

KVANTIFIKÁCIA ZVYŠKOVÝCH NAPÄTÍ V PLECHOCH VALCOVANÝCH ZA TEPLA METÓDOU ODVRÁTVANIA

QUANTIFICATION OF RESIDUAL STRESSES IN HOT ROLLED SHEETS BY THE HOLE-DRILLING METHOD

František TREBUŇA, František ŠIMČÁK, Patrik ŠARGA, Peter SENKO, Jozef TOMČÍK¹

Abstrakt

Proces termomechanického spracovania pri valcovaní za tepla spôsobuje v plechoch vznik zvyškových napäť. Následné strihanie plechov zo zvitkov na tabule, ani pri použití klasických rovnáčiek toto zvyškové napätie neeliminuje. Pri delení takýchto plechov napr. na pásky dochádza k uvoľňovaniu zvyškových napäť, s čím súvisí ich nežiadúca deformácia. V príspevku je uvedená kvantifikácia zvyškových napäť v plechoch valcovaných za tepla pôvodnou a novou technológiou výroby, ktorej cieľom bolo dosiahnuť zníženie veľkosti zvyškových napäť.

Kľúčové slová: zvyškové napäťia, metóda odvrtávania, plechy valcované za tepla.

Abstract

The process of thermo-mechanical treatment during hot rolling induces residual stresses in sheets. Subsequent cutting of the sheets from coils cannot remove these stresses despite of using classical straighteners. During the splitting of sheets to belts are the residual stresses released and the belts are deformed. In the paper is described quantification of residual stresses in hot rolled sheets by original and by new technology of production. Its aim is to decrease the levels of residual stresses.

Keywords: residual stresses, hole-drilling method, hot rolled sheets.

ÚVOD

Zvyškové (reziduálne) napäťia v plechu sú napäťia, ktoré existujú v objekte bez toho, aby bol začažený vonkajšimi silami. Bežnou príčinou týchto napäť je výrobný proces alebo predchádzajúce začaženie. Vo všeobecnosti všetky výrobné postupy – valcovanie, tvárnenie, zváranie, tepelné spracovanie a pod. vyvolávajú vo vyrábanom objekte zvyškové napäťia.

Meranie zvyškových napäťí nemožno vykonať konvenčnými postupmi experimentálnej analýzy napäťosti, pretože snímač deformácie (odporový snímač, fotoelascimetrické povrstvenie) je úplne necitlivý k historii začaženia vyšetrovanej časti a meria len zmenu deformácie po inštalácii snímača. Pre určenie zvyškových napäťí štandardnými snímačmi musia byť napäťia uchované v konštrukcii nejakým spôsobom uvoľnené (pri aplikovanom snímači), takže snímače registrujú zmenu deformácie vyvolanú odstránením napäťia. Toto sa v minulosti obyčajne robilo deštruktívne vyrezaním a odstránením povrchovej vrstvy materiálu alebo trepanáciou vyšetrovanej časti. Snímače deformácie vhodne umiestnené pred vyrezaním, či uvoľnením časti, reagujú úmerne deformácií, ktorá vzniká zaniknutím zvyškových napäťí. Zvyškové napäťie je z nameraných deformácií určené za predpokladu, že tieto sú pružné. Veľa z týchto techník je

¹ Dr.h.c. prof. Ing. František TREBUŇA, CSc., prof. Ing. František ŠIMČÁK, CSc., Ing. Patrik ŠARGA, Ing. Peter SENKO, Ing. Jozef TOMČÍK, KAMaM, SjF TU v Košiciach, frantisek.trebuna@tuke.sk, frantisek.simcak@tuke.sk, patrik.sarga@tuke.sk, peter.senko@tuke.sk, jozef.tomcik@tuke.sk

Lektoroval: prof. Ing. Pavel MACURA, DrSc., Katedra pružnosti, FS TU-VŠB Ostrava
pavel.macura@vsb.brno.cz

určených pre laboratórne aplikácie na rovinných, či valcových vzorkách a nie je ich možné ľahko adaptovať pre reálne objekty ľubovoľných rozmerov a tvarov.

V súčasnom štádiu vývoja sa metóda odvŕtavania prednostne používa pre rovnomerné, alebo približne rovnomerne rozložené zvyškové napäcia po hrúbke. Postupy pre získanie údajov a ich vyhodnotenie sú v takýchto prípadoch sice dobre spracované a jednoduché avšak konania v sporných prípadoch vo všeobecnosti vyžadujú overenie rovnomernosti napäcia a stanovisko k ďalším kritériám týkajúcich sa správnosti vypočítaných napäti. V súčasnosti hardvérové a softvérové vybavenie, ktoré má k dispozícii pracovisko autorov, umožňuje aj meranie zvyškových napäti premenných po hrúbke.

V predloženom príspevku sú uvedené výsledky získané pri určovaní zvyškových napäti v plechoch valcovaných za tepla. Pretože tieto plechy, dodávané vo zvitkoch alebo v tabuliach, sú u odberateľov ďalej delené napr. na pásky, nastáva pri delení (v dôsledku uvoľnenia zvyškových napäti) nežiadúca deformácia deleného materiálu. Tento jav je neprípustný napr. pri ďalšom spracovaní pások plechov na rýchlobežných linkách. Cieľom výrobcov plechov je preto zníženie hladiny zvyškových napäti na čo najnižšiu mieru.

ZÁKLADNÉ ÚDAJE O ZLOŽENÍ A VLASTNOSTIACH MATERIÁLU HODNOTENÝCH PLECHOV

Metódou odvrtávania boli určované zvyškové napäcia v plechoch valcovaných za tepla vyrábaných pri dvoch rozdielnych termomechanických režimoch z ocele rovnej akosti. Prvú technológiu valcovania budeme označovať „pôvodná“, druhú technológiu „alternatívna“.

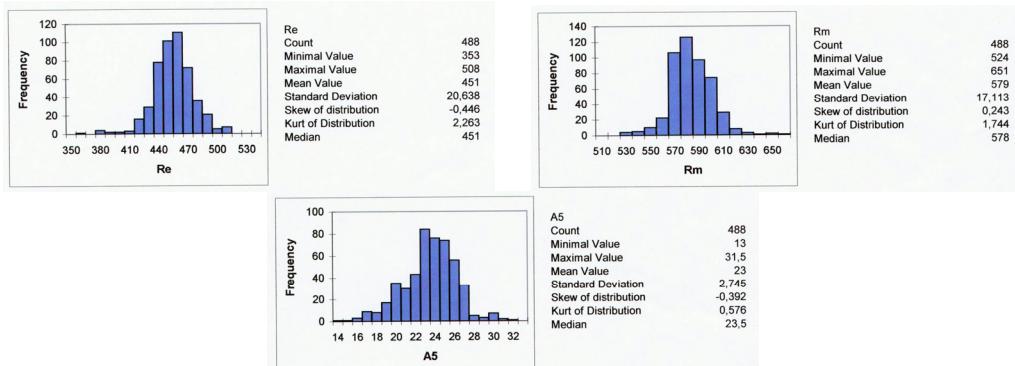
Chemické zloženie ocele použitej na výrobu plechov je uvedené v tabuľke 1.

Chemické zloženie ocele skúšaných plechov (hmotnostné množstvá)

Tabuľka 1

Prvok	C	Mn	Si	P	S	Al	Mo	Ti	V	Nb
Obsah	0,1729	1,245	0,009	0,014	0,0051	0,035	0,002	0,001	0,002	0,029
Prvok	Zr	B	Ca	Cu	Ni	As	Sn	Sb	Cr	N ₂
Obsah	0,001	0,0002	0,0002	0,022	0,017	0,007	0,006	0,002	0,017	0,0053

Na obr.1 sú histogramy hodnôt mechanických vlastností plechov vyrobených pôvodnou aj alternatívnu technológiu. Pretože hodnoty modulu pružnosti v tahu E a Poissonovo číslo μ neboli výrobcom plechov udané, boli podľa [1], [2] použité hodnoty $E = 2,05 \cdot 10^5$ MPa, $\mu = 0,3$.

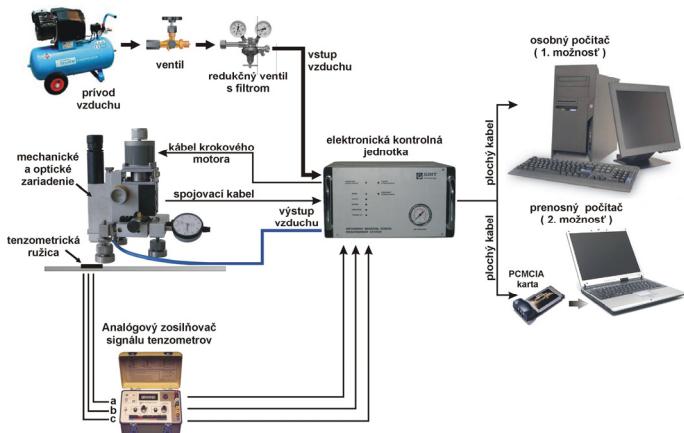


Obr.1 Histogramy hodnôt mechanických vlastností materiálov plechov vyrobených pôvodnou a alternatívnu technológiou

METODIKA MERANIA ZVÝŠKOVÝCH NAPÄTÍ

Merací a vyhodnocovací reťazec pozostáva zo systému pre meranie zvyškových napäti SINT MTS 3000, tenzometrickej meracej aparátury, zdroja tlakového vzduchu, redukčného ventilu s filtrom a počítača s programovým produkтом RESTAN.

Schéma meracieho reťazca je na obr.2. Ako už bolo uvedené v úvode, meranie smerov a veľkostí zvyškových napäti bolo vykonané na materiáloch vyrobených dvomi technológiami, pričom merania boli vykonané na vzorkách vybraných zo zvitkov aj z tabulí. Aby bolo možné rozlíšiť a kvantifikovať hodnoty zvyškových napäti a ich smerov z vrchnej aj zo spodnej strany vzorky, odvŕtavanie bolo uskutočnené spravidla v tom istom mieste vzorky z oboch strán. Pohľad na vzorky s naaplikovanými tenzometrami pre odvŕtavanie na plechoch vyrobených prvou aj druhou technológiou je na obr.3 a obr.4.



Obr.2 Merací reťazec

Na obr.3 sú vzorky materiálu vyrobeného pôvodnou technológiou valcovania odobraté zo zvitku (obr.3a) a tabule (obr.3b).



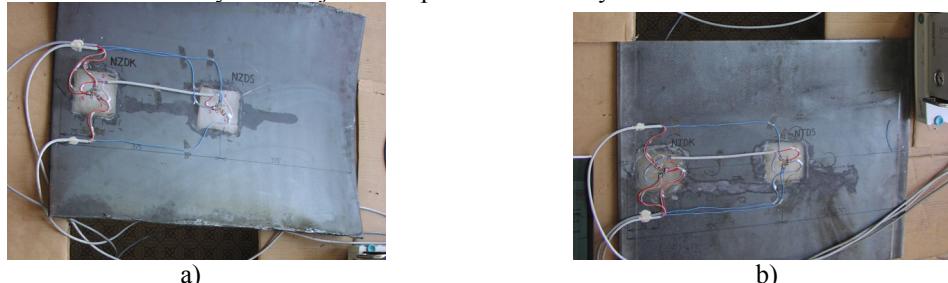
Obr.3 Vzorky odobraté z plechu vyrobeného pôvodnou technológiou valcovania, a) vzorka odobratá zo zvitku, b) vzorka odobratá z tabule

Na obr.4 sú vzorky materiálu vyrobeného alternatívnu technológiou valcovania odobraté zo zvitku (obr.4a) a tabule (obr.4b).

Pre meranie boli použité tenzometrické snímače 1RY61 S-1,5/120 s ohmickým odporom $120 \Omega \pm 1\%$. Deformačný súčiníteľ použitých tenzometrov bol $1,94 \pm 1,5\%$, súčiníteľ teplotnej rozťažnosti $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Zvyškové napäcia z nameraných zvyškových deformácií na vzorkách zo zvitkov a z tabulí boli určené na oboch strán vzoriek na dvoch miestach po šírke. Pri meraní bolo zistené, že uvoľnené deformácie v závislosti na pomere hĺbky odvŕtaného otvoru k strednému priemeru

tenzometrickej ružice nie sú v normalizovanom pásme. V súlade s ASTM E 837-01, okrem vyhodnotenia podľa ASTM, boli využité ďalšie tri metódy ktoré umožňujú určenie napäťí v slepom otvore pri nerovnomernom rozložení napäťí po hĺbke odvítaného otvoru. K tomu bolo potrebné realizovať kroky umožňujúce interpoláciu nameraných hodnôt.



Obr.4 Vzorky odobraté z plechu vyrobeného alternatívnu technológiou valcovania, a) vzorka odobratá zo zvitku, b) vzorka odobratá z tabule

Okrem vyhodnotenia podľa ASTM E 837-01 boli použité metódy:

- integrálna,
- Kockelmannova,
- Power Series.

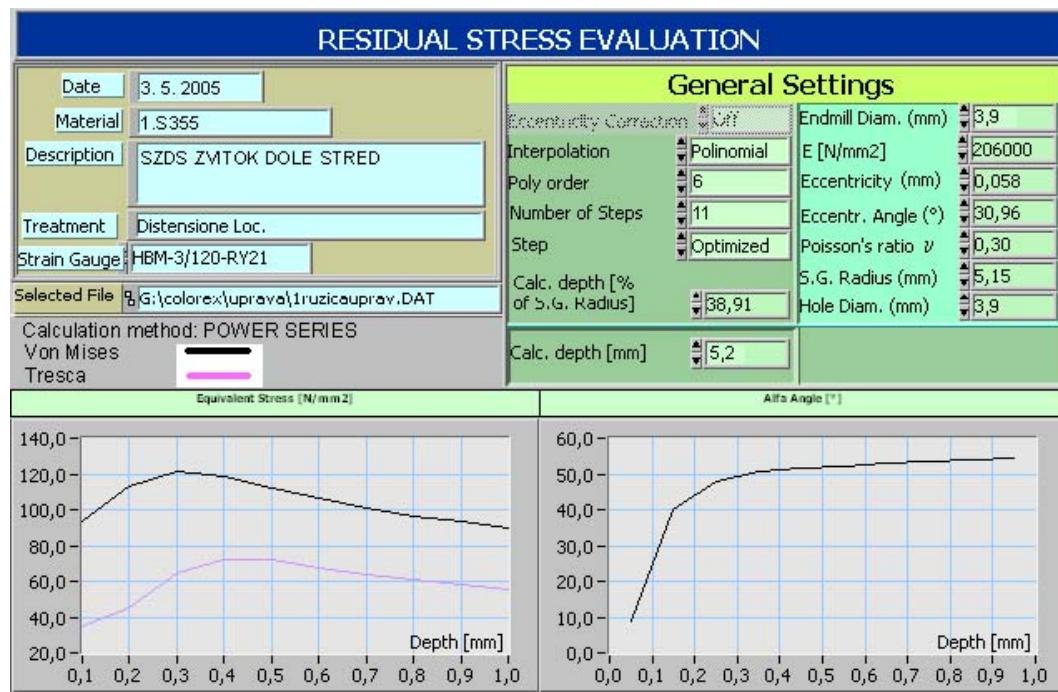
Identifikácia miest merania bola nasledovná:

Prvým symbolom v označení je materiál resp. technológia výroby plechu pôvodnej resp. alternatívnu technológiou valcovania. Alternatívnu technológiu bol valcovaný plech chladený iným režimom. Prvé písmeno (S) označuje materiál vyrobený pôvodnej (starou) technológiou valcovania, písmeno (N) označuje materiál vyrobený alternatívnu (novou) technológiou valcovania. Druhé písmeno (Z) udáva zvitok, písmeno (T) – tabuľu. Tretie písmeno (H) - označuje hornú stranu plechu pri prechode valcovacou stolicou, písmeno (D) označuje spodnú stranu plechu pri prechode valcovacou stolicou. Štvrté písmeno znamená miesto aplikácie tenzometra na vzorke pričom (S) je stred pásu, (K) je okraj pásu.

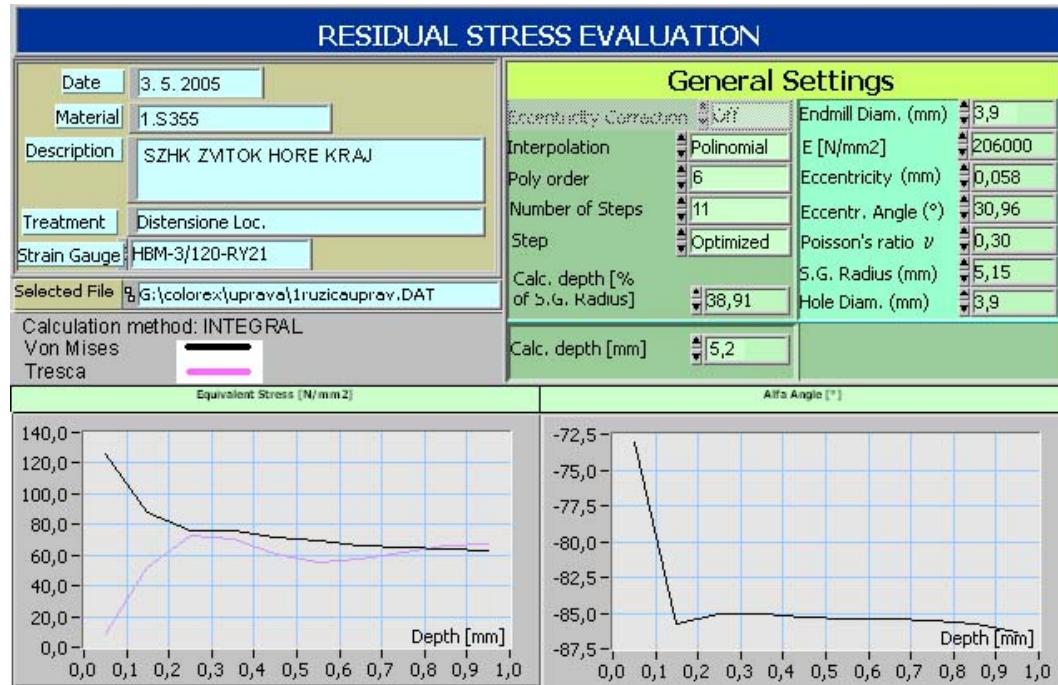
DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Zvyškové napäťia boli určované celkovo v šestnástich miestach skúmaných plechov. Výsledky pre jednotlivé metódy (ASTM, Integrálna, Kockelmannova, Power Series) boli spracované tabelárne a v grafoch vo forme výstupov (protokolov) systému SINT MTS 3000 pre meranie zvyškových napäťí. Opis panelu systému SINT MTS 3000 pre určenie zvyškových napäťí je podrobne uvedený v [4]. Na obr.5 a obr.6 sú príklady výstupov (protokolov) získaných pri meraní. Súhrn všetkých výstupov je uvedený v [5].

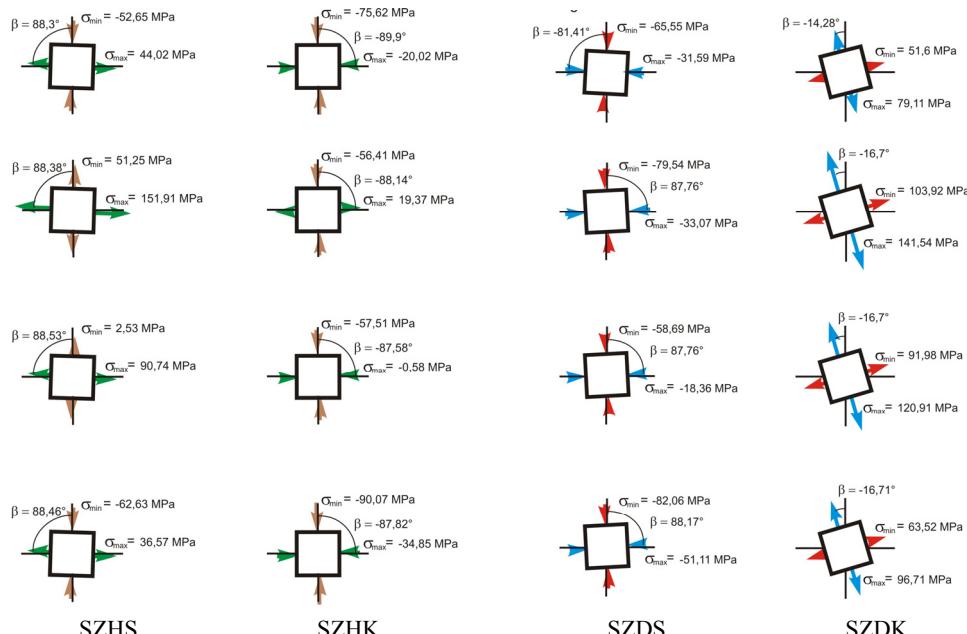
Výsledky meraní jednoznačne preukázali, že napätie je nerovnomerne rozložené po hĺbke otvoru t.j. nie sú splnené podmienky stanovené normou ASTM. Keďže norma ASTM E 837-01 je jediná ktorá štandardizuje vyhodnocovanie zvyškových napäťí, v ďalšom uvedieme výsledky získané aj podľa tejto normy. Na obr.7,8,9 a 10 sú uvedené veľkosti a smery hlavných zvyškových napäťí na hornej a dolnej strane vzoriek zo zvitkov vyrobených starou (pôvodnej) a novou (alternatívnu) technológiou. Spôsob označovania meracích miest je v súlade s označením uvedeným v časti „Metodika merania zvyškových napäťí“. V prvom riadku obrázku sú uvedené hodnoty podľa ASTM, v druhom podľa integrálnej metódy, v treťom podľa Kockelmannovej metódy a vo štvrtom riadku podľa metódy Power Series.



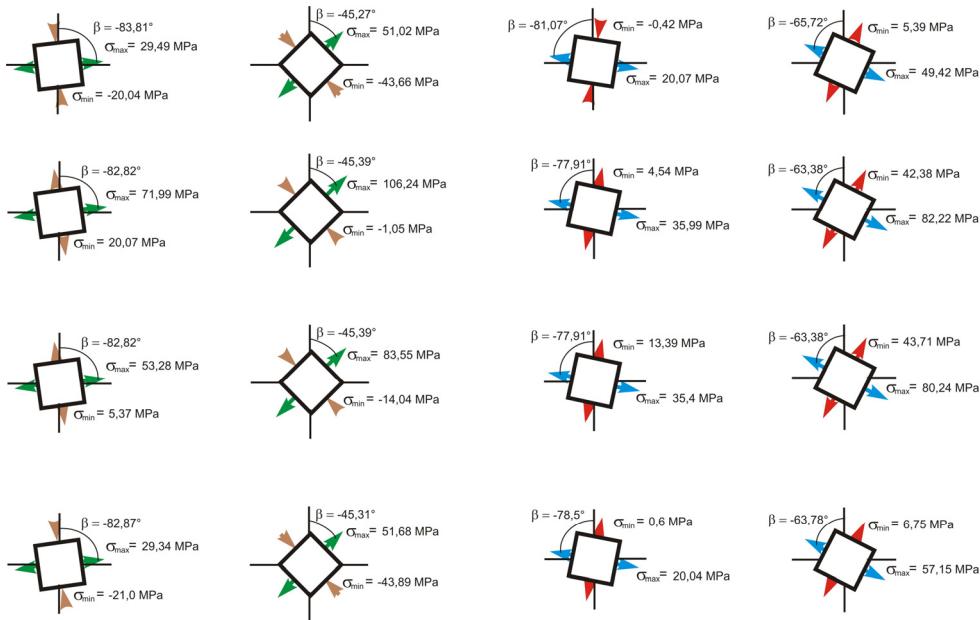
Obr.5 Reziduálne napäťia určené metódou Power Series



Obr.6 Reziduálne napäťia určené metódou integrálnou metódou



Obr.7 Veľkosti a smery hlavných zvyškových napäťí na vzorke zo zvitku, horná strana, pôvodná technológia valcovania



Obr.9 Veľkosti a smery hlavných zvyškových napäťí na vzorke zo zvitku, horná strana, alternatívna technológia valcovania

Obr.8 Veľkosti a smery hlavných zvyškových napäťí na vzorke zo zvitku, dolná strana, pôvodná technológia valcovania

Obr.10 Veľkosti a smery hlavných zvyškových napäťí na vzorke zo zvitku, dolná strana, alternatívna technológia valcovania

Veľkosti a smery hlavných zvyškových napäťí na hornej a dolnej strane tabulí vyrobených pôvodnou a novou technológiou sú uvedené v tabuľke 2, pričom označenie veličín je v zhode s obr. 7 až obr. 10.

Veľkosti a smery hlavných zvyškových napäťí v tabuliach**Tabuľka 2**

Metóda	Veličina	Pôvodná technológia				Alternatívna technológia			
		Horná strana		Dolná strana		Horná strana		Dolná strana	
		stred	okraj	stred	okraj	stred	okraj	stred	okraj
ASTM	$\sigma_{\max} [MPa]$	147,04	80,96	-105,92	-31,72	-11,07	39,85	-30,52	-52,18
	$\sigma_{\min} [MPa]$	112,52	-12,09	-155,57	-167,8	-38,36	13,43	-86,08	-85,83
	$\beta [^\circ]$	-67,47	-0,37	-83,13	87,15	-83,04	-15,51	-2,73	89,65
Integ-rálna	$\sigma_{\max} [MPa]$	142,05	80,77	230,87	64,83	-6,29	68,79	-16,74	22,03
	$\sigma_{\min} [MPa]$	81,35	15,76	151,43	-99,45	-39,19	27,49	-85,15	-64,55
	$\beta [^\circ]$	-77,02	-0,09	-82,91	86,87	89,3	-15,97	-8,79	-83,42
Kockel-manno-va	$\sigma_{\max} [MPa]$	132,34	64,59	44,65	20,81	3,2	56,69	-22,3	-13,49
	$\sigma_{\min} [MPa]$	81,18	1,07	-17,04	-103,76	-23,25	34,01	-74,2	-79,38
	$\beta [^\circ]$	-78,4	0,04	-83,2	86,82	89,3	-15,97	-8,79	-83,42
Power Series	$\sigma_{\max} [MPa]$	180,27	90,31	-149,12	-62,41	-20,63	44,25	-40,12	-74,4
	$\sigma_{\min} [MPa]$	135,76	-11,54	-204,88	-202,84	-51,69	14,23	-107,5	-107,34
	$\beta [^\circ]$	-77,8	-0,04	-82,59	86,91	89,22	-16,69	-8,13	-84,54

ZÁVER

Na základe vypočítaných hlavných normálových zvyškových napäťí, ich smerov ako aj hodnôt ekvivalentných napäťí z nameraných uvoľnených pomerných deformácií, možno vyslovieť nasledovné závery:

- Veľkosti zvyškových napäťí v plechoch (i pri ich nerovnomernom rozložení po hĺbke) vyrábaných rôznu technológiou možno jednoznačne posúdiť na základe hodnôt vypočítaných podľa ASTM E 837-01.
- Vo vzorkách odobratých zo zvitku sú hodnoty zvyškových napäťí určené podľa ASTM E 837-01 (ale i podľa metód zohľadňujúcich nerovnomerné rozdelenie zvyškových napäťí po hĺbke odvrtávania) nižšie pri alternatívnej technológií valcovania ako pri pôvodnej technológií valcovania.
- Pri alternatívnej technológií valcovania sa na okrajoch zvitku vyskytujú zvyškové napäťia, ktoré v integrálnej forme môžu vyvolávať skrucionie plechu.
- Hodnoty zvyškových napäťí na vzorke z tabuľky vyrobenej alternatívnej technológiou vo všeobecnosti výrazne poklesli voči hodnotám na vzorke z tabuľky vyrobenej pôvodnej technológiou.
- Väčšie hodnoty zvyškových napäťí v priečnom reze boli v strede tabule vyrobenej prvou technológiou. Pri novej technológií nastal v strede tabule ich výrazný pokles, hoci na okraji tabule sa hodnoty jedného z hlavných zvyškových napäťí čiastočne zvýšili.
- Vypočítané hodnoty zvyškových napäťí signalizujú potrebu optimalizácie technológie režimu chladenia tak, aby sa hodnoty zvyškových napäťí znižovali po celom priečnom priereze plechu.

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

LITERATÚRA

- [1] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Odolnosť prvkov mechanických sústav*. Emilena, Košice, 2005, 980 str., ISBN 80-8073-148-9
- [2] STN 73 1401 *Navrhovanie oceľových konštrukcií*. 1998
- [3] ASTM E 837-01. *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*
- [4] TREBUŇA, F., ŠIMČÁK, F.: *Kvantifikácia zvyškových napäťí tenzometrickými metódami*. Grafotlač, Prešov, 2005. 134 str., ISBN 80-8073-227-2
- [5] TREBUŇA, F. a kol.: *Smery avel'kosti zvyškových napäťí konštrukčných za tepla valcovaných plechov*. Záverečná správa. Košice, September 2005, 49 str.
- [6] HOLÝ, S. a kol.: *Experimentální stanovení zbytkových napäťí ako podklad pro posouzení vhodného zpôsobu obrábění*. EAN 2005, Brno, 2005
- [7] MACURA, P., FIALA, A.: *Experimentální analýza zbytkových napäťí na nosníku stejné pevnosti*. EAN 2004, Plzeň, 2004