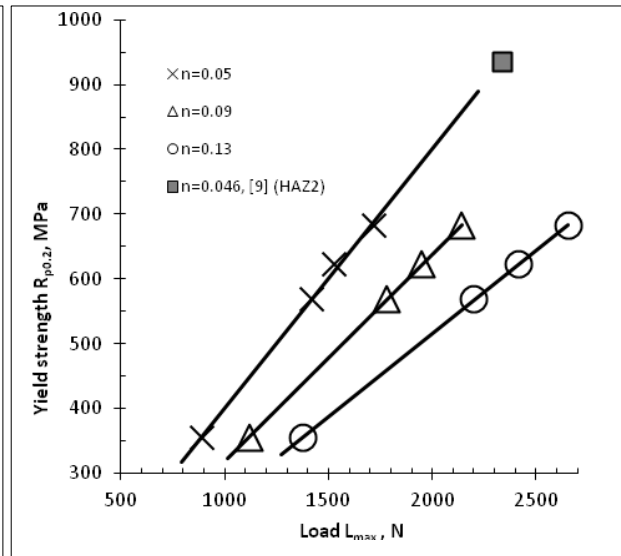
Obr.3 Influence of yield strength/hardening on SPT results

Závislosti mezí pevnosti modelových ocelí na max. zatížení L_{max} pro hodnoty exponentu zpevnění $n=0.05$, 0.09 a 0.13 jsou vykresleny na obr. 4. Závislosti jsou pro konstantní hodnoty exponentu zpevnění lineární a procházejí počátkem souřadnic. Mez pevnosti roste se zvětšováním max. zatížení. Při konstantním max. zatížení roste mez pevnosti se zmenšováním exponentu zpevnění.

Závislosti mezí kluzu modelových ocelí na max. zatížení L_{max} jsou vykresleny na obr. 5. Závislosti jsou pro konstantní hodnoty exponentu zpevnění lineární a procházejí počátkem souřadnic. Mez kluzu roste se zvětšováním max. zatížení. Při konstantním max. zatížení roste mez kluzu se zmenšováním exponentu zpevnění.

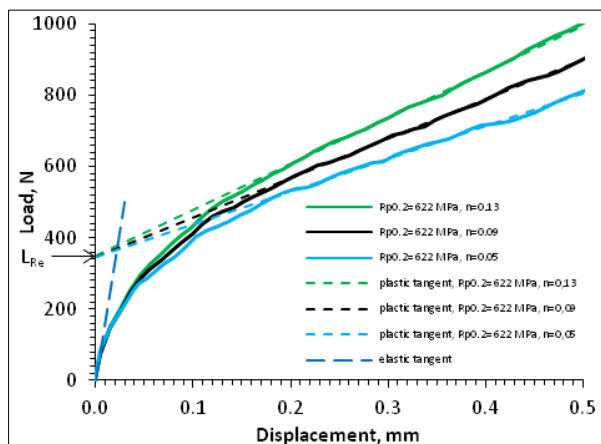


Obr. 4 Ultimate strength-maximum load relation

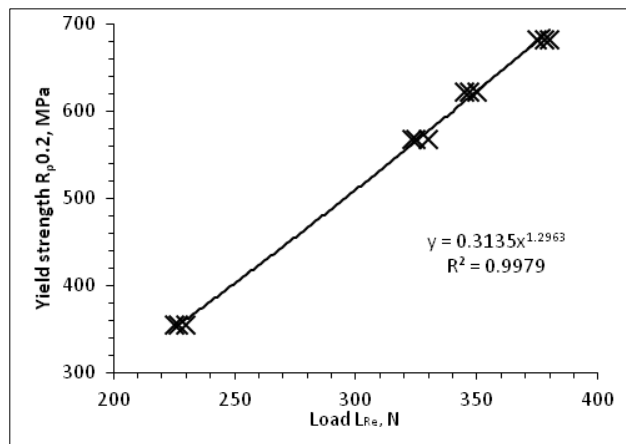


Obr.5 Yield strength-maximum load relation

Sklon plastických tečen sestrojených na počátku zatěžovacího diagramu SPT, tj. krátce po dosažení meze kluzu, se významně zvětšuje se zvětšováním exponentu zpevnění n , viz obr. 2 a obr. 6. Plastické tečny sestrojené pro danou hodnotu meze kluzu se pro sledované hodnoty exponentu zpevnění protínají na ose pořadnic diagramu a určují hodnotu veličiny L_{Re} , viz obr. 6.



Obr. 6 Procedure of "yield load LRe" assessment



Obr.7 Yield strength-"yield load LRe" relation

Meze kluzu modelových ocelí v závislosti na hodnotách „yield load“ L_{Re} jsou vykresleny na obr. 7. Uvedenou závislost lze pro hodnoty meze kluzu větší než 355 MPa aproximovat lineárním nebo mocninným vztahem. Při aproximaci mocninným vztahem dosahuje koeficient determinace R^2 hodnoty 0.9979.

5. Odhad meze kluzu a meze pevnosti z výsledků SPT

Analýza vztahů mechanických vlastností ocelí a výsledků počítačové simulace SPT umožňuje formulovat zpřesněné metodiky odhadu meze kluzu a meze pevnosti s využitím graficko-početní metody a vícerozměrné lineární regrese.

5.1. Graficko-početní metodika

V diagramu zatížení – přemístění získaného SPT se sestrojí plastická tangenta a v jejím průsečíku s osou pořadnic diagramu se odečte hodnota zatížení L_{Re} , viz obr. 6. Mez kluzu se odečte z diagramu závislosti meze kluzu na zatížení L_{Re} nebo se stanoví výpočtem regresní funkce, viz obr. 7. S použitím závislosti meze kluzu na změřeném max. zatížení L_{max} , viz obr. 5, se odhadne hodnota exponentu zpevnění n . Mez pevnosti se pak vypočítá vzorcem odvozeným z Holomonova vztahu $R_m = R_{p0.2} \cdot (500 \cdot n)^n / (n+1)$ nebo se odečte ze závislosti meze pevnosti na max. zatížení L_{max} , viz obr. 4.

5.2. Vícerozměrná lineární regrese

Výsledky simulace SPT max. zatížení L_{max} a přemístění při max. zatížení d_{Lmax} , případně jejich druhé mocniny a vzájemné součiny, se uvažují jako nezávisle proměnné (tzv. regresory). Meze kluzu a meze pevnosti jsou náhodně závislé proměnné. Na výsledky simulace SPT je aplikován lineární regresní model v maticové symbolice popsany rovnicí $\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$, kde \mathbf{X} je matice regresorů, $\boldsymbol{\beta}$ je vektor regresních koeficientů a $\boldsymbol{\varepsilon}$ je vektor náhodných chyb [13]. Předpokládá se, že složky vektoru náhodných chyb mají normální rozdělení pravděpodobnosti s nulovou střední hodnotou, s tímž rozptylem σ^2 a jsou nekorelované. Odhad vektoru regresních koeficientů \mathbf{b} se stanoví metodou nejmenších čtverců, která spočívá v minimalizaci reziduálního součtu druhých mocnin odchylek skutečných hodnot y_i od teoretických hodnot Y_i . Vektor regresních koeficientů tedy představuje řešení normálních lineárních rovnic $\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{Y}$ za předpokladu regulárnosti symetrické matice $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$. Vektory regresních koeficientů jsou odhadnuty za předpokladu, že mez kluzu a mez pevnosti lze vyjádřit lineárního funkcí, resp. kvadratickou funkcí bez smíšeného členu, resp. kvadratickou funkcí výsledků SPT. Rovnice pro odhad meze kluzu $R_{p0.2}$, meze pevnosti R_m a příslušné hodnoty koeficientů determinace R^2 jsou pro uvedeny v tabulce 2. Koeficienty determinace R^2 příslušné mezi pevnosti jsou větší než koeficienty příslušné mezi kluzu a dosahují největších hodnot pro případ kvadratického vztahu.

Tabulka 2 Yield strength/ultimate strength and SPT parameters relations

function	Regression relations	R^2
Linear	$R_{p0.2} = 2753.2 - 1794.1 \cdot d_{Lmax} + 0.36121 \cdot L_{max}$	0.9260
	$R_m = 1126.9 - 732.80 \cdot d_{Lmax} + 0.42931 \cdot L_{max}$	0.9941
Quadratic without mixed-member	$R_{p0.2} = 40448 - 49364 \cdot d_{Lmax} + 14911 \cdot d_{Lmax}^2 + 0.62184 \cdot L_{max} - 0.00008 \cdot L_{max}^2$	0.9935
	$R_m = 16616 - 20312 \cdot d_{Lmax} + 6143.3 \cdot d_{Lmax}^2 - 0.04411 \cdot L_{max} - 0.00004 \cdot L_{max}^2$	0.9992
Quadratic	$R_{p0.2} = 33649 - 39736 \cdot d_{Lmax} + 11493 \cdot d_{Lmax}^2 + 0.67330 \cdot d_{Lmax} \cdot L_{max} - 0.29960 \cdot L_{max} - 0.00012 \cdot L_{max}^2$	0.9942
	$R_m = 12212 - 14077 \cdot d_{Lmax} + 3929.8 \cdot d_{Lmax}^2 + 0.43606 \cdot d_{Lmax} \cdot L_{max} - 0.04411 \cdot L_{max} - 0.00001 \cdot L_{max}^2$	0.9993

6. Diskuse

Stanovení meze kluzu oceli z pořadnic průsečíku elastické a plastické tangenty podle doposud používané metodiky [9] nerespektuje závislost sklonu plastické tangenty na exponentu zpevnění. Postup s využitím elastické tangenty posunuté o jistou hodnotu přemístění [7] chybu odhadu meze kluzu ještě zvětšuje. Plastické tangenty jsou určovány v oblasti diagramu SPT, kde je plastická deformace relativně malá a přiléhavost Holomanova vztahu ke skutečnému tahovému diagramu je dobrá. Závislosti zatížení L na přemístění d (obr. 6) a meze kluzu na pořadnici průsečíku plastické tangenty s osou pořadnic, tj. na hodnotě L_{Re} (obr. 7) získané simulací SPT, jsou realistické a odpovídají výsledkům reálných SPT.

Vztahy mezi mezemi kluzu a pevnosti, max. zatížením L_{max} a přemístěním $d_{L_{max}}$ získané simulací SPT mohou být ovlivněny způsobem sestavení skutečných tahových diagramů, zejména při větších poměrných deformacích. Tyto pochybnosti však nepodporují výsledky SPT vzorků oceli v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje Rodriguezem [9], viz obr. 4 a obr. 5. Je patrný soulad výsledků simulace a experimentu SPT pro ocel s exponentem zpevnění cca 0.05. Podle našich výsledků však Rodriguezem použitý lineární vztah typu $R_m = a + b \cdot L_{max}$, kde a a b jsou konstanty [9] je platný pouze v oblasti větších pevností, viz obr. 4. Je tedy možno usuzovat, že tento lineární vztah je stanoven pro oceli s větší pevností bez uvažování zpevnění a logického očekávání, že v limitním případě $L_{max} = 0$ je i mez pevnosti nulová. Na oprávněnost tohoto očekávání ukazují naše výsledky simulací SPT. Přímkou popisující lineární vztahy mezi pevností a maximálním zatížením L_{max} procházejí počátkem souřadnic (obr. 4).

Odhad meze kluzu ze SPT pomocí graficko-početní metody využívá jinou informační základnu, než odhad vícerozměrnou lineární regresí. Odhady meze kluzu uvedenými metodikami jsou z tohoto pohledu v podstatě nezávislé. Vyhodnocení meze kluzu a meze pevnosti s použitím vztahu stanovených vícerozměrnou lineární regresí je jednoduché a není ovlivněno hodnotitelem. Na druhé straně, hodnoty koeficientu determinace, zejména v případě odhadu meze kluzu, predikují větší chyby odhadu.

Rozsah platnosti vztahů mezi mezí kluzu, mezí pevnosti a výsledky SPT je třeba ověřit tahovými zkouškami a SPT ocelí s různou úrovní pevnosti, zpevnění a následnou simulací SPT. Užívaná normalizace zatížení L_{max} , L_{Re} a přemístění $d_{L_{max}}$ s použitím výšky v zkušební tělesa [13] neovlivní ani závěry týkající se vztahů mezi materiálovými vlastnostmi ocelí a výsledky SPT, ani navržené metodiky vyhodnocování. Při vyhodnocování se pak uvažují normované zatížení L_{max}/v^2 , L_{Re}/v^2 a normované přemístění $d_{L_{max}}/v$.

7. Závěr

Výsledky simulace SPT modelových ocelí s mezemi kluzu od 355 MPa do 682 MPa a s mezemi pevnostmi od 396 MPa do 1027 MPa umožnily stanovit empirické vztahy mezi mechanickými vlastnostmi ocelí a výsledky SPT. Za podstatné se považuje vliv exponentu zpevnění na závislosti meze kluzu/meze pevnosti na max. zatížení SPT a na sklonu plastické tangenty závislosti zatížení na přemístění. Silná korelace meze kluzu a hodnoty „Yield load“ stanovené v průsečíku plastické tangenty s osou zatížení je rovněž podstatná. Tyto poznatky byly

rozhodující při návrhu zpřesněných metodik vyhodnocení výsledků SPT. Dvě obecně nezávislé metodiky odhadu meze kluzu a meze pevnosti oceli z výsledků SPT jsou prezentovány.

8. Použité podklady

1. KUPČA, L. -BŘEZINA, M. -PETZOVÁ, J. -BALÁK, M.: Evaluation of the reactor pressure vessel material properties degradation due to the irradiation by SPT method, 1st International Conference SSTT, Ostrava, 2010
2. KUPČA, L. -BŘEZINA, M.: Možnosti využitia systému na odber malých vzoriek z prevádzkových zariadení pri hodnotení vlastností materiálov, Chem. Listy 105, s167-s170 (2011)
3. ŠŤASTNÝ, R. -PAVLÍK, V.: Application of SPT in CEZ, 1st International Conference SSTT, Ostrava, 2010
4. EGAN, P., et al.: Small punch test: An approach to solve the inverse problem by deformation shape and finite element optimization, Comput. Mater. Sci. 40 (2007) 33-39
5. IVÁN, L. -DYMÁČEK, P.: Optimalizace materiálových parametrů při simulaci protlačovací zkoušky na miniaturních vzorcích, ANSYS konference 2010, Frymburk, Czech Republic, 2010
6. Abdul Salam Ali zidan,-LI, W. -BROOKFIELD, D. J.: The FE analysis and application of the small punch test, Int. Conf. on STISWB, Mahasarakham University, Thailand, 2009
7. AUTILLO, M., A. et al.: Utilización del ensayo miniatura de punzonamiento (Small Punch Test) EN LA Caracterización mecanica de aceros, Anales de Mecanica de la Fractura Vol. 1 (2006), 77-83
8. KLEVTSOV I. et al.: Using of small punch test for determination of tensile properties for power plant steels, 6th Int. DAAAM Baltic Conf. INDUSTRIAL ENGINEERING, Tallinn, 2008
9. RODRÍGUEZ, C. et al.: Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test, Welding Journal, Vol. 88 (2009) 188-192
10. HŮLKA, J. - KUBÍK, P. - PETRUŠKA, J.: Sensitivity analysis of small punch test, 18th Int. Conf. ENGINEERING MECHANICS 2012, Svatka, Czech Republic, 2012
11. VARNER, M. - KOULA, V. - VOLÁK, J.: Influence of instrumentation imperfections on SPT results, 43rd International Conference NDE for Safety 2013, Olomouc, 2013
12. DOWLING, N. E.: Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
13. KROPÁČ, O.: Náhodné jevy v mechanických soustavách, Praha, SNTL, 1987
14. CAMPITELLI, E. N.: Assessment of mechanical properties in unirradiated and irradiated zircalloys and steels with non-standard tests and finite element calculations, These No 3304, EPFL, Lausanne, Switzerland , 2005