

YIELD CURVES OF SHEETS WITH DIFFERENT PLASTIC ANISOTROPY

KRIVKY PLASTICKOSTI PLECHOV S RÔZNYM STUPŇOM PLASTICKEJ ANIZOTROPIE

František Šimčák,¹ Juraj Hanušovský,² Vladislav Berinštet¹

Abstract: The development of new cold rolled steel sheets with higher strength properties and good formability is in automotive industry provoked by the necessity to increase the carrying capacity of bodyworks together with decreasing of their weight. Isotropic steel sheets have higher strength properties and low coefficients of normal anisotropy which results to different plastic anisotropy than standard low-carbon deep drawing steel sheets. In the paper are compared yield curves of isotropic steel sheets and low-carbon deep drawing steel sheets that were gained on the base of biaxial tensile tests. From the experiments results that for plastic strains to 1.5% the isotropic steel sheets show in plane stress state comparative hardening as the low carbon deep drawing steel sheets. It confirms that they are suitable for forming of automobile parts with small plastic deformation (roof, housing of engine).

Keywords: sheets for automotive industry, plastic anisotropy, biaxial tensile test, hardening.

1. Úvod

Jedným z hlavných cieľov priemyslu je znižovanie spotreby materiálov a energie so snahou redukovať negatívny dopad výroby na životné prostredie. Tieto trendy sú spojené so zvyšovaním využívania tenkostenných nosných prvkov pre výrobu ktorých sa najčastejšie používajú oceľové plechy.

Inovácia ocele, ako materiálu pre výrobu plechov, sa najvýraznejšie prejavila v automobilovom priemysle. Zvyšovanie únosnosti karosérií automobilov pri súčasnom znižovaní ich hmotnosti sa realizovalo vývojom nových ocelí s vyššími pevnostnými vlastnosťami tak, aby plechy spracovávané lisovaním za studena mali aj dobré plastické vlastnosti [6]. Spolupráca oceliarskeho a automobilového priemyslu sa realizovala prostredníctvom spoločných projektov ULSAB (Ultra-Light Steel Auto Body), ULSAC (Ultra-Light-Steel Auto Closures), ULSAS (Ultra Light Steel Auto Suspensions) a ULSAB-AVC (Ultra-Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts) [11].

Pri spracovaní plechov lisovaním je dôležité identifikovať podmienky pre začiatok plastickej deformácie. Keďže značná časť povrchových dielov karosérie (strecha, kryt motora a pod.) sa lisuje s malým stupňom plastickej deformácie je dôležité poznať správanie sa materiálu plechu pri rozvoji malých plastických deformácií. Valcovanie plechov za studena mení štatisticky náhodné usporiadanie kryštálov na ich usporiadanie s prednostnou orientáciou. V dôsledku uvedeného sa pri plastickej deformácii plechov prejavuje plastická anizotropia, ktorú musíme pri analýze zohľadniť.

¹ prof. Ing. František Šimčák, CSc., Strojnícka fakulta TU v Košiciach, KAMaM, Letná 9, 042 00 Košice, tel.: +421556022458, frantisek.simcak@tuke.sk, Ing. Vladislav Berinštet, 0556022584, vladislav.berinstet@tuke.sk

² Ing. Juraj Hanušovský, Sauer-Danfoss, Považská Bystrica, jhanusovsky@sauer-danfoss.com

Cieľom príspevku je, využitím experimentálnych metód mechaniky, porovnať plastické vlastnosti plechov s odlišným stupňom plastickej anizotropie pri malých plastických deformáciách pre prípad rovinnej napätosti.

2. Plastická anizotropia plechov

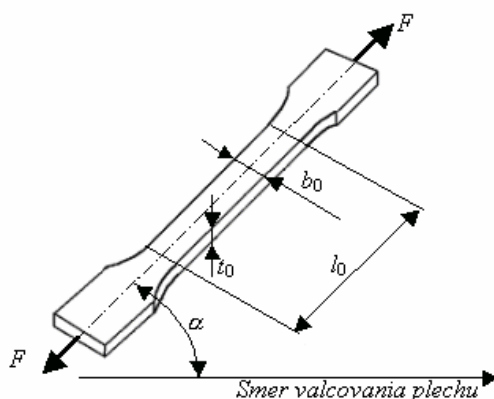
Plastická anizotropia plechov je charakterizovaná normálovou anizotropiou ktorá udáva rozdielnosť plastických vlastností materiálu v rovine plechu vzhľadom k plastickým vlastnostiam materiálu v smere kolmom na rovinu plechu (v smere hrúbky). Normálová anizotropia je definovaná súčiniteľom normálovej anizotropie r , pričom

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_t} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{b l}{b_0 l_0}}, \quad (1)$$

kde t_0 , b_0 , l_0 je hrúbka, šírka, dĺžka meranej časti vzorky pred skúškou (obr. 1),

t , b , l – hrúbka, šírka, dĺžka meranej časti vzorky pri dosiahnutí predpísanej rovnomernej plastickej deformácie (pri hlbokotážných plechoch cca 20%),

φ_b , φ_t – logaritmicke pomerné deformácie v smere šírky a hrúbky vzorky



Obr. 1. Vzorka plechu pre jednoosovú ťahovú skúšku

Rozmery používaných vzoriek ako aj podmienky skúšky sú podrobne uvedené v norme STN 420435. Hodnoty súčiniteľa normálovej anizotropie r získané skúškami môžu byť porovnané iba pri rovnakom predĺžení vzorky. Zvyčajne sa pre porovnanie používajú hodnoty súčiniteľa r získané pri predĺžení 20%. Moderné ťahové skúšobné zariadenia vykonávajú okamžité merania rozmerov potrebných pre určenie súčiniteľa normálovej anizotropie a počítajú tento súčiniteľ počas skúšky.

Pokusy ukázali, že hodnoty súčiniteľa normálovej anizotropie r závisia od orientácie vzorky v rovine plechu. Ak je ťahová vzorka orientovaná tak, že jej pozdĺžna os zvierá so smerom valcovania uhol α (obr. 1), súčiniteľ normálovej anizotropie označujeme r_α , pričom dolný index určuje uhol medzi osou vzorky a smerom valcovania.

Priemer zo súčiniteľov r v rôznych smeroch roviny plechu určuje tzv. priemerný (stredný) súčiniteľ normálovej anizotropie r_s . Ak poznáme hodnoty súčiniteľov normálovej anizotropie r_0 , r_{45} a r_{90} , stredný súčiniteľ normálovej anizotropie r_s vypočítame zo vzťahu

$$r_s = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}). \quad (2)$$

Plošná anizotropia súčiniteľa normálovej anizotropie plechu je určená výrazom

$$\Delta r = \frac{1}{2} (r_0 + r_{90} - 2r_{45}). \quad (3)$$

Pre plechy valcované za studena platí, že čím vyššia je stredná hodnota súčiniteľa normálovej anizotropie r_s a čím nižšia je hodnota plošnej anizotropie Δr , tým je plech vhodnejší pre spracovanie lisovaním za studena. Vysoká hodnota súčiniteľa normálovej anizotropie r_s je však pri plechoch z nízkouhlíkových ocelí spojená s vysokou hodnotou plošnej anizotropie Δr .

Typickým predstaviteľom plechov s vysokou hodnotou stredného súčiniteľa normálovej anizotropie je akosť DC05 (KOHAL 180 – označenie US Steel Košice) z nízkouhlíkovej ocele. Typické chemické zloženie, ako aj hodnoty mechanických vlastností plechu sú v tab. 1.

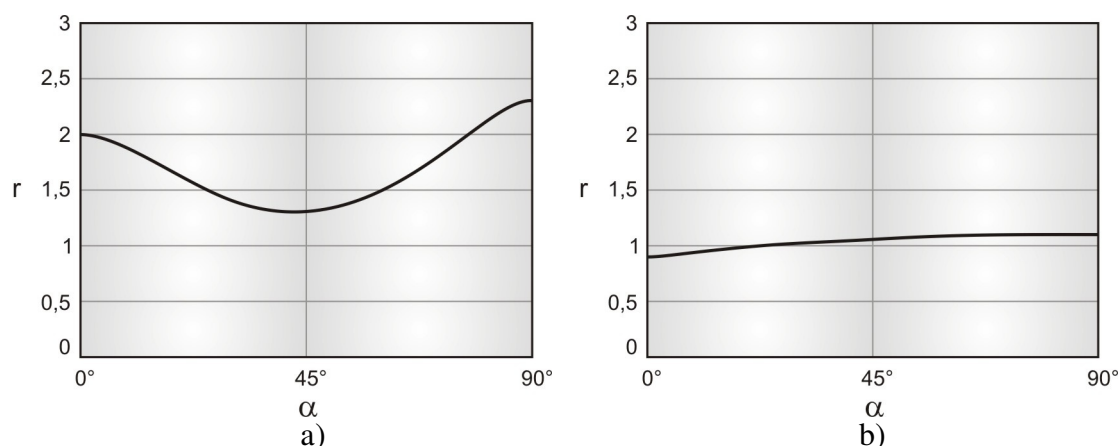
Pre určenie r_s a Δr sme uvažovali $r_0 = 1,70$, $r_{45} = 1,40$. Vzhľadom na veľmi dobré plastické vlastnosti sa plechy akosti KOHAL 180 používajú pre najzložitejšie výlisky. Ako vyplýva z tab. 1, za studena valcované plechy KOHAL 180 sa vyznačujú vysokou hodnotou plošnej anizotropie Δr a súčiniteľa normálovej anizotropie r . Anizotropia plechu je spôsobená prednostným usporiadaním kryštálov v kryštalickej mriežke v dôsledku valcovania za studena a následného rekryštalizačného žihania [7].

Akosť	Chemické zloženie [%]						
	C	Mn	Si	P	S	Al	N
	0,03	0,15	0,01	0,008	0,006	0,04	0,005
KOHAL 180 (DC 05 – EN 10130)	Mechanické vlastnosti (v smere kolmom na smer valcovania)						
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n	r_s	Δr
	170	300	44	2,30	0,22	1,70	0,60

Tab. 1. Typické chemické zloženie a mechanické vlastnosti plechov akosti KOHAL 180

V kubickej, priestorovo-centrovanej mriežke mäkkej ocele je najvyššia pevnosť v smere $\langle 111 \rangle$, menšia v smere $\langle 110 \rangle$ a najmenšia v smere $\langle 100 \rangle$. S cieľom zabezpečiť vysokú hodnotu r je snaha dosiahnuť vysoký podiel orientácie kryštálov $\langle 111 \rangle$ v smere normály plechu. Hliníkom upokojené nízkouhlíkové ocele sú charakterizované tým, že pri valcovaní za studena sa nitridy hliníka usporiadávajú pozdĺž deformovaných zŕn. Pri následnom rekryštalizačnom žhaní sa potom zachováva pretiahlý tvar zrna (tzv. pancake štruktúra), ktorý je sprevádzaný vysokou hodnotou Δr . Zvyšovanie hodnoty r je možné viacerými spôsobmi (čistota ocele, režim valcovania na teplej a studenej valcovni, rekryštalizačné žhanie), stále má však za následok zvyšovanie Δr , čo má negatívny vplyv pri spracovaní plechov lisovaním za studena (ušatenie, rozdielne mechanické vlastnosti v rovine plechu).

Na obr. 2a je typická závislosť súčiniteľa normálovej anizotropie r na uhle α pre akosť KOHAL 180 produkcie US Steel Košice.



Obr. 2. Závislosť $r = r(\alpha)$. a) akosť KOHAL 180, b) akosť KOHAL E 210 IZ

Začiatkom deväťdesiatych rokov dvadsiateho storočia zaviedla firma Preussag (Nemecko) do výroby za studena valcované plechy s nízkou plošnou anizotropiou Δr súčiniteľa normálnej anizotropie r (odtiaľ vyplýva názov izotropna oceľ). Kváziizotropné vlastnosti sú zabezpečené legovaním titánom, ktoré spôsobuje zjemnenie štruktúry a tým zvýšenie pevnostných vlastností. V tab. 2 je uvedené typické chemické zloženie a hodnoty mechanických vlastností za studena valcovaných plechov KOHAL E210 IZ z izotropnej ocele.

Akosť	Chemické zloženie [%]							
	C	Mn	Si	P	S	Al	N	Ti
	0,04	0,15	0,01	0,008	0,005	0,040	0,006	0,030
KOHAL E 210 IZ (ZSTE 220i – norma Preussag)	Mechanické vlastnosti (v smere kolmom na smer valcovania)							
	$R_{p\,0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r	n	r_s	Δr	
	250	350	37	1,10	0,21	1,00	-0,1	

Tab. 2. Typické chemické zloženie a mechanické vlastnosti plechov akosti KOHAL E210 IZ

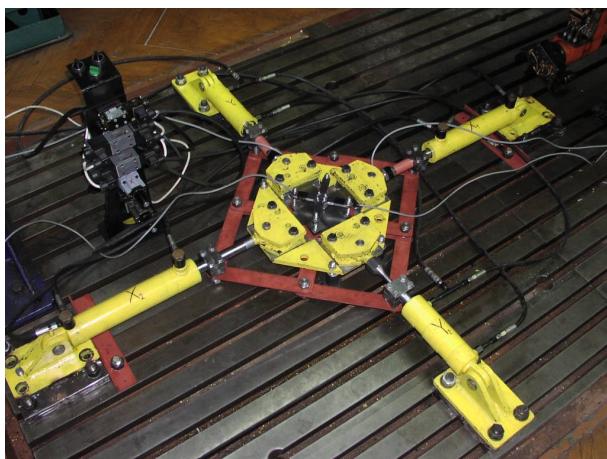
Pre určenie r_s a Δr sme uvažovali $r_0 = 0,80$, $r_{45} = 1,05$. Vidíme, že plechy sa vyznačujú nízkymi hodnotami r (okolo jedna). Nízka hodnota Δr charakterizuje kváziizotropne správanie sa materiálu pri plastickej deformácii plechov. Napr. pri lisovaní kruhových dielcov materiál tečie rovnomerne vo všetkých smeroch a na dielci nevznikajú uši. Príčinou kváziizotropných vlastností týchto plechov je vyviazanie dusíka v oceli na nitrídy titánu, pričom ako optimálny sa javí pomer $Ti / N = 4$ až 6 . Z textúrnych rozborov vyplynulo, že po valcovaní za studena sa deformačná textúra plechov KOHAL E 210 IZ neodlišuje od deformačnej textúry plechov KOHAL 180. Rekryštalizačná textúra plechov KOHAL E 210 IZ, na rozdiel od plechov KOHAL 180, nemá prednostné usporiadanie kryštálov, pričom zastúpenie jednotlivých textúrnych zložiek je rovnomerné [8].

Plechy KOHAL E 210 IZ z izotropných ocelí patria do skupiny plechov s vyššími pevnostnými vlastnosťami, pričom sa vyznačujú veľmi dobrými plastickými vlastnosťami, hlavne pri vypínaní (vysoká hodnota n). Kváziizotropne vlastností pôsobia pozitívne aj pri lisovaní hlbokým ťahaním (nevznikajú cípy). Využitie plechov z izotropných ocelí je hlavne v automobilovom priemysle pre výrobu nosných prvkov povrchových dielov automobilových karosérií. Typická závislosť súčiniteľa normálnej anizotropie r na uhle α pre akosť KOHAL E 210 IZ produkcie US Steel Košice je na obr. 2b.

3. Metodika skúšok, dosiahnuté výsledky

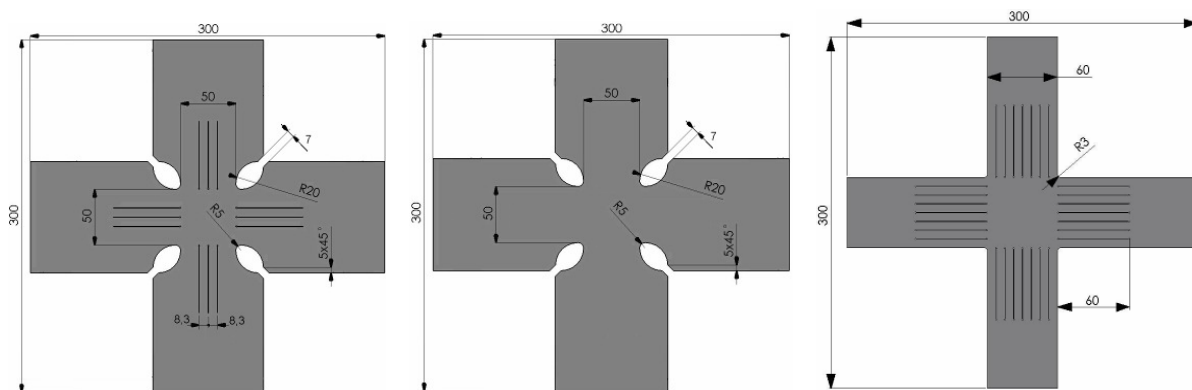
Podmienky pri splnení ktorých sa materiál dostáva do plastického stavu (začína plastická deformácia) nazývame začiatkové podmienky plasticity, pri spevňovaní materiálu počas jeho plastickej deformácie hovoríme o následných (okamžitých) podmienkach plasticity [1,10]. Podmienky plasticity ktorých grafickým vyjadrením sú pri rovinnej napätosti krivky plasticity sa určujú analyticky alebo experimentálne [2]. Pri experimentálnom určovaní kriviek plasticity sa najčastejšie využíva krížová skúška pri ktorej je vzorka plechu vhodného tvaru namáhaná nezávisle v dvoch navzájom kolmých smeroch tak, že sa v stredovej oblasti vzorky dosahuje vopred definovaná rovinná napätosť [5].

Pre experimentálne určovanie kriviek plasticity boli využité krížové skúšky realizované na experimentálnom pracovisku (obr. 3) pozostávajúcom z hydraulického zariadenia pre dvojsové zaťažovanie krížových vzoriek a z biaxiálneho extenzometra pre snímanie deformácie krížovej vzorky pri dvojsovom ťahovom zaťažení. Hodnoty zaťažujúcich síl, pôsobiacich na ramená krížovej vzorky boli snímané pomocou tenzometrických dynamometrov inštalovaných na piestnych tyčiach dvoch na seba kolmých hydraulických valcov. Podrobnejší popis jednotlivých častí experimentálneho pracoviska je uvedený v [9].



Obr. 3. Experimentálne pracovisko pre krížové skúšky

Pri experimentoch boli overené rôzne tvary krížových vzoriek (obr. 4).



Obr. 4. Tvary krížových vzoriek použitých pri experimentoch

Pre určovanie počiatkových a následných kriviek plasticity pri rovinnej napätosti bolo použité kritérium konštantnej hodnoty mernej práce pri plastickej deformácii. Podľa tohto kritéria začiatok plastickej deformácie materiálu pri rovinnej napätosti nastáva vtedy, ak hodnota práce W^P vnútorných síl na jednotku objemu pri plastickej deformácii (merná

plastická práca) dosiahne určitú, vopred definovanú hodnotu W_K^p . Merná plastická práca je pre prípad rovinnej napätosti určená vzťahom

$$W^p = \int_0^{\varepsilon_1^p} \sigma_1 d\varepsilon_1^p + \int_0^{\varepsilon_2^p} \sigma_2 d\varepsilon_2^p, \quad (4)$$

pričom hodnoty napätí a deformácií prináležia k tomu istému časovému okamžiku.

Z podmienky

$$W^p = W_K^p, \quad (5)$$

môžeme, pri známych časových závislostiach $\sigma_j = \sigma_j(t)$, $\varepsilon_j^p = \varepsilon_j^p(t)$ určiť dvojice napätí σ_1 , σ_2 pre definovaný začiatok plastickej deformácie. Toto kritérium zaviedol Kuwabara [3,4], pričom krivky plasticity nazval „vrstevnice plastickej práce“ (merná plastická práca na každej krivke plasticity je konštantná). Aby sa zachovala kontinuita medzi jednoosou a krížovou skúškou Kuwabara navrhol, aby hodnota W_K^p bola určovaná z jednoosovej ťahovej skúšky plechov, ktoré sa v zmysle japonských noriem realizujú na vzorkách v smere valcovania. Potom platí

$$W_K^p = \int_0^{\varepsilon_{0,K}^p} \sigma_0 d\varepsilon_0^p, \quad (6)$$

pričom môžeme voľiť $\varepsilon_{0,K}^p = 0,002$ v zhode s definovaním medze klzu pri jednoosovom namáhaní.

Keďže európske normy predpisujú jednoosové ťahové skúšky plechov na vzorkách odoberaných v kolmom smere na smer valcovania, pri zostrojovaní začiatočných kriviek plasticity bol využitý vzťah

$$W_K^p = \int_0^{\varepsilon_{90,K}^p} \sigma_{90} d\varepsilon_{90}^p, \quad (7)$$

pri voľbe $\varepsilon_{90,K}^p = 0,002$.

Pre následné krivky plasticity sa volia pre určenie $W_{K,j}^p$ príslušné hodnoty plastických pomerných deformácií $\varepsilon_{90,K,j}^p$. Napätia v kruhovej stredovej oblasti vzoriek priemeru 30 mm boli považované za konštantné, pričom ich hodnoty boli určované z hodnôt síl pôsobiacich v ramenách vzoriek a spolupôsobiacich prierezových plôch určených využitím MKP.

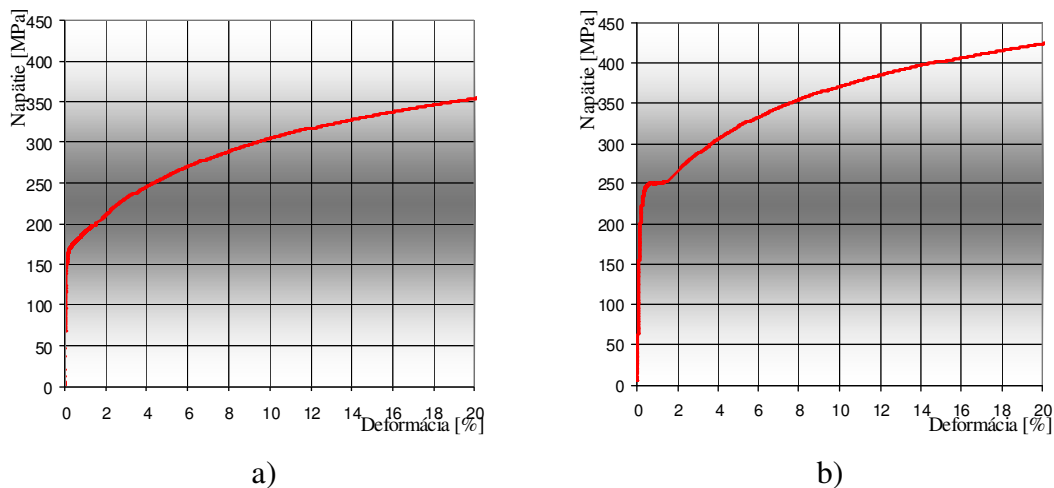
Pre experiment boli použité za studena valcované plechy KOHAL 180 a KOHAL E210 IZ produkcie US Steel Košice s mechanickými vlastnosťami podľa tab. 3.

Materiál	Hrúbka [mm]	Smer	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	$r_{(20)}$	n	$r_{(5)}$
KOHAL 180	1,00	0°	162	302	44	1,85	0,23	2,01
		45°	177	312	43	1,55	0,22	1,56
		90°	172	300	42	2,15	0,22	2,21
KOHAL E 210 IZ	1,00	0°	239	353	37	0,91	0,20	0,86
		45°	254	352	38	1,03	0,20	1,09
		90°	267	358	38	1,09	0,20	1,17

Tab. 3. Mechanické vlastnosti hodnotených plechov.

Veličiny $r_{(20)}$ a $r_{(5)}$ pritom udávajú hodnoty súčiniteľov normálovej anizotropie pre deformáciu 20% a 5%.

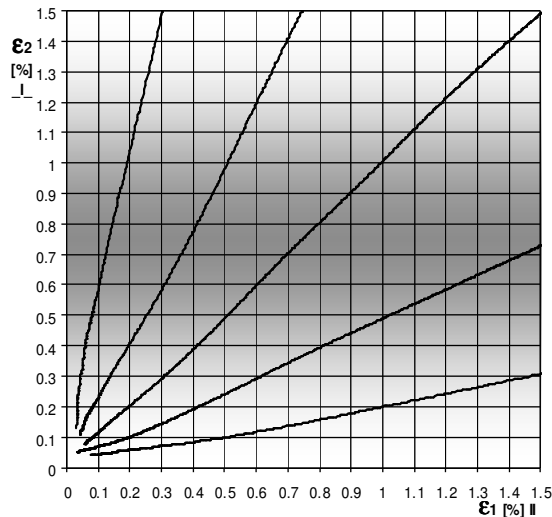
Na obr.5 sú uvedené typické skutočné ťahové diagramy plechov akosti KOHAL 180 (obr.5a) a KOHAL E 210 IZ (obr. 5b). Ako vyplýva z obrázkov, kým plech akosti KOHAL 180 v oblasti malých plastických deformácií (do 1,5%), vykazuje výrazné spevnenie, akosť KOHAL E 210 IZ je v tejto oblasti plastických deformácií v podstate bez spevnenia.



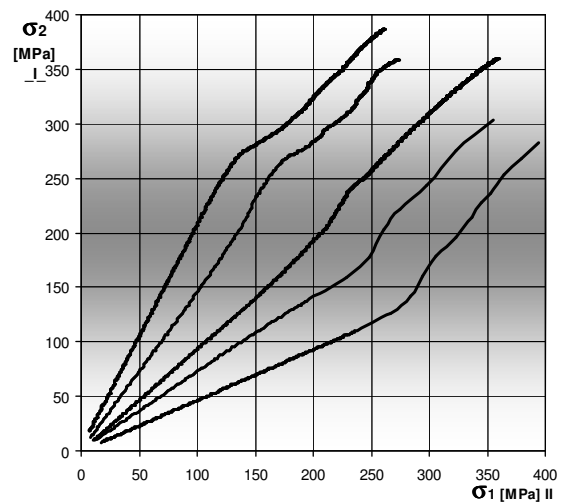
Obr. 5. Ťahové diagramy plechov a) akosť KOHAL 180, b) akosť KOHAL E 210 IZ

Pri experimente boli ramená krížových vzoriek zaťažované pri konštantných pomeroch 1:5, 1:2, 1:1, 2:1, 5:1 rýchlostí piestov zaťažovacieho hydraulického zariadenia. Na obr. 6a sú typické závislosti $\varepsilon_2 = \varepsilon_2(\varepsilon_1)$ pre zvolené pomery rýchlostí a na obr. 6b sú typické závislosti $\sigma_2 = \sigma_2(\sigma_1)$.

Na obr. 7 sú znázornené experimentálne určené body kriviek plasticity pre akosti KOHAL 180 a KOHAL E 210 IZ. Začiatkové krivky plasticity sú určené pre pomernú plastickú deformáciu 0,2%, následné krivky plasticity pre pomerné plastické deformácie 0,5%; 1% a 1,5%.



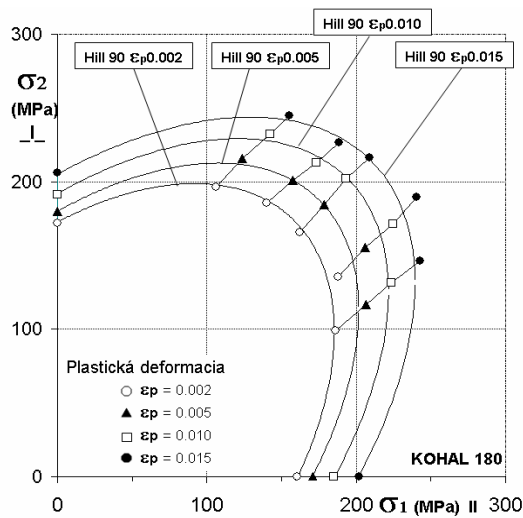
a)



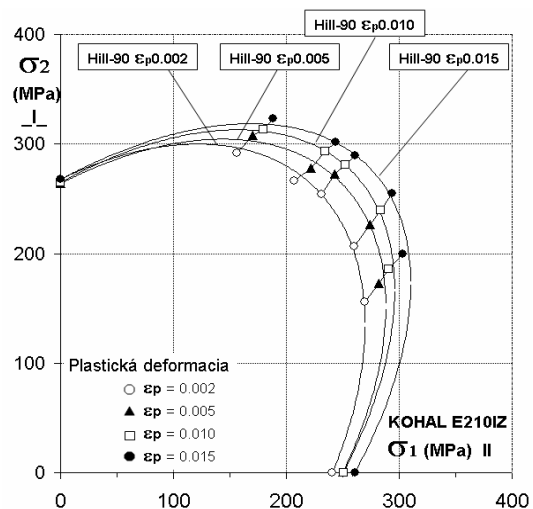
b)

Obr. 6. Závislosti. a) $\varepsilon_2 = \varepsilon_2(\varepsilon_1)$, b) $\sigma_2 = \sigma_2(\sigma_1)$

Na obr. 7 sú súčasne znázornené analyticky určené krivky plasticity podľa Hillovej teórie (1990) [2].



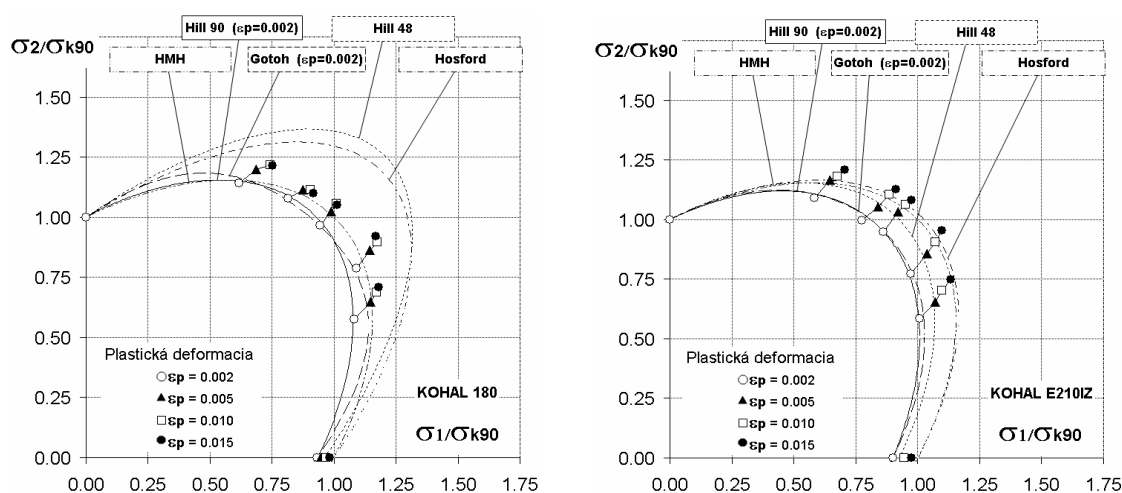
a)



b)

Obr. 7. Experimentálne určené body kriviek plasticity a) KOHAL 180, b) KOHAL E 210 IZ

Na obr. 8 sú v súradniciach σ_1/σ_{k90} a σ_2/σ_{k90} znázornené experimentálne určené body pre jednotlivé akosti plechov podľa kritéria konštantnej hodnoty mernej práce pri plastickej deformácii pre hodnoty $\varepsilon_K^p = 0,002; 0,005; 0,010$ a $0,015$. Veličina σ_{k90} pritom predstavuje napätie prislúchajúce jednotlivým hodnotám ε_K^p určeným pri ťahovej skúške vzorky kolmo na smer valcovania. Na obr.8. sú súčasne znázornené analytické krivky plasticity podľa HMH teórie, Hilla (1948), Hosford-Backofena a pre $\varepsilon_K^p = 0,002$ aj podľa Hilla (1990) a Gotoha. Využitie uvedeného súradnicového systému umožňuje posúdiť vplyv typu rovinnej napätosti na veľkosť spevnenia materiálov plechov s plasticou deformáciou.



Obr. 8. Experimentálne určené body kriviek plasticity zobrazené v pomeroch napätia $\sigma_1/\tilde{\sigma}_{k90}$, $\sigma_2/\tilde{\sigma}_{k90}$ a) KOHAL 180, b) KOHAL E 210 IZ

4. Záver

V príspevku sú uvedené výsledky experimentálneho určovania kriviek plasticity plechov s odlišným stupňom plastickej anizotropie pri využití krížovej skúšky. Stupeň plastickej anizotropie je pritom charakterizovaný súčiniteľmi normálovej anizotropie plechov.

Na základe hodnotenia plechov valcovaných za studena akosti KOHAL 180 a KOHAL E 210 IZ produkcie US Steel Košice je možné konštatovať nasledovné

- Plechy akosti KOHAL 180 a KOHAL E 210 IZ sa podstatne odlišujú hodnotami súčiniteľov normálovej anizotropie. Akosť KOHAL 180 sa vyznačuje vysokými hodnotami súčiniteľov normálovej anizotropie ($r_s = 1,835$, $\Delta r = 0,55$), naopak plech z izotropnej ocele KOHAL E 210 IZ vykazuje nízke hodnoty súčiniteľov normálovej anizotropie ($r_s = 1,053$, $\Delta r = -0,075$).
- Pri ťahovej skúške v oblasti plastickej deformácie do 1,5% vykazuje plech akosti KOHAL 180 spevnenie cca 40 MPa, plech akosti KOHAL E 210 IZ spevnenie rádovo jednotky MPa.
- Pri izotropnej napätosti je spevnenie plechov obidvoch akostí pri pomernej plastickej deformácii do 1,5% v podstate rovnaké. To dokazuje, že plechy KOHAL E 210 IZ s nízkym súčiniteľom normálovej anizotropie r a s malým spevnením pri jednoosovej napätosti vykazujú pri rovinnej napätosti porovnateľný nárast napätí s plastickej deformáciou ako špeciálne hlbokoťažné plechy KOHAL 180. To umožňuje ich výhodné použitie pri lisovaní dielov automobilových karosérií s malým stupňom plastickej deformácie (strecha, kryt motora).

Pod'akovanie: Autori ďakujú vedeckej grantovej agentúre VEGA MŠ SR za podporu v rámci riešenia projektov č.1/2187/05 a č.1/4163/07.

Literatúra

- [1] Gambin, W.: *Plasticity and Textures*. Published by Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 2001.
- [2] Hanušovský, J., Šimčák, F.: *The progress of yield criteria for anisotropic sheet metals*. Acta Mechanica Slovaca, 2005, 1, 57-68.

- [3] Kuwabara, T., Ikeda, S., Kuroda, K.: *Measurement and Analysis of Work Hardening of Sheet Metals Under Plane – Strain Tension*. In: Journal of Materials Processing Technology, 1998, 517-523.
- [4] Kuwabara, T.; Van Bael, A.V., Izuka, E.: *Measurements and analysis of yield locus and work hardening characteristics of steel sheets with different r-values*. Acta Materiala 50, 2002, 3717-3729.
- [5] Müller, W.: *Beitrag zur Charakterisierung von Blechwerkstoffen unter Merachsiger Beanspruchung*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1996
- [6] Šimčák, F.: *Inovačné trendy pri zvyšovaní únosnosti karosérií automobilov*. Acta Mechanica Slovaca, 2003, 1, 13-24.
- [7] Šimčák, F a kol.: *Vývoj plechov ťažných akostí so špeciálnymi úžitkovými vlastnosťami*. Záverečná správa výskumnej úlohy P4-23/1. VSÚ USSteel, Košice, 2000.
- [8] Šimčák, F a kol.: *Vývoj plechov valcovaných za studena z izotropných ocelí*. Záverečná správa výskumnej úlohy P4-14/4. VSÚ US Steel, Košice, 1998.
- [9] Šimčák, F., Hanušovský, J., Berinštet, V.: *Experimentálne určovanie kriviek plasticity plechov krížovou skúškou*. Acta Mechanica Slovaca. 2006, 1, 535-542.
- [10] Trebuňa, F., Šimčák, F.: *Odolnosť prvkov mechanických sústav*. Emilena, Košice, 2005.
- [11] <http://www.worldautosteel.org/index.htm/>