

---

# Porovnanie deformačných charakteristík vysokopevných ocelí používaných v automotive

---

## 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 41 556 023 547

## 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.: +421 556 023 524

## Vladimír Kokarda, Ing.

Katedra automobilovej výroby, Strojnícka fakulta,  
Technická univerzita v Košiciach,  
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.  
E-mail: vladimir.kokarda@tuke.sk, Tel.: + 421 41 556 023 547

## 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 41 556 023 528

## Comparison of deformation characteristics of high-strength steels used in automotive

**Abstract:** The goal of the research was to compare the deformation properties such as absorption capacity, resistance to deformation, stiffness of high-strength steels with the properties of microalloyed steel based on the results of the tensile test and the three-point bending test. *HTC 590X* dual-phase steel and *RAK 40/70* steel have the potential to reduce intrusion into the passenger compartment, as the maximum deformation resistance, stiffness and energy absorbed in the three-point bending test were greater compared to *H220PD* microalloy steel reinforcement.

**Keywords:** high-strength steels, deformation resistance, stiffness, energy absorbed, three-point bending test.

---

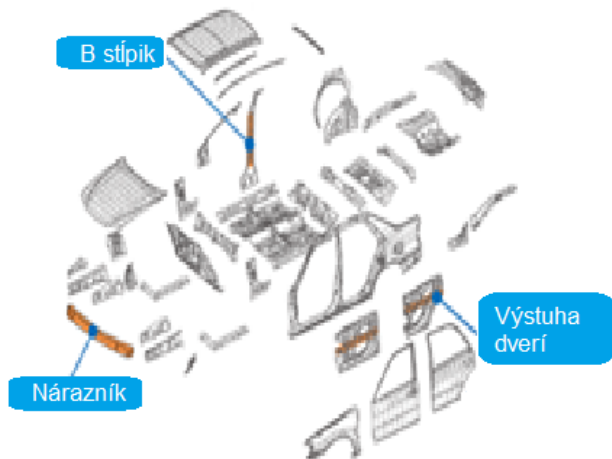
## ÚVOD

V automobilovom priemysle sa kladie veľký dôraz na vytváranie ucelených a vyvážených konceptov automobilov, v ktorých sú sklbené požiadavky na: bezpečnosť, emisie a cenovú dostupnosť. Cieľom je dosiahnuť vysoký stupeň pridanej úžitkovej hodnoty. Kombinácia týchto faktorov však musí byť dosiahnuteľná reálnymi, technologicky a cenovo dostupnými metódami výroby, ktoré pritom nadmerne nezaťažia životné prostredie. Jedným z faktorov, ktorý v značnej miere rozhoduje o úspechu či neúspechu daného konceptu automobilu je bezpečnosť. Z hľadiska pasívnej bezpečnosti kľúčovú úlohu plní konštrukcia karosérie vozidla, ktorá

pozostáva z prednej deformačnej zóny, z bezpečnej zóny pre pasažierov (bezpečnostnej kľetky) a zadnej deformačnej zóny. V prípade kolízie deformačná štruktúra karosérie v prednej a zadnej časti karosérie má za úlohu pohltiť také množstvo kinetickej energie, aby spomalenie neprekročilo prípustnú biomechanickú hranicu preťaženia ľudského organizmu. To znamená, že deformácia štruktúry v prednej a zadnej časti automobilu musí byť riadená. Kinetická energia razu sa premení (transformuje) na deformačnú prácu štruktúry prednej a zadnej časti karosérie. Sily, ktoré vzniknú pri náraze v priečniku nárazníka sa rozdelia do pozdĺžnych nosníkov. Z pozdĺžnych nosníkov sa zaťaženie prenáša do tunela, prahov, podlahy, do nosnej konštrukcie dverí

a cez stĺpik dverí do nosníkov strešnej konštrukcie. Pritom sú pozdĺžne nosníky namáhané tlakovou silou a priečne nosníky a výstuhy ohybovou silou (obr. 1).

Následky dopravnej nehody pri bočnom náraze sú často krát závažnejšie ako pri čelnom náraze. Riziko preťaženia cestujúcich pri bočnom náraze môže presiahnuť biomechanické limity, pretože deformačná štruktúra musí absorbovať energiu rázu na kratšej dráhe ako pri čelnom náraze vozidla.



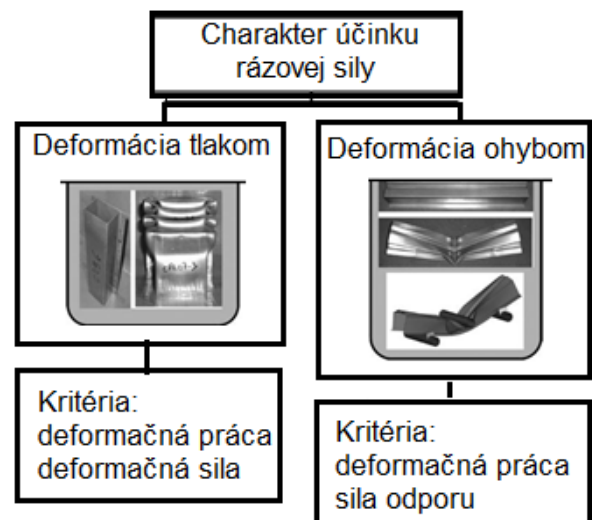
Obr. 1. Diely namáhané ohybovou silou

Absorpčná schopnosť deformačnej štruktúry závisí od použitého materiálu, geometrie dielov deformačných zón a charakteru pôsobenia zaťažujúcej sily. Pri stavbe karosérie sa používajú rôzne druhy ocelí, zliatin hliníka, zliatiny horčíka a kompozitné materiály. Mechanizmy rozptylu rázovej energie kovových a kompozitných štruktúr sú značné odlišné. Konštrukcie vyrobené z kompozitných materiálov sú krehké a rozptyľujú energiu prostredníctvom rôznych kombinovaných lomových mechanizmov (delaminácia, lámanie vlákien a praskanie matrice). Zatiaľ čo štruktúry z kovov umožňujú rozptýliť energiu riadenou elasto-plastickou deformáciou dielov deformačnej štruktúry. Ako už bolo uvedené vyššie, karoséria automobilu pozostáva z prednej deformačnej zóny, bezpečnej zóny pasažierov a zadnej deformačnej zóny.

Vzhľadom na požadovanú funkcionalitu jednotlivých deformačných zón sa aj použité materiály dielov jednotlivých zón líšia. Pre prednú a zadnú deformačnú zónu sa používajú dvoj- a viacfázové

ociele (DP ocele, Dual-Phase Steels), CP ocele (Complex-Phase Steels), TRIP ocele (Transformation Induced Plasticity Steels) TWIP ocele (Twinning Induced Plasticity Steels), ktoré majú veľmi dobrú absorpčnú schopnosť. Pre bezpečnú zónu (bezpečnostnú kľetku) sa používajú MS Martenzitické ocele (Martensitic Steels) HF ocele (Hot Formed Steels), DP ocele (Dualphase Steels >1000 MPa), ktoré sa vyznačujú vysokou pevnosťou [1-4].

Pre predikciu kľúčových ukazovateľov odolnosti deformačnej štruktúry proti nárazu pri namáhaní tlakovou alebo ohybovou silou dizajnéri využívajú výsledky ťahovej skúšky, skúšky trojbodovým ohybom a skúšky tlakom (obr. 2) [5].



Obr. 2. Princiálne schémy skúšok

Cieľom tohto príspevku je porovnať deformačné charakteristiky plechov z mikrolegovanej ocele H220PD, dvojfázovej ocele HTC 590X a viacfázovej ocele RAK 40/70.

## 1 METODIKA EXPERIMENTÁLNEHO VÝSKUMU

Experimentálny výskum deformačných charakteristík bol realizovaný na plechoch z mikrolegovanej ocele H220PD, dvojfázovej ocele HTC 590X a viacfázovej ocele RAK 40/70, ktoré sa používajú pri stavbe karosérií automobilov. Mechanické vlastnosti boli zisťované ťahovou skúškou na trhacom stroji

Tab. 1. Namerané hodnoty  $n$  a  $K$  vyhodnotené v intervale skutočnej deformácie  $0,1 \div 0,2$

Materiál	Namerané údaje							Vypočítané $EA_{True}/V_0$ [N·mm <sup>-2</sup> ]
	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{80}$ [%]	$K_{0,1-0,2}$ [MPa]	$n_{0,1-0,2}$	$EA_{m,t}/V_0$ [N·mm <sup>-2</sup> ]	
H220PD	388 ± 2	449 ± 1	17 ± 1	29 ± 1	719 ± 3	0,178 ± 0,002	104,593	104,92
HTC 590X	376 ± 4	632 ± 2	19 ± 0,5	28 ± 0,5	1059 ± 2	0,202 ± 0,001	144,390	145,246
RAK 40/70	440 ± 3	764 ± 2	25 ± 1	30 ± 2	1468 ± 6	0,287 ± 0,002	187,188	187,32

TIRATEST 2300 v zmysle ustanovení noriem ISO 6892-1: 2019 a ISO 10275: 2020. Namerané hodnoty mechanických vlastností: medze klzu  $R_e$ , pevnosti v ťahu  $R_m$ , rovnomernej ťažnosti  $A_g$ , ťažnosti  $A_{80}$ , materiálovej konštanty  $K_{0.1-0.2}$  a exponenta deformačného spevnenia  $n_{0.1-0.2}$  boli zisťované ťahovou skúškou (tab. 1).

Základnou deformačnou charakteristikou je absorpčná schopnosť (*Energy Absorption - EA*), t. j. množstvo *EA* do porušenia materiálu. Množstvo *EA* závisí od húževnatosti materiálu, ktorá vyplýva z fyzikálno-metalurgickej podstaty pevnosti a plasticity. V podstate sa jedná o mechanickú prácu, ktorá je vzťahovaná na jednotku objemu do porušenia materiálu. Táto mechanická práca sa určí z plochy pod krivkou závislosti skutočného napätia na skutočnej deformácii [6, 7]. Skutočná pevnosť bola vypočítaná z nameraných hodnôt síl a predĺženia vzorky podľa vzťahu (1) [8-10]:

$$\sigma_{True} = \frac{F_i}{S_0} \cdot \left(1 + \frac{A_{g,i}}{100}\right) \quad (1)$$

a skutočná deformácia podľa vzťahu (2):

$$\varphi_{True} = \ln\left(1 + \frac{A_{g,i}}{100}\right), \quad (2)$$

kde  $F_i$  je skutočná okamžitá sila,

$S_0$  je východiskový prierez vzorky,

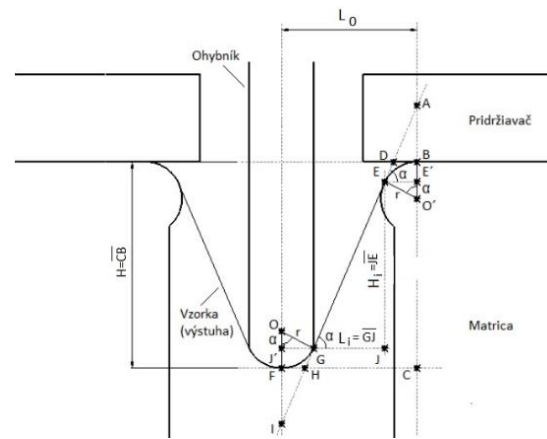
$A_{g,i}$  je rovnomerná ťažnosť.

Zo závislosti skutočného napätia na skutočnej bola vyhodnotená deformačná práca  $EA_{m,t}/V_0$ , ako plocha

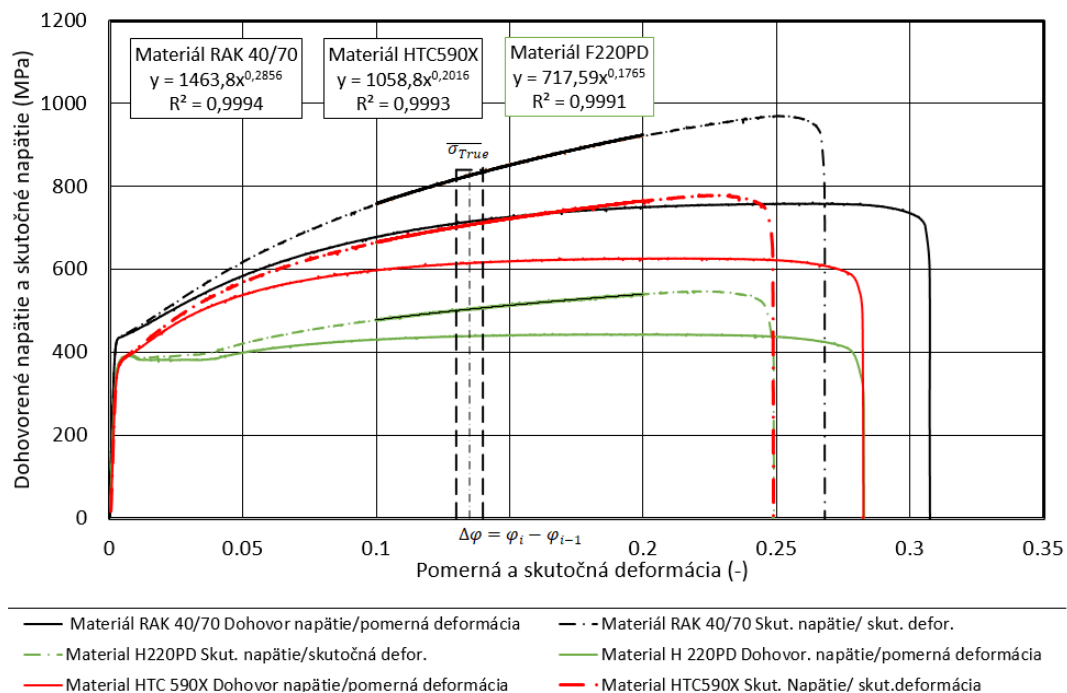
pod krivkou závislosti skutočného napätia na deformácii pomocou vzťahu (3) (obr. 2):

$$EA_{m,t} = \sum_{i=1}^n (\overline{\sigma_{True}(\varphi_i)}) \cdot \Delta\varphi. \quad (3)$$

Ako bolo vyššie uvedené pri kolíziách automobilov sú nárazník, priečne nosníky, prah, B stĺpik výstupy dverí a strechy namáhané ohybovou silou. Tieto diely sú spojené s rámovou konštrukciou karosérie. Namáhanie ohybovou silou bolo modelované skúškou trojbodovým ohybom, pričom konce vzoriek boli mechanicky pridržiavané (obr. 3). Pre experimentálny výskum boli použité vzorky o šírke 26 mm a s dĺžkou  $L = 300$  mm. Rýchlosť pohybu ohýbacieho nástroja bola nastavená na  $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Vzorky boli deformované do porušenia. Ohybník s telesom nástroja a tenzometrickým snímačom boli pripojené k pohyblivému priečniku ťhacieho stroja TIRATEST 2300, ktorý umožňuje zaznamenávať ohýbaciú silu aj dráhu priečnika do PC (obr. 4).



Obr. 3. Principiálna schéma skúšky trojbodovým ohybom



Obr. 4. Závislosť skutočného napätia od deformácie

Zo záznamu deformačnej sily a dráhy boli vytvorené závislosti (obr. 4). Z týchto závislosti bola vypočítaná  $EA_{m,bt}$  pomocou vzťahu (4):

$$EA_{m,bt} = \int_0^{h_{\max}} \overline{F_b}(h_i) \cdot dh \approx \sum_{i=1}^n \left( \overline{F_b}(h_i) \right) \cdot \Delta h, \quad (4)$$

kde  $\overline{F_b}(h_i)$  je priemerná hodnota sily vo zvolenom intervale,

$\overline{h_i}$  je stred zvoleného intervalu  $[h_{i-1}, h_i]$ ,

$$\Delta h = h_i - h_{i-1}.$$

Hodnoty absorbovanej energie  $EA_{m,bt}$  vypočítané pomocou vzťahu (4) sú uvedené v tab. 2.

0,973, t. j. 97,3 % zhodu a pri modeli zistenom zo závislosti skutočného napätia na deformácii  $EA_{True} = f(\sigma_{True}, \varphi_{True})$  nadobúda hodnotu 0,9998, t. j. 99,98 % zhodu. To znamená, že naposledy menovaný model závislosti skutočného napätia na deformácii je schopný skoro dokonale predikovať hodnoty závislej premennej. Menšia predikčná schopnosť modelov vzťahovaných k medzi kĺzu a pevnosti v ťahu súvisí s tým, že tieto materiálové charakteristiky sú vzťahované k prierezu pred deformáciou a nie k skutočnému prierezu. V oblasti rovnomernej deformácie dochádza k intenzívnemu deformačnému spevňovaniu. Z obr. 2 vyplýva, že sploštenie krivky

Tab. 2. Namerané hodnoty deformácií na vzorkách pred porušením pri skúške trojbodovým ohybom

Materiál	Namerané údaje					
	Dráha $H_{max}$ [mm]	$EA_{m,bt}$ [Nm]	$EA_{c,bt}$ [Nm]	$F_{b,max}$ [kN]	$CS_{bt}$ [kN]	$CS_{reg..bt}$
<b>H220PD</b>	41,1	285,431	318,688	13,888	0,338	0,361
<b>HTC590X</b>	41,2	374,374	365,644	17,760	0,431	0,482
<b>RAK 40/70</b>	43,3	535,052	529,6	24,446	0,564	0,607

## 2 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY A ICH DISKUSIA

Základnou deformačnou charakteristikou je absorpčná schopnosť  $EA$ , t. j. množstvo  $EA$  do porušenia materiálu.  $EA$  je vzťahovaná na jednotku objemu do porušenia materiálu. Na obr. 5 sú uvedené závislosti  $EA$  vypočítaných na základe dohovorených mechanických vlastností (medze kĺzu  $R_e$ , pevnosti v ťahu  $R_m$ , rovnomernej ťažnosti  $A_g$  a celkovej ťažnosti  $A_{80}$ ), ktoré boli vypočítané podľa nasledujúcich vzťahov (5) a (6):

$$EA_{Ag} = \frac{(R_e + R_m) \cdot A_g}{2 \cdot 100}, \quad (5)$$

$$EA_{A80} = \frac{(R_e + R_m) \cdot A_{80}}{2 \cdot 100}. \quad (6)$$

Deformačná práca bola tiež vypočítaná na základe skutočných hodnôt napätí a skutočných hodnôt deformácií podľa vzťahov (1) a (2).

Mieru kvality regresného modelu v štatistike vyjadruje koeficient determinácie  $R^2$ . Tento koeficient vyjadruje podiel variability závisle premennej. Z obr. 5 vyplýva, že  $R^2$  pri modeli zistenom zo

závislosti  $EA_{Ag} = \frac{(R_e + R_m) \cdot A_g}{2 \cdot 100}$  nadobúda hodnotu

0,964, t. j. 96,4 % zhodu, pri modeli zistenom zo

závislosti  $EA_{A80} = \frac{(R_e + R_m) \cdot A_{80}}{2 \cdot 100}$  nadobúda hodnotu

v oblasti maximálnej pevnosti vypočítanej zo skutočnej sily a prierezu pred deformáciou  $S_0$ . Sploštenie je spôsobené tým, že nie je uvažované so zmenšením prierezu vzorky, v okamihu tvorby krčka dochádza k rýchlejšiemu poklesu sily. Tento stav je možné pozorovať na závislosti skutočného napätia na skutočnej deformácii, kde až pri tvorbe krčka dochádza k intenzívnemu poklesu skutočného napätia. Deformačné správanie sa kovových materiálov je možné popísať *Hollomanovou* rovnicou (7):

$$\sigma_{True} = K \cdot \varphi_{True,i}^n, \quad (7)$$

kde  $K$  je materiálová konštanta,

$n$  je exponent deformačného spevnenia,

$\varphi_{True,f}$  je skutočná deformácia pred porušením vzorky.

V závislosti od mikroštruktúry (jednofázová alebo viacfázová, veľkosti zrna a pod.) a fázových transformácií počas deformácie dochádza k určitým zmenám, ktoré *Hollomanova* rovnica nemusí vždy presne vyjadriť. Predikčná schopnosť *Hollomanovej* rovnice bola overovaná pri nasledujúcich intervaloch:  $\varphi_{True}$  od 0,1 do zúženia (pred porušením). Tento výber intervalu deformácii bol volený vzhľadom na definíciu húževnatosti, ktorá je definovaná mechanická práca potrebná na deformácie určitého objemu do porušenia. Pri namáhaní jednoosovým ťahom je deformačnú prácu vzťahovanú k určitému objemu možné určiť podľa vzťahu (8):

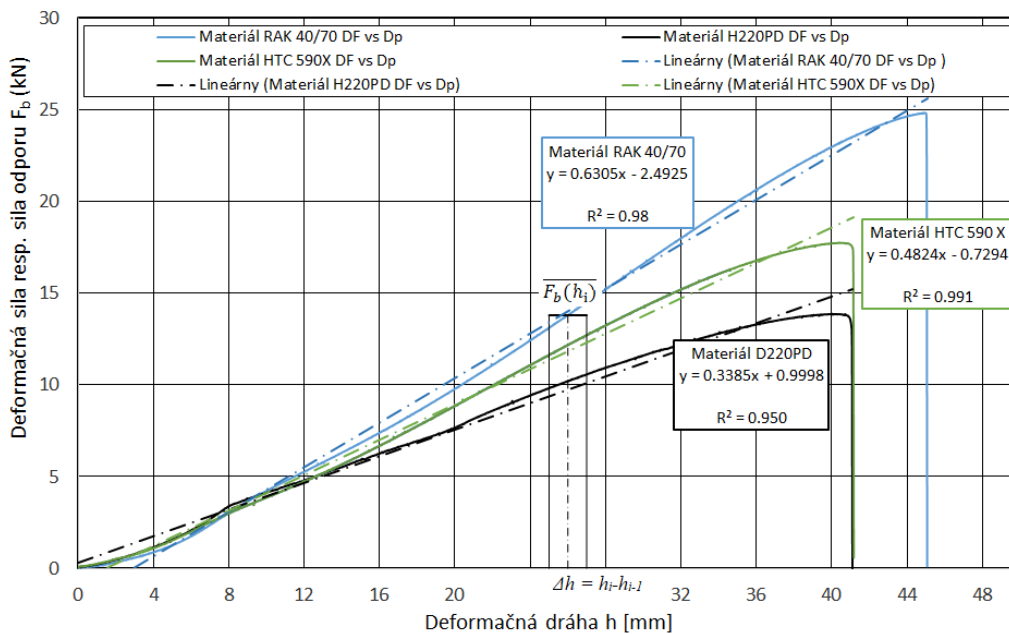
$$\frac{EA}{V_0} = \int_0^{\varphi_f} \sigma_{true} \cdot d\varphi = \int_0^{\varphi_f} K \cdot \varphi_{i,true,f}^n \cdot d\varphi =$$

$$= K \cdot \frac{[\varphi_{i,true,f}^{n+1} + 0,002^{n+1}]}{n+1}, \quad (8)$$

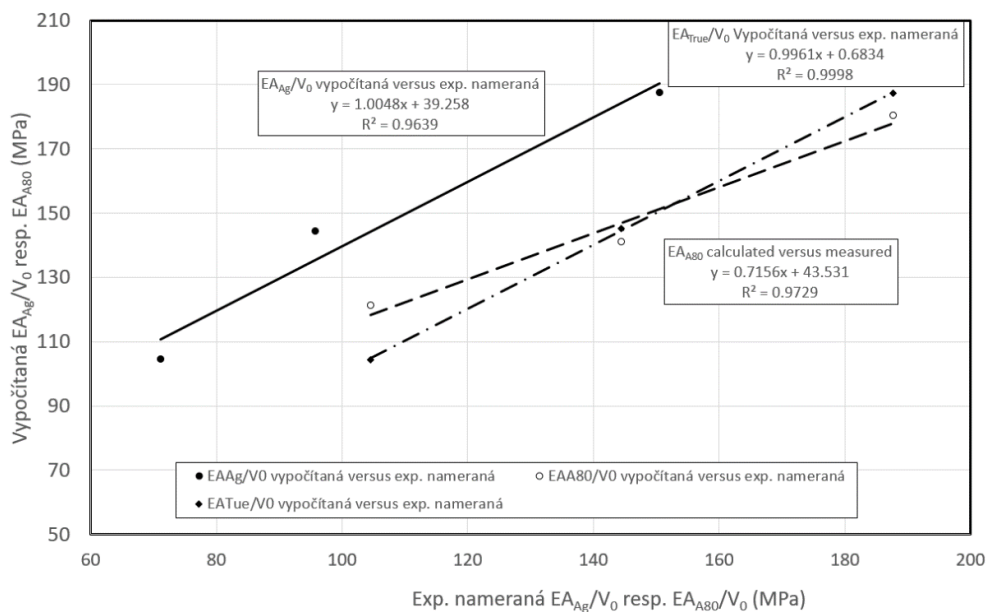
Zo vzťahu (8) a tab. 1 vyplýva, že veľmi vysoký potenciál absorpcie energie majú materiály s kombináciou vyšších hodnôt materiálovej konštanty (pevnosti), väčších deformácií do porušenia a vyšších hodnôt exponentov deformačného spevnenia. Z tab. 2 a obr. 3 vyplýva, že dvojfázová oceľ *HTC 590X* a oceľ s transformačne indukovanou plasticitou *TRIP RAK 40/70* vykazujú väčší absorpčný potenciál ako mikrolegovaná oceľ *H220PD*.

Výstuhy z dvojfázovej ocele *HTC 590X* vykázali väčší odpor proti deformácii o ~28 % a z ocele *TRIP RAK 40/70* ~76 % v porovnaní s mikrolegovanou oceľou *H220HD*. Tieto ocele je vhodné použiť pri stavbe karosérie pre nárazníky, priečne nosníky, výstuhy dverí a strechy, *B* stĺpiky a pod., ktoré sú pri kolízii namáhané ohybovou silou.

Zvlášť pri bočnom náraze výstuhy dverí, *B* stĺpik spolu s ďalšími dielmi karosérie rozptyľujú energiu tak, aby zostal dostatočný priestor pre prežitie pasažierov pri náraze. Tento priestor je daný tuhosťou dielov, resp. celej bočnej konštrukcie karosérie pri zaťažení ohybovou v oblasti plastickej deformácie. Tuhosť dielov  $CS_{pb}$  alebo celej deformačnej štruktúry je možné vyjadriť pomerom



Obr. 4. Záznam ohybovej sily od dráhy



Obr. 5. Závislosť deformačnej práce vypočítanej na základe regresných modulov od nameraných hodnôt deformačnej práce

maximálnej ohybovej sily  $F_{b,max}$  a hĺbkou vniknutia  $h$  resp. dráhou telesa (9):

$$CS_{pb} = \frac{F_{B_{max}}}{h_{max}}, \quad (9)$$

obr. 4 a tab. 3. Smernica preloženej priamky znázorňuje tuhosť materiálu -  $CS_{b,reg}$ . Hodnoty koeficientov tuhostí jednotlivých materiálov boli vypočítané pomocou vzťahu (9) a regresnou analýzou, že čím je vyššia tuhosť deformačnej zóny, tým je väčšia sila odporu voči deformácii. Tuhosť výstuhu  $CS_{reg., pb}$  pri aplikácii HTC 590X vzrástla o 34 % a pri aplikácii TRIP RAK 40/70 vzrástla o 68 % v porovnaní s mikrolegovanou oceľou P220HD. V prípade havárie by absorpcia energie mala byť taká, aby sa znížilo riziko zranenie cestujúcich na prijateľnú úroveň. Pri kolíznych situáciách vyššie úrovne spomalenia spôsobujú vyššie riziko prekročenia biomechanickým limitov, t. j. preťaženie  $\approx 20g$  [11].

Zmenu preťaženia pri kolíznej situácie pri zámene materiálu je možné vyjadriť v podmienky rovnováhy energie vozidla o hmotnosti  $m$  pri rovnomernom zrýchlení (spomalení)  $a$  vykoná prácu:

$$WK = F \cdot h = m \cdot a \cdot h, \quad (10)$$

ktorá je absorbovaná deformačným členom:

$$EA_{bt} = \int_0^{h_{max}} F_b \cdot dh. \quad (11)$$

Predpokladáme, že pri namáhaní deformačného člena ohybovou silou je závislosť deformačnej sily (sily deformačného odpor) na dráhe lineárna, potom  $EA_{bt}$  bude:

$$EA_{bt} = \frac{F_b \cdot h_{max}}{2}. \quad (12)$$

Ak si z rovnice (9) vyjadríme silu odporu  $F_b$  ako funkciu tuhosti dielu resp. deformačnej štruktúry a dosadíme do podmienky rovnováhy energií:

$$WK = EA_{bt}, \quad (13)$$

potom po úprave dostaneme:

$$a = \frac{c_{psb} \cdot h_{max}}{m}. \quad (14)$$

Efekt inovácie zámene materiálu H220PD materiálom HTC590X alebo RAK40/70 je možné vyjadriť indexom zmeny spomalenia  $I_a$  nasledovne:

$$I_a = \frac{a_i}{a_{ref}}. \quad (15)$$

Potom po dosadení spomalenia za jednotlivé materiály dostaneme:

$$I_{a, HTC590} = \frac{c_{psb, HTC590X}}{c_{psb, HD220PD}} = \frac{0,482}{0,361} = 1,33, \quad (15)$$

$$I_{a, HTC590} = \frac{c_{psb, RAK 40/70}}{c_{psb, HD220PD}} = \frac{0,607}{0,361} = 1,68. \quad (16)$$

## ZÁVER

Na základe analýzy skúmaných materiálov je možné konštatovať:

- pre predikciu absorpčnej schopnosti materiálov na základe výsledkov ťahovej skúšky odporúčame používať regresný model stanovený zo závislosti skutočného napätia na deformácii, pretože tento model vykazoval až 99.98 % zhodu medzi nameranými a vypočítanými hodnotami  $EA$ ,
- celková absorpčná schopnosť, tuhosť majú silnú koreláciu s materiálovou konštantou  $K$  a exponent deformačného spevnenia  $n$ ,
- na základe vyššie uvedených experimentov môžeme predpovedať, že výstuhu z materiálu HTC 590X a z TRI RAK 40/70 ocele majú potenciál znížiť vniknutie do priestoru pre cestujúcich, pretože maximálna sila odporu proti deformácii, tuhosť aj absorbovaná energia pri skúške trojbodovým ohybom absorbovaním nárazovej energie v porovnaní s výstuhou z mikrolegovanej H220PD boli väčšie,
- získané výsledky naznačujú, že potenciál absorpcie energie majú materiály s kombináciou vyšších hodnôt materiálovej konštanty (pevnosti), väčších deformácii do porušenia a vyšších hodnôt exponentov deformačného spevnenia.

## PodĎakovanie

Príspevok bol realizovaný v rámci grantového projektu VEGA 1/0238/23 Implementácia CAX systémov a techník virtuálneho inžinierstva pri redizajne dielov deformačných zón karosérie automobilov.

## LITERATÚRA

- [1] YOON, T. - KIM, H. - HEO, C. (2016): *An experiment and FE simulation for the development of a SPFC1180 AHSS one-body door impact beam about a car side impact collision*. In: Int. J. Precis. Eng. Manuf. 17–1, pp. 81–89.
- [2] BILLUR, E. - ALTAN, T. (2010): *Challenges in Forming Advanced High Strength Steels*. In: Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERC/NSM), 9, pp.2-7.
- [3] KIRAN MORE, C. - GIRISH PATIL, M. - AKASH BELKHEDE, A. (2020): *Design and analysis of side door intrusion beam for automotive safety*. In: Thin-Walled Structures, 153, 106788.

- [4] BEER, F. - JOHNSTON, R. - DEWOLF, J.-MAZUREK, D. (2020): *Mechanics of Materials*. New York. 8th Edition. McGraw-Hill.
- [5] BOUAZIZ, O. - HATEM ZUROB, H. - HUANG, M. (2013): *Driving Force and Logic of Development of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications*. In: *Steel research international* [online], n/a-n/a [cit. 2018-02-19]. DOI: 10.1002/srin.201200288. ISSN 16113683. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/srin.201200288>.
- [6] XU, P. et al. (2016): *Crash performance and multi-objective optimization of a gradual energy absorbing structure for subway vehicles*. In: *Int J Mech Sci*. 107, 1–12.
- [7] BAROUTAJI, A. - SAJJIA, M. - OLABI, A.G. (2017): *On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: recent advances and future developments*. In: *Thin-Walled Struct*. 118, 137–163.
- [8] MORAVEC, J. - GRYC, K. (2021): *Forming and Heat Treatment of Modern Metallic Materials*. In: *Metals*, 11, 1106. <https://doi.org/10.3390/met11071106>.
- [9] ČADA, R. (2001): *Tvářitelnost ocelových plechu*. 1st ed.; Ostrava: Repronis, Česko, pp. 345.
- [10] ČADA, R. (1997): *Formability of deep-drawing steel sheets*. In: *EUROMAT 97*, Apr.21-23, Maastricht, Netherlands, p. 463-466.
- [11] VLK, F. (2000): *Karosérie motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 243s.