

VLIV IMPERFEKČÍ INSTRUMENTACE NA VÝSLEDKY SPT INFLUENCE OF INSTRUMENTATION IMPERFECTIONS ON SPT RESULTS

Miroslav VARNER^{*}, Václav KOULA^{**}, Josef VOLÁK^{***}

^{*}ČKD Blansko Engineering, ^{**}DAKEL ZD Rpety, ^{***}Výzkumný a zkušební ústav Plzeň

Contact e-mail: varnerm@seznam.cz

Abstrakt

Uvádí se popis a výsledky počítačové simulace protlačovací zkoušky - small punch test (SPT) oceli P92. Maximální vypočítaná síla při protlačovací zkoušce je o 5 % větší, než je hodnota zjištěná experimentálně. Přemístění děrovače při maximální vypočítané síle je o 2 % menší, než je hodnota zjištěná experimentálně. Vliv tření mezi zatěžovacím přípravkem a vzorkem, vliv úchylek rozměrů a geometrie přípravku a vliv utahovací síly jsou analyzovány s použitím výsledků simulace SPT. Analýza ukazuje, že výsledky SPT jsou významně ovlivněny třením a úchytkami rozměrů i úchytkami geometrie přípravku.

Klíčová slova: *small punch test, imperfekce, simulace, metoda konečných prvků*

Abstract

The paper deals a description and results of computer simulation of small punch test (SPT) performed with structural steel P92. Maximum force computed during the SPT simulation is about 5% greater than the value obtained experimentally. Puncher displacement at maximum computed force is by 2 % less than the puncher displacement value obtained experimentally. The influence of several factor like friction between the punching device and the test sample, geometry of a punching device and value of tightening force are analyzed using SPT simulation. The analyses show that SPT results are significantly affected by friction and deviations of punching device dimensions/geometry.

Key words: *small punch test, imperfection, simulation, finite element method*

1. Úvod

Metoda konečných prvků je rutinně používána k řešení inženýrských úloh dimenzování konstrukcí a strojů a k simulaci technologických procesů. Komerční programy umožňují řešit statické lineární i nelineární úlohy. Pokud je požadováno elastické řešení úlohy stanovení napětí a deformací postačuje v případě izotropního materiálu znalost modulu pružnosti E a Poissonova čísla ν . V posledních letech se vyskytují požadavky na výpočty napětí a deformací s uvážením elasto-plastického chování materiálu [1], [2]. Věrná simulace chování dílců s uvážením izotropní plasticity předpokládá znalost skutečného tahového diagramu, tj. modelové závislosti skutečného napětí na skutečné plastické deformaci. Dobře přiléhavý model chování plastického materiálu lze sestavit ze smluvního tahového diagramu [3], [4], [5], [6] a [7].

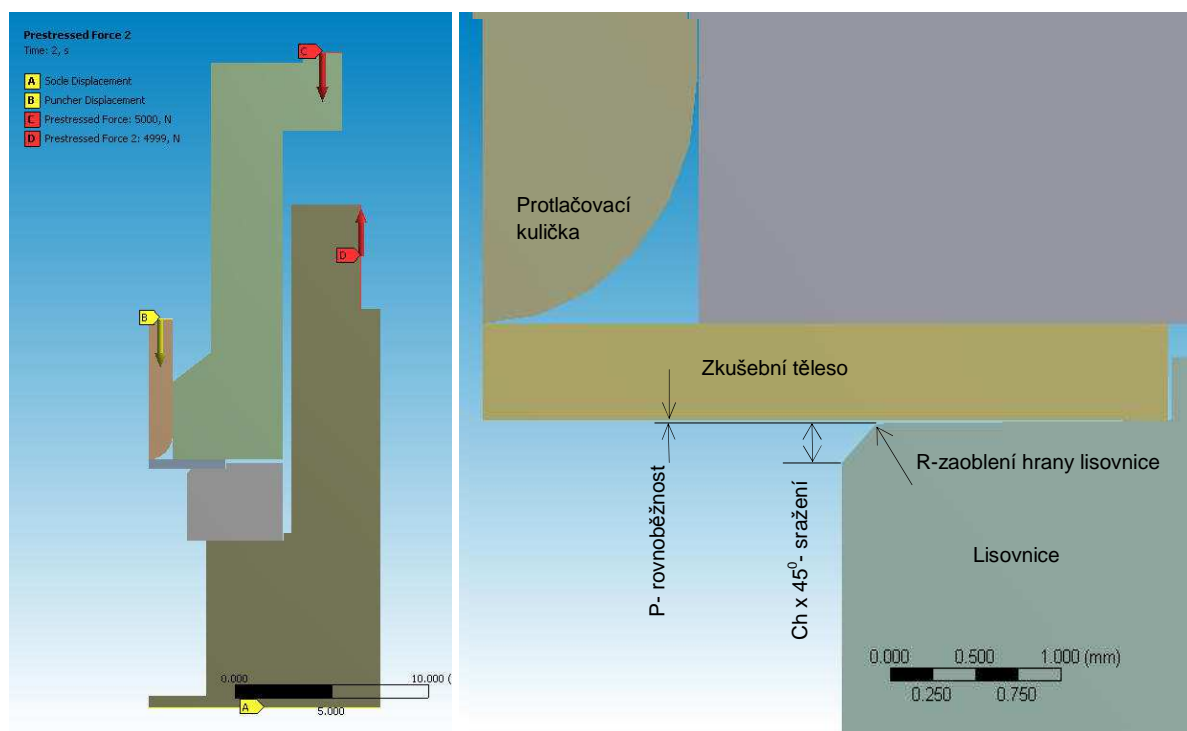
Protlačovací zkouška - small punch test (SPT) - je často používána pro odhad mechanických vlastností ocelí stávajících konstrukcí [8], [9] a [10]. Zkušební tělesa SPT

jsou malá. Po odběru vzorků, určených k vypracování zkušebních těles SPT, jsou vzhledem k jejich malým rozměrům imperfekce geometrie konstrukce tak malé, že nesnižují pevnost konstrukcí. To je důvod zařazení SPT do nedestruktivních zkoušek. Vliv průměru protlačované kuličky, tloušťky zkušebního tělesa, součinitele tření, meze kluzu a exponentu zpevnění zkoušeného materiálu je analyzován pomocí počítačové simulace SPT, přičemž je uvažována ideální geometrické uspořádání SPT a součásti přípravku jsou modelovány jako tuhá tělesa [11] a [12].

V příspěvku se zabýváme simulací SPT oceli P92 [13] a porovnáním vlivu vybraných parametrů SPT a imperfekcí přípravku na její výsledky. Výpočty respektují požadavky na modelování velkých deformací zkušebního tělesa, plastické vlastnosti oceli (izotropní plasticity) a tření v kontaktech mezi díly vlastního zatěžovacího přípravku a zkušebního tělesa.

2. Simulace small punch test

Geometrický model zahrnuje zatěžovací přípravek používaný ve Výzkumném a zkušebním ústavu Plzeň, a zkušební tělesa – disk o průměru 8 mm a výšce 0.5 mm [14]. Model přípravku se zkušebním tělesem je vytvořen s využitím symetrie vzhledem k svislé ose přípravku. Tření v kontaktu mezi díly přípravku a diskem je uvažováno hodnotami součinitele tření f v mezích 0.07 až 0.2. Upnutí zkušebního tělesa v přípravku zajišťují síly C a D od převlečné matice. Geometrický model ve výkresové konfiguraci zatěžovacího přípravku je zobrazen na obr. 1. Materiály dílů přípravku (oceli, INCONEL625 a korund) se uvažují příslušnými hodnotami modulů pružnosti

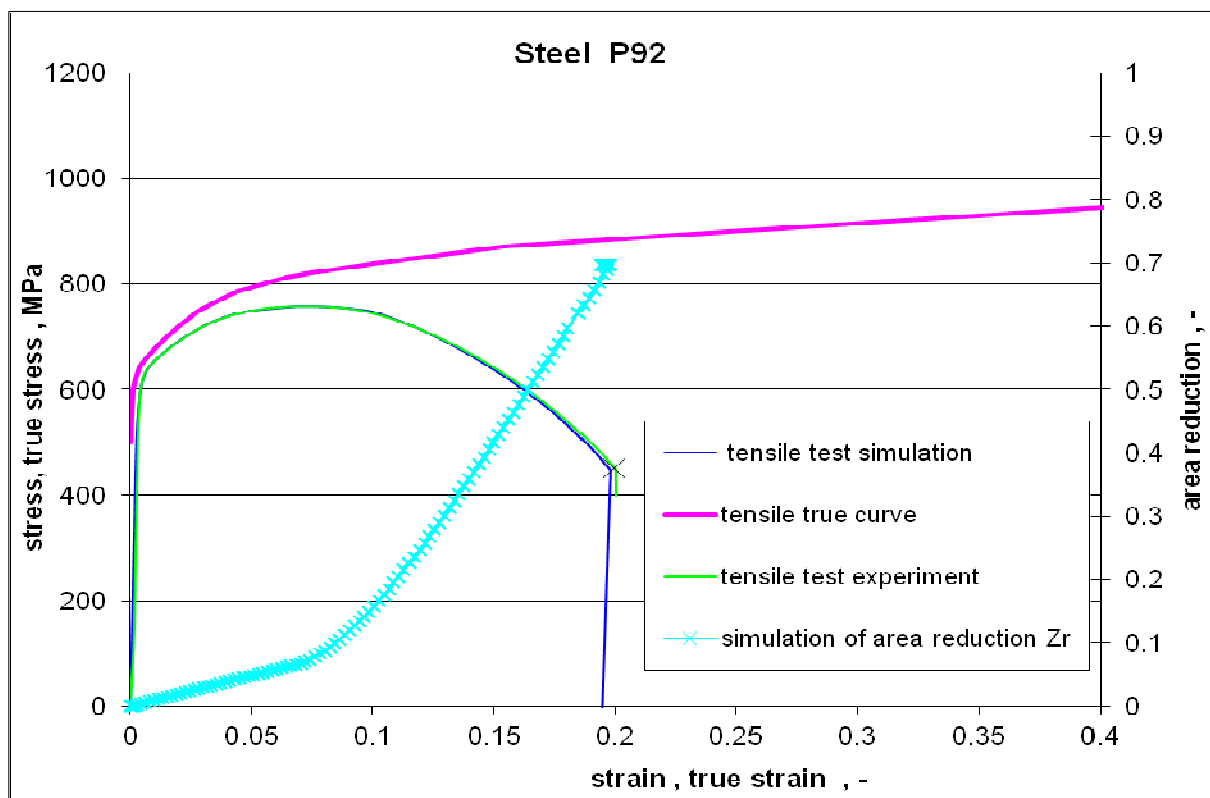


Obr. 1: Model a zkoumané imperfekce, Fig. 1: geometry model and examined imperfections

a Poissonovými čísly. Model materiálu lisovnice (INCONEL625) navíc zahrnuje izotropního zpevnění. Ve výkresové konfiguraci se uvažuje s hodnotou součinitele tření $f = 0.07$ [15].

Studium vlivu geometrických imperfekcí lisovnice zahrnuje sražení hrany lisovnice $Ch = 0.3$ mm (výkresové sražení hrany $Ch = 0.2$ mm) zaoblení hrany lisovnice poloměrem $R = 0.02$ mm a imperfekci rovnoběžnosti plochy zahloubení pro zkušební těleso o velikosti $P = 0.02$ mm, viz obr. 1.

Vlastnosti oceli P92 použité při simulaci jsou určeny modulem pružnosti $E = 210000$ MPa, Poissonovým číslem $\nu = 0.3$ a závislostí skutečného napětí na skutečné poměrné plastické deformaci odvozenou ze skutečného tahového diagramu. Skutečný tahový diagram je v oblasti poměrných deformací nad smluvní mezí pevnosti korigován s cílem dosažení shody smluvního tahového diagramu oceli stanoveného experimentálně a simulací, viz obr. 2.

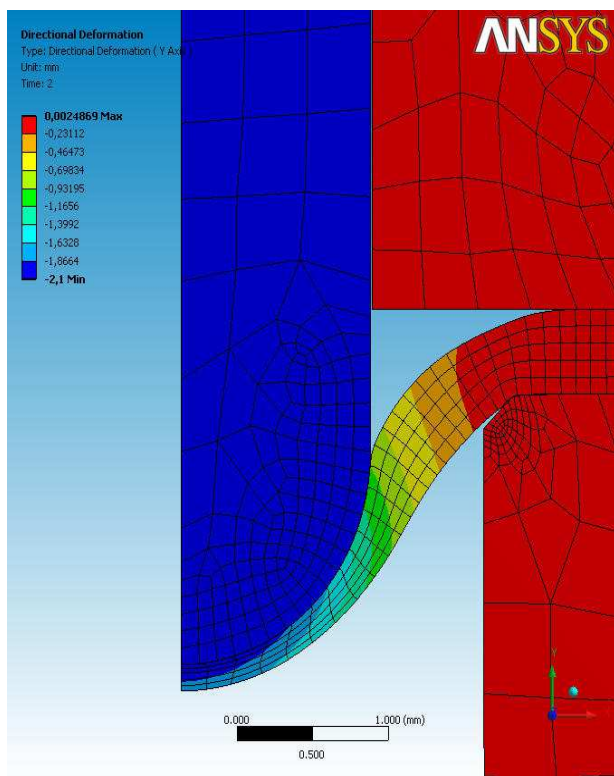


Obr. 2: Tahové diagramy oceli P92, **Fig. 2:** Tensile diagrams of steel P92

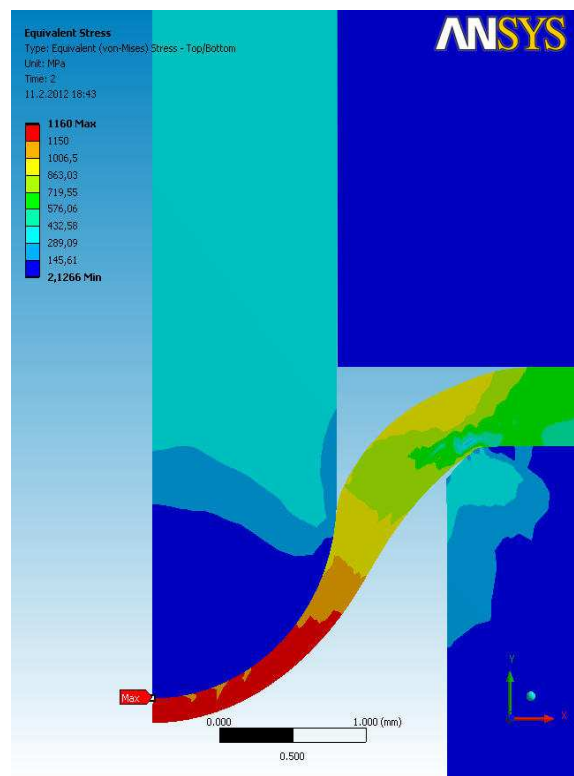
V prvním kroku simulace SPT se zkušební disk upne do zkušebního přípravku těleso silami C a D. V druhém kroku je disk stále upnut silami C a D a postupně se zatěžuje přemístěním děrovače, až je dosaženo jeho předepsané hodnoty.

3. Výsledky simulace SPT a jejich vyhodnocení

Celková deformace a napětí HMH po ukončení zkoušky při standardní konfiguraci SPT je vykreslena na obr. 3 a obr. 4. Vypočítané závislosti síly a max. napětí HMH ve zkušebním disku na přemístění děrovače je spolu s výsledky experimentů [16] (zkuš. disky P92_molyko01 – 04) vykreslena na obr. 5. Max. vypočítaná síla při protlačovací zkoušce je o 5 % větší, než je hodnota zjištěná experimentem. Přemístění děrovače při max. vypočítané síle je o 2 % menší, než je experimentálně zjištěná hodnota.



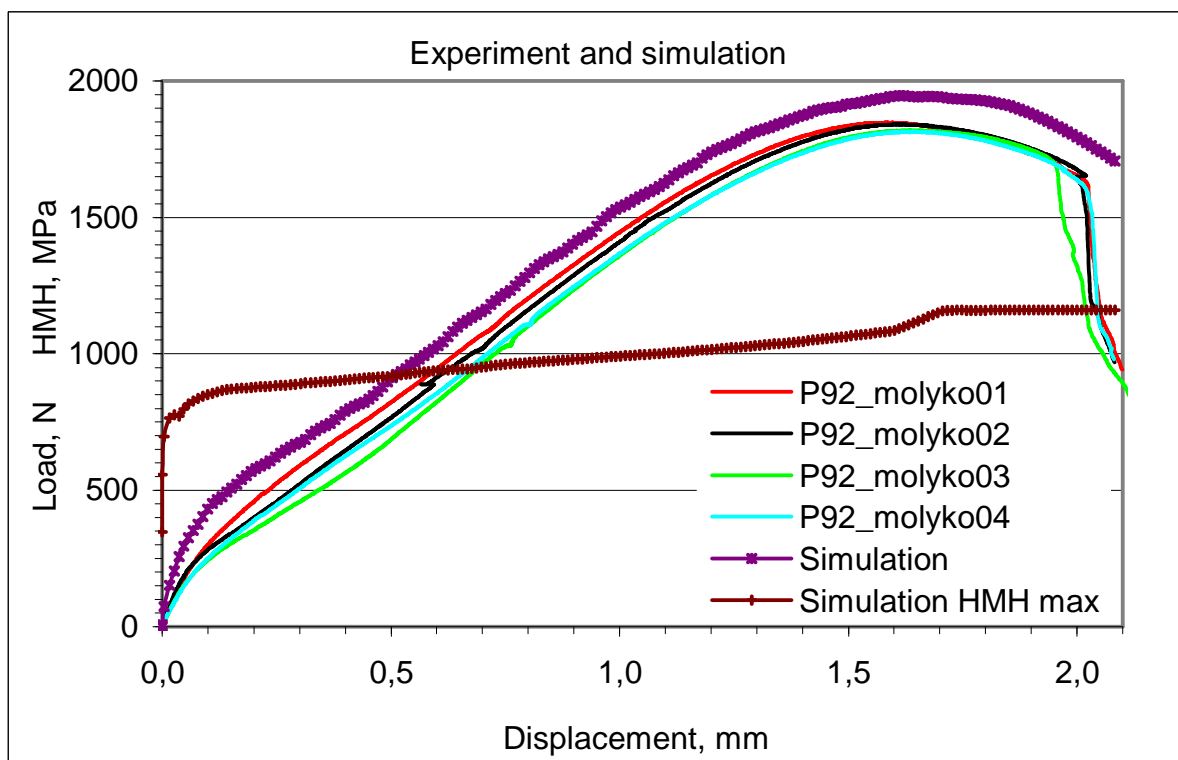
Obr. 3: Deformace na konci SPT
Fig. 3: Deformation on the SPT end



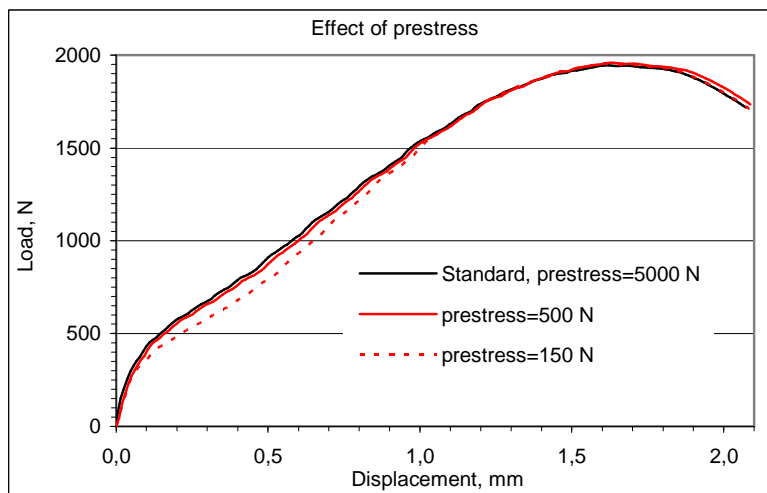
Obr. 4: Napětí HMH na konci SPT
Fig. 4: Stress HMH on the SPT end

ve zkušebním disku na přemístění děrovače je spolu s výsledky experimentů [16] (zkuš. disky P92_molyko01 – 04) vykreslena na obr. 5. Max. vypočítaná síla při protlačovací zkoušce je o 5 % větší, než je hodnota zjištěná experimentem. Přemístění děrovače při max. vypočítané síle je o 2 % menší, než je experimentálně zjištěná hodnota.

Je zřejmé, že již na začátku SPT je významný rozdíl závislosti síly na přemístění získanými experimentálně a simulací. Podle průběhu napětí HMH ve zkušebním disku, viz obr. 4, vzniká tato odchylka v oblasti závislosti, kde ocel je v elastickém stavu nebo stavu s málo rozvinutou plastickou deformací. Při zvětšování rozsahu a velikosti plastických deformací se odchylka zmenšuje. Tento poznatek je v rozporu s očekáváním, že shoda výsledků experimentů s výsledky simulace je v počátku SPT velká a s rozvojem plastické deformace se zmenšuje. Proto jsou zkoumány vytipované parametry ovlivňující výsledky SPT: velikost upínací síly, imperfekce zatěžovacího přípravku a tření mezi díly zkušebního přípravku a zkušebním tělesem. Vliv velikosti upínací síly od 150N do 5000 N je ukázán na obr. 6. Malá hodnota upínací síly způsobuje zmenšení zatěžovací síly od zahájení SPT do přemístění přibližně 1.3 mm a naopak malé zvýšení zatěžovací síly od přemístění 1.5 mm. Od předpětí 500 N je vliv velikosti předpětí zanedbatelný. Je zřejmá potřeba zvýšit reprodukovatelnost výsledků SPT standardizací postupů upínání disku. Vliv imperfekcí geometrie lisovnice na výsledky SPT je spolu s výsledkem experimentu znázorněn na obr. 7.



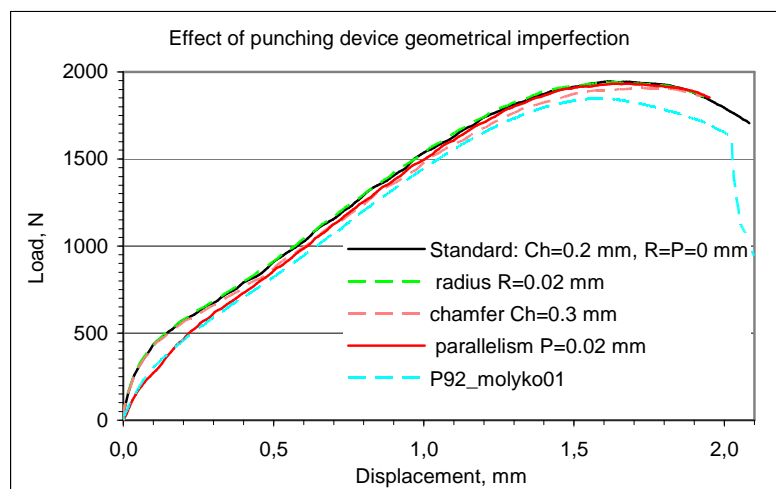
Obr.5: Síla versus posuv – experiment a simulace,
Fig. 5: Force versus displacement – experiment and simulation



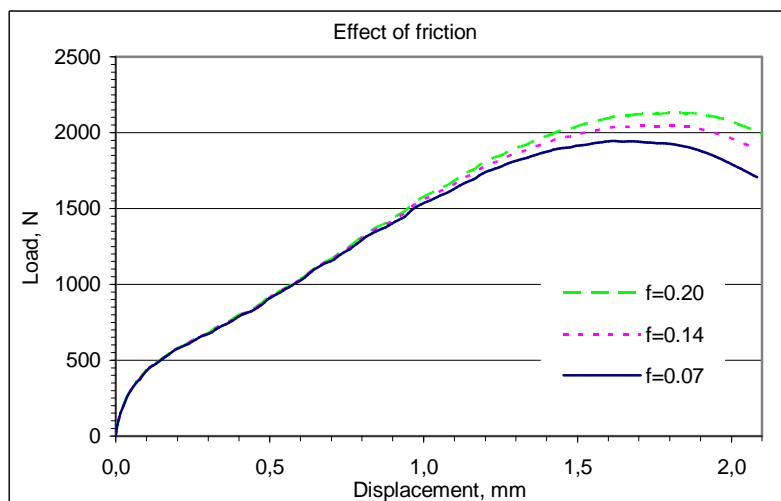
Obr. 6: Vliv předpětí, **Fig. 6:** Prestress effect

do konce testu. Odchytky simulace SPT od experimentu mohou být způsobeny imperfekcí rovnoběžnosti dosedacích ploch testovacího zařízení.

Zaoblení hrany lisovnice $R = 0.02$ je odhadnuto z trvalé deformace hrany po odlehčení zkušebního tělesa. Takto velké zaoblení hrany lisovnice má marginální vliv na výsledek SPT. Naproti tomu zvětšení sražení hrany lisovnice na $Ch = 0.3$ mm a imperfekce rovnoběžnosti plochy lisovnice $P = 0.02$ mm, která je v kontaktu s plochou zkušebního tělesa způsobí významné změny závislosti síla na přemístění. Zvětšení sražení hrany na 0.3 mm se projevuje zmenšením zatěžovací síly od přemístění 0.25 mm prakticky



Obr. 7: Vliv imperfekcí přípravku,
Fig. 7: Imperfection device effect



Obr. 8: Vliv tření,
Fig. 8: Friction effect

Vzhledem k různým směrníciím závislosti síla – přemístění při experimentech SPT, viz obr. 4, lze očekávat i významný vliv imperfekcí rovnoběžnosti dosedacích ploch zkušebních disků na výsledky SPT.

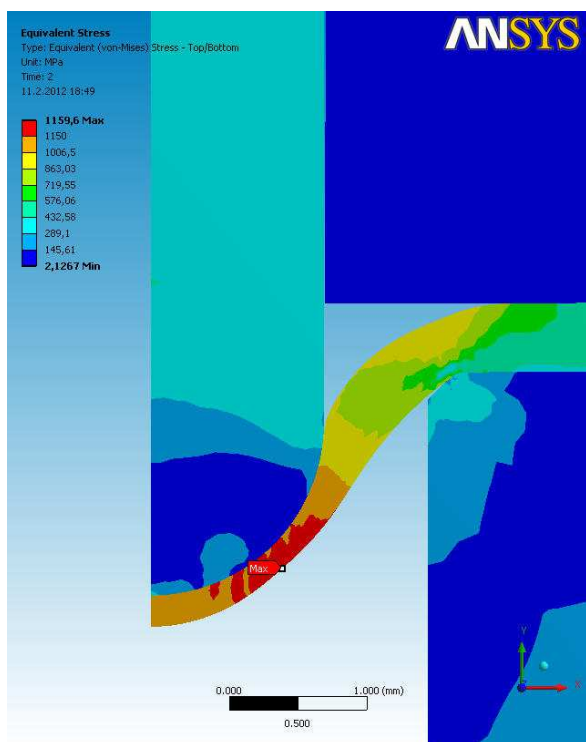
Vliv tření mezi zatěžovacím přípravkem a zkušebním diskem je znázorněn na obr. 8. Zvětšování hodnoty součinitele tření zvyšuje významně zatěžovací sílu od přemístění cca 0.75 mm. Velikost tření ovlivňuje lokalizaci porušení disku. Největší hodnota napětí HMH při součiniteli tření $f = 0.07$, resp. 0.2 je ve středu zkušebního tělesa - disku, kde lze očekávat jeho protržení, viz obr. 4, resp. na poloměru cca 0.6 mm, kde je rovněž patrné lokální zmenšení tloušťky disku, viz obr. 9. Výsledky simulace imperfekcí zatěžovacího přípravku SPT ukazují na možné příčiny vzniku odchylek výsledků simulace a experimentu.

Odchylky geometrie zatěžovacího přípravku, disků zkušebních těles a odchylky pracovních postupů nepříjemně ovlivňují výsledky SPT.

Uvážíme-li, že hlavní účel SPT spočívá v získání podkladů pro predikci dalšího chování stávajících konstrukcí z hlediska jejich integrity, je nutné použít všech dostupných prostředků k zajištění správnosti a reprodukovatelnosti výsledků SPT. Účinným prostředkem se jeví simulace SPT počítačem, kterou lze použít ke studiu závislosti výsledků SPT na vlastnostech materiálu a vývoji přesnějších metodik vyhodnocování výsledků SPT.

4. Závěr

Skutečný tahový diagram a závislost skutečného napětí na plastické deformace lze stanovit z dat získaných z tahové zkoušky s kruhovým průřezem. Nejmenší možný rozsah dat umožňující stanovit skutečný tahový diagram oceli zahrnuje napětí a deformace na smluvní mezi kluzu, na mezi pevnosti a při lomu.



Obr. 9: Napětí HMM na konci SPT- $f=0,2$

Fig. 9: Stress HMM on the SPT end- $f=0,2$

Výsledky simulace tahové zkoušky a „small punch test“ dobře přiléhají k výsledkům reálných zkoušek. Při větších požadavcích na správnost odhadu parametrů skutečného tahového diagramu se doporučuje smluvní tahový diagram modifikovat s využitím simulace tahových zkoušek. Sledované imperfekce zatěžovacího přípravku způsobují posunutí zatěžovacího diagramu SPT směrem k menším hodnotám síly. Největší vliv na snížení zatěžovací křivky v počátečním stádiu SPT má odchylka od rovnoběžnosti lisovnice. Obdobné výsledky lze očekávat v případě zkušebních vzorků, pokud jejich plochy vykazují nerovnoběžnost v řádu setin mm. Srovnání výsledků experimentů a simulace SPT ukazuje na vliv možných geometrických odchylek přípravku od výkresové dokumentace a vliv náhodných odchylek utahovací síly a geometrie zkušebních vzorků. Účinným prostředkem identifikace

systematických a náhodných chyb výsledků se jeví simulace SPT počítačem, kterou lze rovněž použít ke studiu kauzálních vztahů výsledků SPT a vlastností materiálu.

5. Použité podklady

1. LAM, P., S. -MORGAN, M., J.: Tritium reservoir structural performance prediction, WSRC-Tr-2005-00251, Savannah River National Laboratory, WSRC, Aiken, SC, 2005
2. BOŘKOVEC, J.: Výpočtové modely tvárného porušování kovů v simulaci technologických procesů, Závěrečná zpráva projektu FRVŠ 2842/2006/G1, ÚMTMB, VUT Brno, 2006
3. ČSN EN ISO 6892 Kovové materiály-Zkoušení tahem-Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty, únor 2010
4. KLESNIL, M. – LUKÁŠ, P.: Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání, Praha 1975, ACADEMIA
5. Tensile testing, edited by Davis, J., R., ASM International, 2004

6. Handbook of workability and process design, edited by Dieter G., E., Kuhn H., A. and Semiatin S., L., ASM International, 2003
7. DOWLING, N. E.: Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
8. 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, Otrava, August 31-September 2, 2010
9. KUPČA, L. -BŘEZINA, M.: Možnosti využitia systému na odber malých vzoriek z prevádzkových zariadení pri hodnotení vlastností materiálov, Chem. Listy 105, s167-s170 (2011)
10. ŠŤASTNÝ, R. -PAVLÍK, V.: Application of SPT in CEZ, 1st International Conference SSTT, Otrava, August 31-September 2, 2010
11. PATHAK at al.: Influence of key parameters on SPT result, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 16, December 2009, pp. 385-389
12. HŮLKA, J. -KUBÍK, P.-PETRUŠKA, J.: Sensitivity Analysis of small punch test, 18th International Conference ENGINEERING MECHANICS 2012, Svatka, May 14-17, 2012,
13. ČMAKAL, J.-HORVÁTH, L. -CHMELA, T.-SKLENIČKA, V.: The influence of initial deformation on structure and mechanical properties of P92 steel, METAL2010, Rožnov pod Radhoštěm, 2010
14. KANTA, V.: Přípravek na zkoušky protlačováním (Small punch test), Výkresová dokumentace, Škoda Výzkum s.r.o., 2005
15. www.redhill-balls.cz
16. KOULA, V. -SLUNÉČKO, T. -VOLÁK, J.: Nepublikované výsledky měření: Protocol - 07.06.2011, VZÚ Plzeň, 2012

Poštovní adresy:

Miroslav VARNER
 ČKD Blansko Engineering a.s..
 s.r.o. Čapkova 2357/5
 64 801 Blansko

Václav KOULA
 DAKEL ZD Rpety
 Ohrobecká 408/3
 142 00 Praha 4

Josef VOLÁK
 Výzkumný a zkušební ústav Plzeň
 Tylova 1581/46
 301 00 Plzeň