
Porovnanie charakteristík tváriteľnosti vysokopevných dvojfázových ocelí skúškou ťahom a LDH skúškou

Miroslav Tomáš, doc. Ing., PhD.*

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice
E-mail: miroslav.tomas@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3524

Juliy Martyn Kulya, Ing.

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice
E-mail: juliy.martyn.kulya@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3528

Vladimír Kokarda, Ing.

Carl Zeiss Slovakia, s.r.o - ZEISS Industrial Quality Solutions, Bratislava, Slovakia
Račianska 12481/77/A, 831 02 Bratislava
E-mail: vladimir.kokarda@zeiss.com, Tel.: + 421 2 554 226 61

Emil Evin, prof. Ing., CSc.

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice
E-mail: emil.evin@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3547

Comparison of the formability parameters of high-strength dual phase steels by tensile test and Limit Dome Height test

Abstract: The paper deals with the issue of formability evaluation of high-strength dual phase steels *DP800* and *DP1000* with a thickness of 1.6 mm. These steels are used for automotive body deformation zones. The material formability was evaluated by tensile testing with evaluation of mechanical properties, normal anisotropy ratio and strain hardening exponent. The process formability of steels was evaluated by *LDH* test, which is used for different deformation states modelled by the specimen width. The results of the *LDH* parameter achieved were correlated with the measured material formability parameters.

Keywords: formability, dual phase, *LDH* test, mechanical properties

ÚVOD

Použitie *AHSS* ocelí pre štrukturálne diely karosérie automobilov, najmä v ich deformačných zónach sa v poslednom desaťročí stáva štandardom. Je to vynútené aj požiadavkami na znižovanie hmotnosti automobilov s cieľom redukcie emisií pri súčasnom zvyšovaní bezpečnosti pasažierov. Z tohto dôvodu sa čoraz častejšie využívajú vyššie pevnosti *AHSS* ocelí. Zvýšenie pevnosti ocele umožňuje použitie menšej hrúbky plechu pre lisované diely. Dvojfázové ocele sa bežne používajú v niektorých častiach karosérie pre ich dobrú kombináciu pevnosti a ťažnosti a nízke výrobné náklady [1, 2].

Tváriteľnosť (lisovateľnosť), definovaná ako schopnosť zmeny tvaru plechu pri tvárnení (lisovaní) bez porušenia materiálu, závisí od niekoľkých vzájomne sa ovplyvňujúcich faktorov [3, 4]. *Mielnik* klasifikuje celkovú tváriteľnosť ako materiálovú a procesovú zložku [5]. Tváriteľnosť materiálu možno testovať skúškami, ktoré spočívajú v jednoduchej skúške ťahom alebo tlakom. Procesová tváriteľnosť zahŕňa niekoľko faktorov závislých od procesu (napätovo-deformačný stav) v kombinácii s vlastnosťami materiálu. Vzhľadom na rôzne rozloženie napätia a deformácie v každej oblasti lisovanej súčiastky neexistuje jednotný skúšobný postup, ktorý by testoval tváriteľnosť jednoduchým

spôsobom. Používajú rôzne skúšky - *Erichsenova*, *Engelhardtova*, skúška medznej výšky výťažku (*LDH test*), kalíškovacia skúška (*cup test*) a pod. [3-6].

Skúška medznej výšky výťažku - *Limit Dome Height (LDH)*, ktorú zaviedol *Ghosh* a modifikoval *Hecker*, bola vyvinutá na simuláciu podmienok porušenia pri rovinnnej deformácii, ktorú *Hecker* identifikoval ako príčinu viac ako 80 % porúch pri lisovaní [7, 8]. Okrem toho bola skúška modifikovaná tak, aby boli použité pásy plechu s rôznou šírkou, hrúbkou materiálu a laserom zvárané rôznorodé materiály (*TWB*). *Sahu* a kol. [9] použili *LDH* skúšku na štúdium deformačných vlastností veľmi tenkého mosadzného plechu. Modelovali dvojsový, rovinný a jednoosový priebeh deformácie zmenšením rozmerov nástroja a vzorky. *Kuramae* a kol. [10] vykonali modifikovanú *LDH* skúšku, kde porovnali výsledky *FE* predpovede lomu so skúškou *LDH* vykonanou pomocou ťažníka s plochou hlavou pre rôzne podmienky priebehu deformácie. *Katragadda* a kol. [11] vykonali *LDH* skúšku pre rôzne druhy ocele používané v automobilovom priemysle. Výsledky experimentov porovnali so simuláciami. *Bandyopadhyay* a kol. [12] vykonali skúšky tvárniteľnosti pre laserové zvárané polotovary na mieru z rôznorodých materiálov (*DP980/DP600* a *DP980/IFHS*). Zistili, že pokles tvárniteľnosti pri *LDH* skúške a *Erichsenovej* kalíškovacej skúške mal približne podobný trend, a preto veľkosť ťažníka mal menší vplyv.

Cieľom príspevku je porovnať výsledky skúšok *LDH* dosiahnutých experimentálne pri skúšaní dvoch akostí dvojfázovej ocele – *DP800* a *DP1000* a ich výsledok korelovať s hodnotami mechanických vlastností meraných skúškou ťahom.

1 METODIKA EXPERIMENTOV

1.1 Experimentálny materiál

Tvárniteľnosť dvojfázovej vysokopevnej ocele dvoch akostí *DP800* a *DP1000* o hrúbke 1,6 mm bola hodnotená skúškou *LDH*. Parametre materiálovej tvárniteľnosti - mechanické vlastnosti (medza klzu, pevnosť v ťahu, ťažnosť) experimentálneho materiálu boli testované podľa normy *ISO 6892-1*, súčiniteľ normálovej anizotropie podľa normy *ISO 10113* a exponent deformačného spevnenia podľa normy *ISO 10275* [4, 13]. Vzorky na mechanické skúšky boli odobrané v smere valcovania 0°, 45° a 90°. V každom smere boli merané tri vzorky a priemerné hodnoty sú uvedené v tab. 1 pre akosť *DP800* a v tab. 2 pre akosť *DP1000*. Skúšky boli realizované na skúšobnom stroji *TIRAtest 2300* vybavenom pozdĺžnym a priečnym extenzometrami s presnosťou 0,001 mm. Súčiniteľ normálovej anizotropie bol vyhodnotený pri hodnote rovnomerného predĺženia a exponent deformačného spevnenia bol

vyhodnocovaný v oblasti rovnomernej plastickej deformácie 5 % až po rovnomerné predĺženie.

Tab. 1. Parametre materiálovej tvárniteľnosti dvojfázovej ocele akosti *DP800*

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r [-]	n [-]	K [MPa]
0°	527	828	19,9	0,873	0,126	1219
45°	508	830	18,2	0,907	0,125	1223
90°	496	838	18,4	0,979	0,123	1229

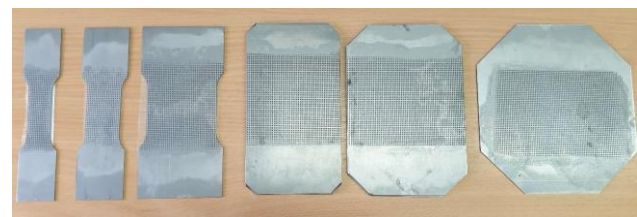
Tab. 2. Parametre materiálovej tvárniteľnosti dvojfázovej ocele akosti *DP1000*

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r [-]	n [-]	K [MPa]
0°	740	1051	13,5	0,731	0,114	1525
45°	739	1033	13,2	0,859	0,113	1495
90°	765	1058	10,0	0,771	0,104	1496

Pozn: $R_{p0,2}$ – medza klzu, R_m – pevnosť v ťahu, A_{80} – rovnomerná ťažnosť, r – celková ťažnosť, r – súčiniteľ normálovej anizotropie, n – exponent deformačného spevnenia, K – pevnosť materiálu pri $\varphi = 1$.

1.2 LDH skúška

LDH skúška je metóda používaná na určenie tvárniacich vlastností plechu, resp. tvárniteľnosti plechov a je porovnateľná s *Nakajima* skúškou. Pologulový ťažník namáha upnutú vzorku až do porušenia. Skúška sa vykonáva na vzorkách s rôznou šírkou. Pre každú vzorku sa určí maximálna dosiahnuteľná dráha. Experimenty boli realizované na skúšobnom stroji *Erichsen 145-60* so súpravou nástrojov *Nakajima*. V rámci experimentov boli použité polotovary so šírkou 26, 39 (38), 70 (77), 108, 133 a 196 mm - obr. 1. Pre elimináciu trenia medzi ťažníkom a polotovarom bola použitá *PTFE* fólia a hrúbke 0,2 mm. Vzorky boli pridržiavané silou 300 kN.



Obr. 1. Tvar a rozmery polotovarov pre LDH skúšku

3 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY A DISKUSIA

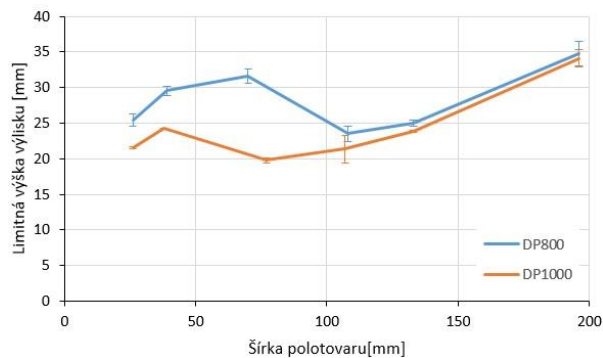
Výsledky merania maximálnych síl a dráhy do porušenia vzorky pre jednotlivé šírky vzoriek sú uvedené v tab. 3 pre materiál *DP800* a v tab. 4 pre materiál *DP1000*. Pre jednotlivé šírky boli vykonané 3 merania a bola vypočítaná priemerná hodnota maximálnej sily a priemerná hodnota dráhy pri porušení.

Tab. 3. Namerané hodnoty sily a dráhy pre materiál DP800

	Max. sila [kN]	Priemer ± štđ. odchýlka [kN]	Dráha ťažníka [mm]	Priemer ± štđ. odchýlka [mm]
196	211,31		34,44	
	205,68	211,4 ± 5,8	33,16	34,7 ± 1,7
	217,22		36,62	
133	133,88		25,40	
	127,39	131,3 ± 3,5	24,54	25,0 ± 0,4
	132,75		25,16	
108	97,53		23,40	
	92,67	97,9 ± 5,6	22,52	23,5 ± 1,0
	103,76		24,58	
70	110,11	112,3 ± 3,1	30,86	31,6 ± 1,0
	114,52		32,28	
	39	60,45		29,42
26	61,29	60,2 ± 1,2	30,16	29,5 ± 0,6
	58,86		28,98	
	37,91		26,16	
26	37,37	37,5 ± 0,3	24,46	25,5 ± 0,9
	37,36		25,74	

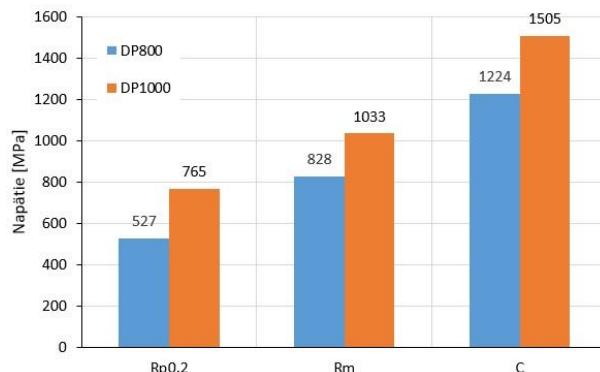
Tab. 4. Namerané hodnoty sily a dráhy pre materiál DP1000

	Max. sila [kN]	Priemer ± štđ. odchýlka [kN]	Dráha ťažníka [mm]	Priemer ± štđ. odchýlka [mm]
196	248,1		34,4	
	237,7	244,6 ± 6,0	32,7	34,1 ± 1,2
	248,1		35,1	
133	147,2		24,0	
	144,0	145,1 ± 1,8	23,8	23,9 ± 0,1
	144,2		23,8	
108	97,3		20,8	
	87,1	92,2 ± 5,1	23,5	21,4 ± 1,9
	92,1		19,8	
77	79,8	79,5 ± 2,0	19,9	19,8 ± 0,3
	81,3		20,0	
	77,4		19,4	
38	57,0	57,0	24,3	24,3
26	35,1	34,7 ± 0,6	21,6	21,5 ± 0,1
	34,3		21,4	



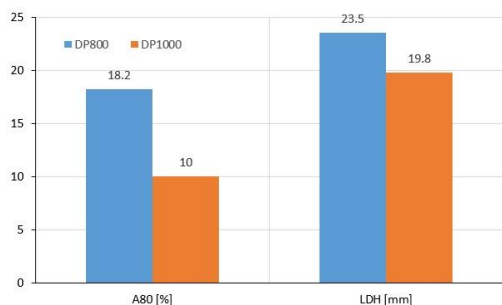
Obr. 2. Dosažené priemerné výšky výtlačkov pre jednotlivé šírky polotovaru

Na obr. 2 sú znázornené dosažené priemerné výšky výtlačkov pre jednotlivé šírky vzoriek vrátane štandardnej odchýlky v jednotlivých meraných bodoch. Pre materiál DP800 bola zistená medzná výška výlisku pre šírku vzorky 108 mm s hodnotou 23,5±1,0 mm. Pre materiál DP1000 bola zistená medzná výška výlisku pre šírku vzorky 77 mm s hodnotou 19,8±0,3 mm. S uvažovaním štandardnej chyby, resp. minimálnej dosiahnutej výšky výlisku boli dosažené hodnoty pre šírku 77 mm 19,5 mm a šírku 108 mm rovnako 19,5 mm. Je teda možné konštatovať medzný stav minimálnej výšky výlisku pre materiál DP800 šírku vzorky 108 mm a pre materiál DP1000 77 mm, resp. 108 mm. Výsledky sú v súlade s výsledkami Takahashiho [14,15], ktorý vykonal LDH skúšku na AHSS oceli.

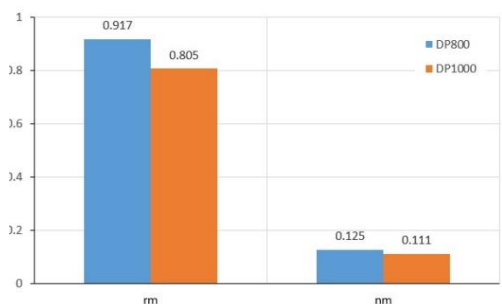


Obr. 1. Porovnanie napät'ových a pevnostných charakteristík

Porovnanie napät'ových charakteristík – medze klzu, pevnosti v ťahu a konštanty pevnosti K je uvedené na obr. 3. Zvýšením akostného stupňa materiálu z DP800 na DP1000 došlo k zvýšeniu medze klzu o 45,2 %, pevnosti v ťahu o 24,8 % a konštanty pevnosti K o 23 % pri súčasnom poklese ťažnosti o – 45,1 %. Výsledkom zvýšenia pevnostných charakteristík a poklesu ťažnosti je zníženie medznej výšky výlisku z 23,5 mm u materiálu DP800 na 19,8 mm pre materiál DP1000, čo predstavuje pokles o –18,9 %. Súčasne došlo k zníženiu súčiniteľa normálovej anizotropie r_m o –12,2 % a exponentu deformačného spevnenia n_m o –11,2 % - obr. 4 a obr. 5.



Obr. 4. Porovnanie ťažnosti a medznej výšky výťazku



Obr. 5. Porovnanie súčiniteľa normálovej anizotropie a exponentu deformačného spevnenia

ZÁVER

Článok prezentuje výsledky *LDH* skúšky realizovanej na dvoch akostiach dvojfázovej ocele - *DP800* a *DP1000*, ktoré sa používajú na výrobu lisovaných dielov pre zadnú deformačnú zónu automobilov. Cieľom bolo posúdiť zmenu materiálu zvýšením pevnostných charakteristík a jej vplyv na tvárnosť hodnotenú *LDH* skúškou. Minimálna dráha ťažníka, t. j. parameter *LDH* = 23,5±1,0 mm, bola dosiahnutá pre rovinný deformačný stav modelovaný vzorkou so šírkou 108 mm pre akostný stupeň *DP800*. Pre akostný stupeň *DP1000* bola dosiahnutá nižšia medzná výška výťazku, parameter *LDH* = 19,8±0,3 mm pre šírku vzorky 77 mm. Dosiahnutý výsledok je v korelácii s hodnotami materiálovej tvárnosti, kde zvýšením akostného stupňa došlo k zvýšeniu pevnostných charakteristík, a k zníženiu ťažnosti, čo sa prejavilo v nižších hodnotách súčiniteľa normálovej anizotropie a exponenta deformačného spevnenia. Ďalší výskum bude zameraný na vyhodnotenie rozloženia deformácií a ich koreláciu s výsledkami numerickej simulácie.

Podakovanie

Príspevok bol vypracovaný s podporou grantového projektu VEGA 1/0238/23 „Implementácia CAx systémov a techník virtuálneho inžinierstva pri redizajne dielov deformačných zón karosérie automobilov.“

LITERATÚRA

[1] OLIVER, S. - JONES, T. B. - FOURLARIS, G. (2007): *Dual phase versus TRIP strip steels*:

Microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing. In: *Materials Characterization*, Vol. 58, p. 390-400.

[2] MORAVEC, J. - GRYS, K. (2021): *Forming and Heat Treatment of Modern Metallic Materials*. In: *Metals*, 11, 1106. <https://doi.org/10.3390/met11071106>

[3] HRIVŇÁK, A. - EVIN E. (2004): *Formability of metal sheets*. 1st ed.; Košice: TU, Slovakia, pp. 223.

[4] ČADA, R. (2001): *Tváritelnosť ocelových plechu*. 1st ed.; Ostrava: Repronis, Česko, pp. 345.

[5] MIELNIK, E. M. (1991): *Metalworking Science and Engineering*. McGraw-Hill, p. 976.

[6] HOSFORD, W. F. - CADDELL, R. M. (2012): *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*. 3rd edition, Cambridge University Press.

[7] NARASIMHAN, K. - MILES, M. P. - WAGONER, R. H. (1995): *A better sheet-formability test*. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, p. 385-394.

[8] MEULEMAN, D. - SILES, J. - ZOLDAK, J. (1985): *The Limiting Dome Height Test for Assessing the Formability of Sheet Steel*. In: *SAE Technical Paper 850005*, 1985, <https://doi.org/10.4271/850005>.

[9] SAHU, J. - MISHRA, S. (2016): *LDH test of very thin brass sheet considering the scaling effect*. In: *Journal of Physics Conference Series*, Vol. 734, p. 1-4.

[10] KURAMAE, H. et al (2010): *Multi-scale parallel FE analyses of LDH sheet formability tests based on crystallographic homogenization method*. In: *Int. Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 52, p. 183-197.

[11] KATRAGADDA, S. C. - RAMULU, P. (2014): *Investigation of forming behavior prediction of different steel grade materials using numerical simulation*. In: *5th Int.&26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, India.

[12] BANDYOPADHYAY, K. - PANDA, S. K. - SAHA, P. - PADMANABHAM, G. (2015). *Limiting drawing ratio and deep drawing behavior of dual phase steel tailor welded blanks: FE simulation and experimental validation*. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 217, p. 48-64.

[13] ČADA, R. (1997): *Formability of deep-drawing steel sheets*. In: *EUROMAT 97*, Apr. 21-23, Maastricht, Netherlands, p. 463-466.

[14] *AHSS Guidelines*, Available online: <https://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>

[15] TAKAHASHI, M. (2003): *Development of High Strength Steels for Automobiles*. In: *Nippon Steel Technical Report No. 88*.