

EXPERIMENTÁLNE URČOVANIE KRIVIEK PLASTICKOSTI PLECHOV KRÍŽOVOU SKÚŠKOU

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF YIELD LOCUS OF STEEL SHEETS BY BIAXIAL TENSILE TEST

František ŠIMČÁK¹ Juraj HANUŠOVSKÝ², Vladislav BERINŠTET¹

Abstrakt

Identifikácia okamžiku počiatku plastickej deformácie plechov pri rovinnej napäťosti je dôležitá ako pri modelovaní lisovacích procesov, tak aj pri posudzovaní únosnosti nosných prvkov tenkostenných konštrukcií. Pre experimentálne určovanie kriviek plastickosti plechov pri rovinnej napäťosti je výhodné použiť krížovú skúšku. V príspevku sú uvedené krivky plastickosti určené využitím krížovej skúšky pre akosti plechov ktoré sú používané v automobilovom priemysle.

Kľúčové slová: krížová skúška, krížová vzorka, krivky plastickosti, plechy valcované za studena, automobilový priemysel.

Abstract

The identification of yield locus of steel sheets in plane stress state is important not only for modeling of sheet metal forming processes but also for the assessment of load-carrying capacity of carrying elements of thin-walled structures. For the experimental determination of yield locus in plane stress state is useful the biaxial tensile test. In this contribution the yield loci determined by biaxial tensile tests for the various steel sheets that are used in automotive industry are given.

Keywords: biaxial tensile test, cruciform specimen, yield locus, cold rolled sheets, automotive industry.

ÚVOD

Podmienky, pri splnení ktorých sa materiál dostáva do plastickejho stavu (začína plastická deformácia), nazývame podmienky plastickosti [1]. Vzhľadom na to, že valcovanie plechov za studena mení štatisticky náhodné usporiadanie kryštálov na ich usporiadanie s prednou orientáciou, vytvárajú sa textúry, ktoré spôsobujú textúrnu anizotropiu plechov pri plastickej deformácii. V dôsledku plastickej anizotropie valcovaných plechov musíme pri analýze ich plastických vlastností využívať teóriu plastickosti anizotropných materiálov.

Podmienky plastickosti, ktoré definujú počiatok plastickej deformácie, sa určujú analyticky alebo experimentálne. Analytické metódy pre definovanie podmienok plastickosti sa rozvíjali začínajúc von Misesom v roku 1928 [2], cez Hilla [3,4,5], Hosforda [6], Gotoha [7], Barlata [8], Banabiča [9] a ďalších. Vzhľadom na približnosť predpokladov analytických postupov sa v poslednom období rozširujú experimentálne metódy určovania počiatku plastickej deformácie

¹ prof. Ing. František ŠIMČÁK, CSc., Ing. Vladislav BERINŠTET, KAMaM, SjF TU v Košiciach, frantisek.simcak@tuke.sk, vladislav.berinstet@tuke.sk,

² Ing. Juraj HANUŠOVSKÝ, Sauer-Danfoss, Považská Bystrica, jhanusovksy@sauer-danfoss.com
Lektoroval: prof. Ing. František PLÁNIČKA, CSc., KM, FAV ZČU Plzeň, planicka@kme.zcu.cz

plechov pri rovinnej napäťosti. S výhodou sa pritom využíva tzv. krížová skúška, pri ktorej je vzorka plechu namáhaná nezávisle v dvoch navzájom kolmých smeroch tak, že v stredovej oblasti vzorky sa dosahuje vopred definovaná rovinná napäťosť [10,11].

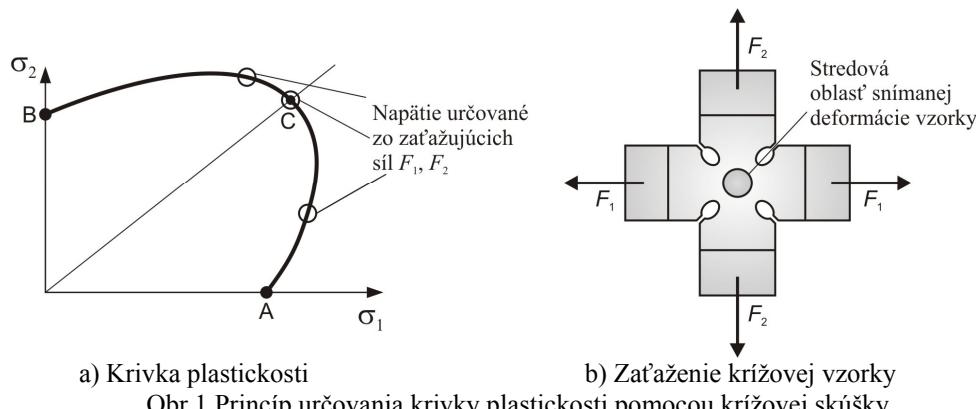
S cieľom experimentálneho určovania počiatku plastickej deformácie plechov pri rovinnej napäťosti bolo vybudované experimentálne pracovisko pozostávajúce z hydraulického zaťažovacieho zariadenia pre krížové skúšky, so snímačom sín v tiahach a z biaxiálneho extenzometra pre meranie deformácie v stredovej časti vzorky [12,14]. Zariadenie bolo využité pre hodnotenie počiatku plastickej deformácie vybraných akostí za studena valcovaných plechov produkcie U.S.S. Košice, používaných v automobilovom priemysle.

V článku sú uvedené výsledky experimentálneho určovania počiatku plastickej deformácie pre plechy z extrahlbokočažných ocelí ako aj z ľahkých ocelí s vyššími pevnostnými vlastnosťami. Vzhľadom na rôzne metalurgické a technologické parametre výroby vykazujú tieto plechy rôzne textúry spôsobujúce odlišnú anizotropiu vlastností pri plastickej deformácii. Získané experimentálne výsledky sú porovnávané s teoretickými výsledkami získanými z analytických riešení podľa rôznych autorov.

URČOVANIE KRIVIEK PLASTICKOSTI KRÍŽOVOU SKÚŠKOU

Pre experimentálne určovanie bodov kriviek plastickosti so súradnicami $\sigma_1 \geq 0$, $\sigma_2 \geq 0$ (obr.1a) je možné použiť

- jednoosovú skúšku ďahom v dvoch navzájom kolmých smeroch (body A,B na krivke plastickosti),
- Bulgeho test, ktorý spočíva v namáhaní plechu upnutého nad otvorom hydrostatickým tlakom kvapaliny (bod C na krivke plastickosti),
- namáhanie rúrky kruhového prierezu osovou silou a vnútorným pretlakom (všetky body na krivke plastickosti),
- krížovú skúšku spočívajúcu v dvojosovom namáhaní križovej vzorky (všetky body na krivke plastickosti).



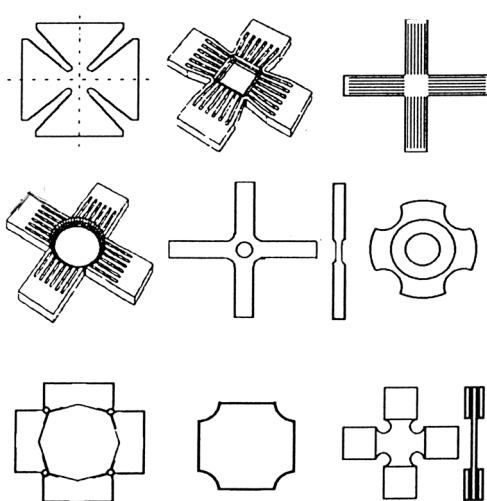
a) Krivka plastickosti

Obr.1 Princíp určovania krivky plastickosti pomocou krížovej skúšky

Pri krížovej skúške je krížová vzorka zaťažovaná silami F_1, F_2 v dvoch navzájom kolmých smeroch, pričom deformácia je snímaná v určitej stredovej oblasti krížovej vzorky (obr.1b). Súčasne sú zaznamenávané zaťažujúce sily F_1, F_2 , z ktorých sa určujú normálové napäťia v stredovej oblasti krížovej vzorky, čo umožňuje získať body na krivke plastickosti prislúchajúce určitej hodnote plastickej deformácie. Definícia počiatku plastickej deformácie je pritom pri

dvojosovej napäťosti menej jednoznačná ako pri jednoosovej napäťosti. Preto pri vytváraní kriviek plastickosti (počiatočných aj následných) sú používané rôzne kritériá, napr. hodnota väčšej pomernej plastickej deformácie, intenzita pomernej plastickej deformácie, práca pri plastickej deformácii a pod.

Najčastejšie sa na vývodenie síl pri krízovej skúške využívajú hydraulické zaťažovacie zariadenia. Jedná sa pritom o systémy s dvoma, troma alebo štyrmi hydraulickými valcami. Najvhodnejšie sú pritom systémy so štyrmi hydraulickými valcami, ktoré umožňujú zabezpečiť fixáciu polohy stredu vzorky počas skúšky.



Obr.2 Typické tvary krízových vzoriek nebezpečie predčasného porušenia vzoriek. Pozdĺžne zárezy v ramenách znižujú nežiaduce namáhanie v stredovej oblasti šmykom a ohybom a zlepšujú homogenitu v rozložení napäťi [10].

Pre zostrojenie kriviek plastickosti je potrebné, synchronne s časovým priebehom zaťažujúcich síl určujúcich napäťia, zaznamenávať časové priebehy deformácií krízovej vzorky v meranej stredovej oblasti. Kým pre určovanie časových priebehov zaťažujúcich síl je bezproblémové využitie dynamometrov pre jednoosové zaťaženie, pri snímaní deformácií na povrchu krízovej vzorky je situácia zložitejšia.

Pre určovanie deformácií v stredovej oblasti krízovej vzorky (predpokladáme pomerné deformácie do cca 5%) sa používajú rôzne postupy využívajúce napríklad:

- odporové tenzometrické snímače pre veľké deformácie [10],
- Joule-Thompsonov efekt spôsobujúci zmenu teploty materiálu pri prechode z pružnej do plastickej oblasti [11],
- bezkontaktné optické metódy [13,14],
- kontaktné jednoosové alebo dvojosové extenzometry [15,16].

Každá z uvedených metód má určité výhody aj nevýhody, ktoré sú podrobnejšie popísané napr. v literatúre [15].

METODIKA SKÚŠOK, DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

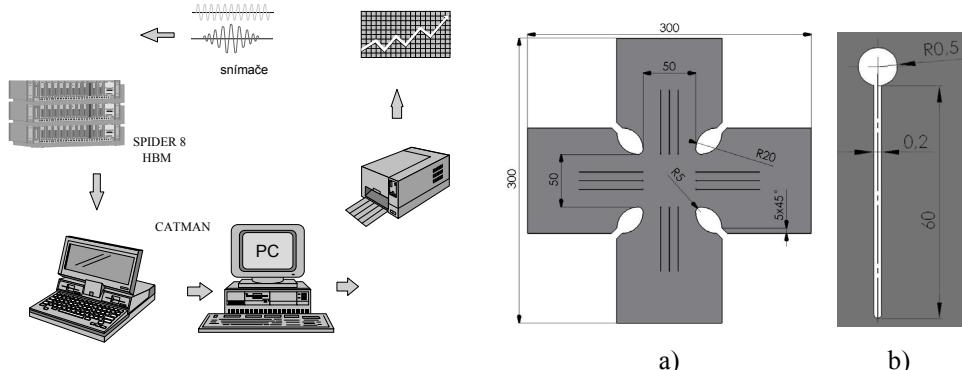
Krízové skúšky boli realizované na experimentálnom pracovisku pozostávajúcom z hydraulického zariadenia pre dvojosové zaťažovanie krízových vzoriek a zo zariadenia pre snímanie deformácií v stredovej časti vzorky. Hodnoty zaťažujúcich síl, pôsobiacich na ramená

Na výsledky krízovej skúšky a ich interpretáciu má veľký vplyv geometria vzorky, rovnomernosť (homogenita) napäti a deformácií v mieste snímania deformácií ako aj spôsob výpočtu napäťi vo vzorke zo zaťažujúcich síl. Keďže v súčasnosti neexistuje žiadna norma (alebo predpis) pre voľbu tvaru a rozmerov krízových vzoriek, väčšina laboratórií si ich pre svoje podmienky navrhuje sama. Na obr.2 sú typické tvary používaných krízových vzoriek.

Geometriu vzorky je potrebné voliť tak, aby zabezpečovala homogénnu napäťosť (a tým aj deformáciu) v určitej stredovej (najčastejšie kruhovej) oblasti vzorky. Realizuje sa to stenčením tejto oblasti vzorky voči hrúbke ramien (zabezpečí sa tým bezproblémový prenos zaťaženia), alebo vytvorením vrubov v mieste prechodu zo stredovej oblasti do ramien, čo však spôsobuje koncentráciu napäťi a zvyšuje

krížovej vzorky boli snímané pomocou tenzometrických dynamometrov inštalovaných na piestnych tyčiach dvoch na seba kolmých hydraulických valcov. Časové zmeny osových sil boli snímané dynamickou tenzometrickou aparátúrou SPIDER, s využitím meracieho reťazca podľa obr.3. Pre skúšku boli použité krížové vzorky podľa obr.4.

Tvar krížových vzoriek vychádzal z koncepcie Müllera [11] s dvoma rozdielmi. Polomer vrcholu vrubu bol zvolený 5 mm (doporučoval ho aj Müller pre oceľové plechy) a v rameňach vzorky boli (podľa koncepcie Kuwabaru [10]) vytvorené 3 zárezy s tvarom podľa obr.4b. Krížové vzorky s tvarom podľa obr.4 spájajú výhody vzoriek navrhnutých Müllerom a Kuwabarom – spoľahlivé upnutie ramien vzorky s vylúčením ich predčasného porušenia na jednej strane, na druhej strane pre stredovú oblasť zlepšenie rovnomernosti rozloženia napäti (deformácií) a jednoznačnejšia definícia jej účinnej prierezovej plochy pre určenie napäti zo zaťažujúcich sôl.

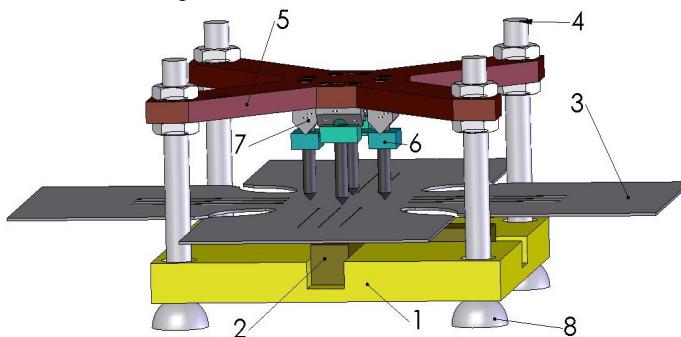


Obr. 3 Merací reťazec tenzometrickej aparátury SPIDER 8

Obr.4 Tvar použitých krížových vzoriek

Pre meranie pomerných deformácií v stredovej oblasti vzorky bol použitý kontaktný biaxiálny extenzometer (obr.5).

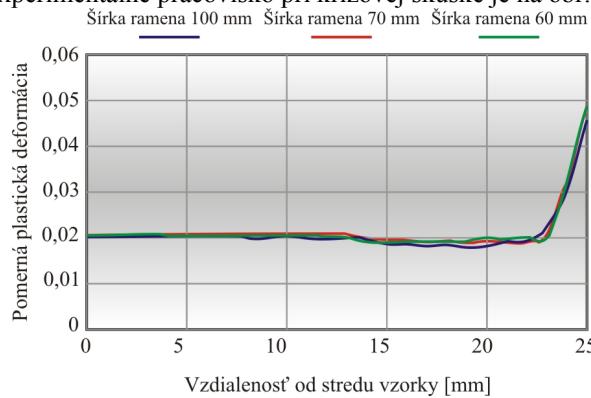
Extenzometer pozostáva z pevne uchytenejho vedenia (1), v ktorom sú pohyblivé šmykadlá (2) slúžiace ako opora pre plech pritlačený hrotmi. Vedenie je uložené pod krížovou vzorkou (3) a štyrmi vodiacimi skrutkami (4) je k nemu pripavený horný rám (5) pre uchytanie pružných členov extenzometra (6). Na pružných členoch sú vytvorené vruby, ktoré spolu s klinmi (7) pevne spojenými s rámom vytvárajú otočné uloženie. Pomocou otočného uchytania vodiacich skrutiek vo vedení (8) je zabezpečené plávanie horného rámu (5) extenzometra pri nežiadúcom pohybe vzorky ako tuhého telesa pri skúške.



Obr.5 Kontaktný biaxiálny extenzometer umiestnený na krížovej vzorke

Využitím MKP (obr.6) bolo zistené, že vo vzorkách podľa obr.4 je pri zaťažení stredová oblasť priemeru cca 30 mm, v ktorej je rovnomerné rozloženie pomerných deformácií. V dôsledku uvedeného bola zvolená vzdialenosť hrotov biaxiálneho extenzometra $\ell = 30$ mm.

Podrobnejší popis jednotlivých častí experimentálneho pracoviska je napr. v [12]. Celkový pohľad na experimentálne pracovisko pri krížovej skúške je na obr.7.



Obr.6 Rozloženie pomerných deformácií na osi symetrie v stredovej oblasti vzorky



Obr.7 Celkový pohľad na experimentálne pracovisko pri krížovej skúške

Po upnutí krížovej vzorky do čeľustí hydraulického zaťažovacieho zariadenia bol na vzorku nainštalovaný kontaktný biaxiálny extenzometer tak, že hroty boli zatlačené do povrchu plechu symetricky vzhľadom k stredu vzorky na osiach symetrie ramien vzorky. Pri zaťažovaní krížovej vzorky sa v dôsledku deformácie jej stredovej oblasti menila vzdialenosť hrotov pružného člena, pričom jeho deformácia bola snímaná odporovými tenzometrami a registrovaná dynamickou tenzometrickou aparátúrou SPIDER. Zaťažovanie vzoriek bolo realizované s konštantným, vopred nastaveným pomerom rýchlosťí piestov.

Pre určovanie počiatku plastickej deformácie plechov pri rovinnej napäťosti bolo použité kritérium maximálnej hodnoty plastickej pomernej deformácie. Podľa tohto kritéria počiatok plastickej deformácie materiálu pri rovinnej napäťosti nastáva vtedy, ak maximálna hodnota pomernej plastickej deformácie dosiahne určitú, vopred definovanú hodnotu ε_K^p . Počiatočná krivka plastickosti je určená napäťami σ_1, σ_2 pri ktorých sú splnené podmienky

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^p &= \varepsilon_K^p & \text{pre} & \quad \varepsilon_1^p > \left| \varepsilon_2^p \right|, \quad \varepsilon_1^p > 0 \\ \varepsilon_2^p &= \varepsilon_K^p & \text{pre} & \quad \varepsilon_2^p > \left| \varepsilon_1^p \right|, \quad \varepsilon_2^p > 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |\varepsilon_1^p| &= \varepsilon_K^p \quad \text{pre} \quad |\varepsilon_1^p| > |\varepsilon_2^p|, \quad \varepsilon_1^p < 0, \\ |\varepsilon_2^p| &= \varepsilon_K^p \quad \text{pre} \quad |\varepsilon_2^p| > |\varepsilon_1^p|, \quad \varepsilon_2^p < 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Krivka určujúca prechod materiálu z pružnej do plastickej oblasti má v diagrame $\varepsilon_1^p, \varepsilon_2^p$ tvar štvorca, pričom vnútorná plocha štvorca charakterizuje pružnú oblasť, plocha mimo štvorca plastickú oblasť. Následné krvky plastickosti sú definované napäťami, pri ktorých sú podmienky (1) splnené pre hodnoty $\varepsilon_{K,j}^p > \varepsilon_K^p$.

Pre experimentálne určovanie krviek plastickosti boli použité za studena valcované plechy produkcie US Steel Košice (tabuľka 1), ktoré sa používajú v automobilovom priemysle pre výrobu dielov karosérií lisovaním za studena.

Za studena valcované plechy použité pri určovaní krviek plastickosti

Tabuľka 1

Označenie USS Košice	Medzinárodná norma	Označenie – medzinárodná norma	Charakteristika ocele/plechu
KOHAL 180	EN 10 130	DC 05	Nízkouhlíková, hliníkom upokojená, extra hlbokoťažná ocel/nepovlakovany plech
KOHAL E 210 IZ	Norma firmy Preussag (Nemecko)	ZstE 220 i	Izotrópna ocel s vyššími pevnostnými vlastnosťami/nepovlakovany plech
ZINKODUR 220 IF	EN 10 292	H 220 YD, H 220 PD	IF ocel legovaná fosforom s vyššími pevnostnými vlastnosťami/pozinkovaný plech

Mechanické vlastnosti hodnotených plechov sú uvedené v tabuľke 2, pričom $R_{e,0}; R_{e,45}; R_{e,90}$ sú medze klzu plechov v smere $0^\circ, 45^\circ$ a 90° k smeru valcovania plechov, $r_0; r_{45}; r_{90}$ - koeficienty normálovej anizotropie v smere $0^\circ, 45^\circ$ a 90° k smeru valcovania plechov (určované pre 5%-nú deformáciu).

Mechanické vlastnosti hodnotených plechov

Tabuľka 2

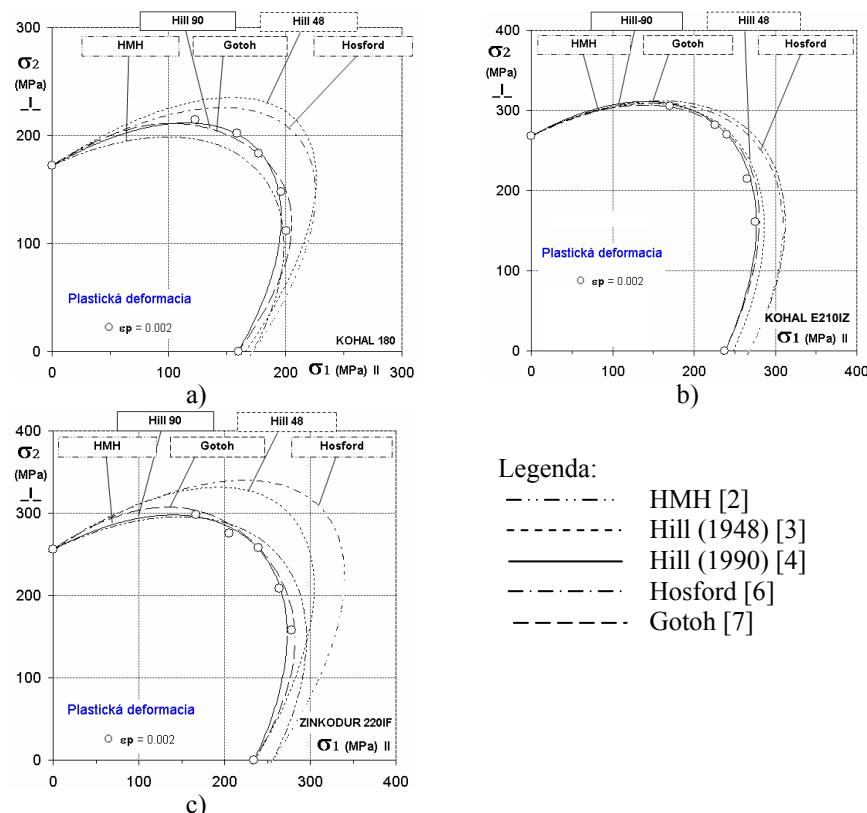
Akosť	Hrubka [mm]	$R_{e,0}$ [MPa]	$R_{e,45}$ [MPa]	$R_{e,90}$ [MPa]	r_0	r_{45}	r_{90}
KOHAL 180	1,00	162	177	172	2,01	1,56	2,21
KOHAL E 210 IZ	1,00	239	254	246	0,86	1,09	1,17
ZINKODUR 220 IF	1,00	235	247	258	1,40	2,02	2,24

Pri meraní bol použitý pomer rýchlosťi piestov hydraulického zaťažovacieho zariadenia 1:5, 1:2, 1:1, 2:1 a 5:1. Experimentálne určené body na krvkách plastickosti (pre $\varepsilon_{\max}^p = 0,002$) sú znázornené na obr.8a) pre plech akosti KOHAL 180, na obr.8b) pre plech akosti KOHAL E 210 IZ a na obr.8c) pre plech ZINKODUR 220 IF. Na uvedených obrázkoch sú súčasne znázornené krvky plastickosti podľa teórie HMH [2], Hilla (1948) [3], Hilla (1990) [4], Hosforda [6] a Gotoha [7].

Ako vyplýva z obr.8 pre akosti KOHAL 180 a ZINKODUR 220 IF Hillova (1948) a Hosfordova teória vysoko nadhodnocuje napäťia spôsobujúce počiatok plastickej deformácie plechov pri rovinnej napäťosti. Hillova (1948) teória, ktorá sa najčastejšie využíva pri modelovaní procesov plastickej deformácie anizotropných materiálov (hlavne pri MKP) pri izotropnej napäťosti udáva hodnoty až o 20% vyššie ako experimentálne určené hodnoty. Pri akosti KOHAL E 210 IZ však Hillova (1948) teória pomerne presne odpovedá nameraným hodnotám. Tento fakt je v zhode s výsledkami Kuwabaru [10] podľa ktorých Hillova (1948) podmienka plastickosti nie

je vhodná pre analýzu počiatku plastickej deformácie plechov s vysokými koeficientami r normálnej anizotropie (rádovo 2,0).

Experimentálne určeným hodnotám najlepšie odpovedá Hillova (1990) podmienka plasticnosti – maximálne rozdiely nepresahujú 5%. Pomerne dobrá zhoda je aj s Gotohovou podmienkou plasticnosti, najmä v okolí izotropnej napätosti. HMH podmienka plasticnosti pre izotropné materiály podhodnocuje (KOHAL 180) resp. nadhodnocuje (KOHAL 210 IZ, ZINKOHAL 220 IF) počiatok plastickej deformácie, pričom maximálna odchýlka je do 10%.



Obr.8 Experimentálne určené body krviek plasticnosti a krvky plasticnosti podľa jednotlivých teórií pre plechy akostí a) KOHAL 180, b) KOHAL E 210 IZ, c) ZINKODUR 220 IF

ZÁVER

Pre určovanie počiatku plastickej deformácie plechov pri rovinnej napäťosti sa v poslednom období využíva krížová skúška. Na experimentálnom pracovisku pozostávajúcim z hydraulického zariadenia pre dvojosové zaťažovanie krížových vzoriek boli s využitím kontaktného biaxiálneho extenzometra určované počatočné krvky plasticnosti plechov využívaných v automobilovom priemysle. Z výsledkov získaných pri hodnotení za studena valcovaných plechov akostí KOHAL 180 (DC 05), KOHAL E 210 IZ (ZstE 220 i) a ZINKODUR 220 IF (H 220 PD) vyplýva

- Hillova (1948) podmienka plasticnosti nadhodnocuje napäťia vyvolávajúce počiatok plastickej deformácie plechov s vysokým koeficientom r normálnej anizotropie (pre r rádovo 2,0). Rozdiel medzi experimentálne a analyticky určenými hodnotami je

až do 20%. Pre plechy s koeficientom normálovej anizotropie $r \doteq 1$ (izotropné plechy) je pomerne dobrá zhoda veličín určených experimentálne a analyticky.

- Experimentálne určeným hodnotám najlepšie odpovedá Hillova (1990) podmienka plasticnosti pre všetky tri akosti plechov – maximálny rozdiel nepresiahol 5%. Pomerne dobrá zhoda je aj s Gotohovou podmienkou plasticnosti, najmä v blízkosti izotropnej napäťosti.
- HMH podmienka plasticnosti pre izotropné materiály nadhodnocuje (KOHAL E 210 IZ, ZINKOHAL 220 IF), resp. podhodnocuje (KOHAL 180) počiatok plastickej deformácie s maximálnou odchýlkou do 10%.

Autori d'akujú Vedeckej grantovej agentúre MŠ SR za podporu v rámci riešenia projektov č.1/1073/04 a č.1/2187/05.

LITERATÚRA

- [1] GAMBIN, W.: *Plasticity and Textures*. Published by Kluver Academic Publisher, Dordrecht, 2001.
- [2] MISES, R.V.: *Mechanics of plastic deformation of crystals 592* (in German), Zeitsch. Angew. Math. Mech., 8, 1928, p. 161-185.
- [3] HILL, R.: *Mathematical theory of plasticity* (in Russian). GITTL, Moskva, 1956.
- [4] HILL, R.: *Constitutive modelling of orthotropic plasticity in sheet metals*, J. Mech. Phys. Solids 38, 1990, 405-417.
- [5] HILL, R. A.: *User-friendly theory of orthotropic plasticity in sheet metals*, Int. J. Mech. Sci. 15, 1993, p. 19-25.
- [6] HOSFORD, W.F.: *A generalised isotropic yield criterion*, J. Appl. Mech. 39, 1972, 607-609.
- [7] GOTOH, M.: *A theory of plastic anisotropy based on a yield function of fourth order*. Int. J. Mech. Sci., 19, 1977, p. 505-520.
- [8] BARLAT, F.; LEGE, D.J.; BREM, J.C.: *A six-component yield function for anisotropic materials*, Int. J. of Plasticity, 7, 1991, p.693-712.
- [9] BANABIC, D. et al.: *A new criterion for anisotropic sheet metals*, 8th Int. Conf. Achievements in the Mechanical and Materials Engineering, Gliwice, 1999, p. 33-36.
- [10] KUWABARA, T., SATOSHI, I., KURODA, K.: *Measurement and analysis of differential work hardening in cold-rolled steel sheet under biaxial tension*. Journal of Materials Processing Technology, 80-81, 1998, p. 517-523.
- [11] MÜLLER, W.: *Beitrag zur Charakterisierung von Blechwerkstoffen unter merachsiger Beanspruchung*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1996.
- [12] ŠIMČÁK, F., TREBUŇA, F., HANUŠOVSKÝ, J.: *Evaluation of Plastic Properties of Sheets in Plane Stress State*. EAN 2005, Skalsky dvůr, ČR, 7.-9.6.2005, p.83-84.
- [13] POLVANI, R.S., REEVE, C.P., VEALE, R.C.: *An optical test method for measuring biaxial deformations*. J.Test.Eval., 13, 1985, p. 69-73.
- [14] ŠIMČÁK, F., PEŠEK, L., HANUŠOVSKÝ, J.; GAZDAG, Š.; RITÓK, J.: *Experimentálne pracovisko pre hodnotenie plastických vlastností plechov pri rovinnej napäťosti*. Acta Mechanica Slovaca, 4, 2003, str. 39-46.
- [15] MAKINDE, A., THIBODEAU, L., NEALE, K. W.: *Desing of a Biaxial Extensometer for Measuring Strains in Cruciform Speciments*. In: Experimental Mechanics, June 1992, p. 132-137.
- [16] BOEHLER, J. P., DEMMERLE, S., KOSS, S.: *A New Direct Biaxial Testing Machine for Anisotropic Materials*. In: Experimental Mechanics, 1994, p. 1-9.
- [17] PLÁNIČKA, F., BOJČUK, L.: *Numerical stress state analysis in a thin-walled tube with a stress riser*. Proceeding of 16th Conference of Computational Mechanics 2000, Nečtiny, 2000