

HODNOTENIE KVALITY LASEROM ZVÁRANÝCH OCEĽOVÝCH PLECHOV

prof. Ing. Ján Viňáš, PhD.

Katedra technológií, materiálov a počítačovej
podpory výroby
Strojnícka fakulta TU v Košiciach
Mäsiarska 74
040 01 Košice
e-mail: jan.vinas@tuke.sk

Abstract

Paper presents results of properties evaluation of laser-welded double-sided galvanized deep-drawn sheets used in the production of body parts. Welds marked TWB1 made on sheets of DX52D+Z quality with a thickness of 0.75 mm in combination with DX53D+Z with a thickness of 1.0 mm were evaluated. Welds marked TWB2 made on sheets of DX53D+Z quality with a thickness of 1.3 mm in combination with DX54D+Z with a thickness of 1.5 mm were also analysed. Joints were made as butt weld, using a solid-state laser. Quality of the joints was evaluated using tensile testing, metallographic analyses and microhardness evaluation in individual evaluated areas. Based on the experiments, recommendations were established for the welding process of these combinations of sheet qualities and thicknesses.

Key words: laser, welding, quality, properties, testing

ÚVOD

Kombinované zvárané polotovary na mieru (TWB) pozostávajú z dvoch alebo viacerých spojených kusov a môžu predstavovať kombináciu materiálov rôznej hrúbky a triedy.[1,2] Tieto zvárané polotovary našli svoje uplatnenie najmä v automobilovom priemysle, kde je spoľahlivosť ich aplikácie veľmi dôležitá. Technika spájania umožňuje ovplyvniť tvrdosť, tuhosť ako aj odolnosť proti korózii plechov v rôznych častiach výrobku.[3–5] Plechy pri výrobe TWB sa aplikujú už s vytvorenou ochrannou vrstvou povlaku. Tou je z pravidla Zn povlak. Je známe, že zinok sa odparuje pri teplote 906 °C, zatiaľ čo oceľ sa tavia pri 1100 °C. Pri bežnom spôsobe zvárania sa povlak nevyhnutne poškodí. Pri laserovom zváraní pozinkovaných oceľových plechov vzniká okolo taveniny oblasť vysokého tlaku odparovania (66 - 1060 atm.) s teplotou 1600 - 3000 °C. [6,7] Ak je medzera medzi plechmi úzka, para nemôže odísť, dochádza k odchýlkam tlaku v paroplynovom kanáli čo spôsobuje problémy pri zváraní. Výbušný proces odplynovania narúša proces zvárania a paroplynový kanál sa v dôsledku nerovnováhy

tlaku zničí.[8,9] Veľký objem roztavenej ocele je vytlačený z roztaveného zvarového kúpeľa, čo spôsobuje rozstrek alebo vznik pórov vo zvarovom kove, ktoré ovplyvňujú mechanické vlastnosti zvaru. [10,11] Za základné parametre ovplyvňujúce kvalitu zvarov sa považujú výkon lúča a rýchlosť zvárania laserom. V príspevku sú prezentované výsledky výskumu hodnotenia akosti laserom zváraných povrchovo upravených oceľových plechov rôznych kombinácií akosti a hrúbok.

METODIKA EXPERIMENTOV

V rámci experimentov boli použité tri akosti oceľových plechov rôznych hrúbok. Jednalo sa o plechy s označením DX52D+Z; DX53D+Z a DX54D+Z. Chemická kompozícia použitých plechov stanovená pomocou spektrálneho chemického analyzátoru Belec Compact Port je prezentovaná v Tab. 1 a Tab 2. Definované sú tiež základné mechanické vlastnosti plechov deklarované ich výrobcou. Všetky plechy boli obojstranne pozinkované s hrúbkou Zn vrstvy v intervale (10,0 – 12,5 µm). Zvarové spoje boli vyhotovené pomocou pevnolátkového lasera TruDISK 4002. Použité parametre zvárania jednotlivých prístrihov plechu sú zaznamenané v Tab. 3. Kvalita zvarových spojov bola hodnotená pomocou nedeštruktívnych metód kontroly zvarov. Použitá bola vizuálna kontrola v zmysle EN ISO 17637 a tiež penetračná kontrola realizovaná v zmysle EN ISO 3452, kde boli pri kontrole aplikované aerosóly z produkcie Diffu-Therm. Nedeštruktívna kontrola bola realizovaná s cieľom identifikovať prítomnosť povrchových chýb zvarov. Identifikácia vnútorných chýb sa realizovala pomocou rádiografickej metódy v zmysle EN 12517-1.

Kvalita zvarových spojov bola posudzovaná tiež pomocou deštruktívnych skúšok. So zvarencov s označením TWB1 a TWB2 boli odobraté vzorky pre metalografickú analýzu. Metalografická analýza vzoriek so zvarom sa uskutočnila na priečných metalografických výbrusoch pomocou svetelnej mikroskopie v zmysle EN ISO 17639. Štruktúry boli dokumentované pomocou svetelného Olympus VANOX-T, a makroskopu Leica WILD M3Z na vzorkách leptaných 3% leptadlom NITAL. V rámci experimentu bol posudzovaný tiež priebeh mikrotvrdosti v jednotlivých oblastiach a vplyv použitej technológie zvárania na zmeny vyvolané vneseným teplom do materiálu. Líniové analýzy mikrotvrdosti podľa Vickersa sa realizovali v zmysle EN ISO 9015-2 na zariadení Shimadzu HMV 2. Pevnosť zvarových spojov bola hodnotená na základe skúšky ťahom realizovanej podľa EN ISO 4136 na skúšobných vzorkách ktorých schéma

je dokumentovaná na obr. 1. Skúška ťahom sa uskutočnila na trhácom stroji TiraTest 2300.

tab. 1. Chemické zloženie v [% hm] a mechanické vlastnosti plechov vzorky TWB1

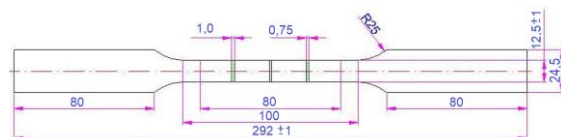
Materiál	DX52D+Z	DX53D+Z
Hrúbka plechu [mm]	1,0	0,75
C	0,018	0,04
Mn	0,18	0,20
Si	0,16	0,12
Al	-	0,03
Ti	0,10	-
Nb	-	-
P	0,026	0,018
S	0,011	0,008
Fe	zvyšok	zvyšok
Mechanické vlastnosti		
R _{p0,2} [MPa]	140-300	140-260
R _m [MPa]	270-420	270-380
A ₈₀ [%]	22	26

tab. 2. Chemické zloženie v [% hm] a mechanické vlastnosti plechov vzorky TWB2

Materiál	DX53D+Z	DX54D+Z
Hrúbka plechu [mm]	1,5	1,3
C	0,04	0,07
Mn	0,20	0,22
Si	0,12	0,17
Al	0,03	0,04
Ti	-	0,30
Nb	-	0,03
P	0,015	0,015
S	0,010	0,008
Fe	zvyšok	zvyšok
Mechanické vlastnosti		
R _{p0,2} [MPa]	140-260	120-220
R _m [MPa]	260-350	260-350
A ₈₀ [%]	30	36

tab. 3 Použité parametre laserového zvarovania

Materiál	TWB1	TWB2
Výkon lúčas [kW]	2,5	2,9
Zváracia rýchlosť [mm.s ⁻¹]	45	40
Fokusácia [mm]	0	0
Zvarová medzera [mm]	0	0
Poloha zvarovania	PA	PA
Ochranný plyn	Ar (4,9)	Ar (4,9)
Tlak ochranného plynu [MPa]	0,2	0,2
P	0,015	0,015



Obr. 1 Skúšobná vzorka TWB1 pre skúšku ťahom

Dosiahnuté výsledky

Výsledky skúšky ťahom sú dokumentované na vybraných pevnostných vlastnostiach zvarových spojov v Tab. 4.

tab. 4 Priemerné hodnoty mechanických vlastností zvarových spojov vzoriek TWB1 a TWB2 na základe skúšok podľa EN ISO 4136

Vzorky	Re [MPa]	Rm [MPa]	A ₅ [%]	Miesto porušenia
TWB1	187	287	21,2	5x ZM DX52D+Z (0,75 mm)
TWB2	321	396	19,1	5x ZM DX52D+Z (0,75 mm)

Výsledky skúšky ťahom sú v súlade s hodnotami mechanických vlastností použitých základných materiálov deklarovaných výrobcom plechov. K deštrukcii zvarovaných vzoriek došlo vo všetkých prípadoch mimo zvaru.

Priemerné hodnoty mikrotvrdoosti na vzorkách č. 3 a č. 4 odobratých so zvarenia s označením TWB1 sú zaznamenané v Tab. 5. Podobne sú v Tab. 6 dokumentované priemerné hodnoty mikrotvrdoosti namerané na vzorkách č. 1 a č. 2, ktoré boli odobraté so zvarenia s označením TWB2.

tab. 5. Priemerné hodnoty mikrotvrdoosti HV 0,01 vzoriek z TWB1

	Miesto meraní	Vz. 3	Vz. 4
1	Základný materiál 1 DX52D+Z (1,0 mm)	106	108
2	TOO 1 DX52D+Z (1,0 mm)	122	125
3	Zvar	229	234
4	TOO 2 DX53D+Z (0,75 mm)	111	118
5	Základný materiál 2 DX53D+Z (0,75 mm)	112	114

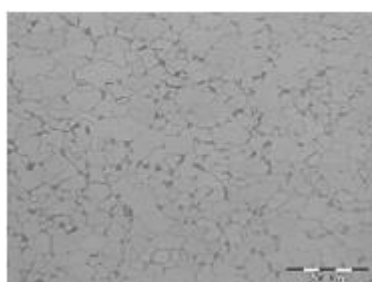
tab. 6. Priemerné hodnoty mikrotvrdoosti HV 0,01 vzoriek z TWB2

	Miesto meraní	Vz. 1	Vz. 2
1	Základný materiál 1 DX53D+Z (1,5 mm)	112	111
2	TOO DX53D+Z (1,5 mm)	126	129
3	Zvar	235	242
4	TOO 2 DX54D+Z (1,3 mm)	125	124
5	Základný materiál 2 DX54D+Z (1,3 mm)	112	113

Maximálne priemerné hodnoty mikrotvrdoosti v intervale 235-342 HV0,01 boli namerané vo zvarovom kove vzoriek odobratých zo zvaru TWB2. Zvarový kov vzoriek z TWB1 vykazoval tvrdosti v rozsahu 229-234 HV0,01.

Výsledky metalografických analýz sú dokumentované na obr. 2 a obr. 3. Mikroštruktúra základného materiálu ocele DX52D+Z je feritická.

Ostatné typy oceli majú štruktúru tvorenú polyedrickým feritom s minimálnym podielom perlitu. V teplom ovplyvnenej oblasti (TOO), ktorá bola vzhľadom na použitú metódu zvárania úzka, bolo zaznamenané zhrubnutie zŕn základného materiálu vplyvom vneseného pri zváraní. Laserom zhotovený zvarový kov má charakteristickú dendritickú feriticko-perliticko-cementitickú štruktúru. Prítomnosť vnútorných chýb vo zvarovom kove nebola na metalografických výbrusoch pozorovaná. Zaznamenaný bol nevhodný konvexný tvar zvarového spoja, čo môže pri namáhaní vyvolať iniciáciu porušenia. U spojov rôznych hrúbok býva táto chyba častá a jej eliminácia si vyžaduje dôslednú optimalizáciu parametrov zvárania, no najmä ustavenia plechov pri zváraní.



a)



b)



c)

Obr. 2 Štruktúry zvarového spoja TWB 1
a) základný materiál DX52D+Z; b) TOO ocele DX53D+Z; c) zvarový kov TWB 1



a)



b)



Obr. 3 Štruktúry zvarového spoja TWB 2
a) základný materiál DX53D+Z; b) TOO ocele DX54D+Z; c) zvarový kov TWB 2

ZÁVER

Zváranie laserom a spájkovanie laserom má stúpajúci podiel pri výrobe karosérii osobných automobilov. Vysoká produktivita zvárania ako aj kvalita zvarových spojov sú dôvody nárastu aplikácii práve týchto metód. Ďalšou výhodou je tiež možnosť jednoduchšej kontroly spojov v porovnaní so spojmi zhotovenými pomocou odporového bodového zvárania, kde je pomerne ťažké identifikovať pomocou NDT studené spoje. Zváranie laserom je vhodnou technológiou tiež pri výrobe heterogénnych spojov, tj. spojov zhotovených na rôznorodých akostiach plechov. Zváranie laserom je vhodné pre vytváranie spojov na vysokopevných napr. multifázových typoch ocelí ako aj na konvenčných hlbokotlačných typoch respektíve plechoch z BH a IF ocelí. V príspevku boli prezentované výsledky výskumu akosti zvarových spojov vyrobených pomocou zvárania na pevnolátkovom lasery TruDISK 4002. Analyzované boli možnosti zvárania povrchovo upravených karosárskych plechov DX52D+Z,

DX53D+Z and DX54D+Z EN 10346: 2015. Použité boli pozinkované oceľové plechy hrúbok 0,75; 1,0; 1,3 a 1,5 mm. Na základe realizovaných experimentov je možné konštatovať, že všetky hodnotené akosti plechov sú vhodné pre zváranie laserom. Taktiež zvolené parametre zvárania možno označiť ako vhodné, nakoľko nedochádzalo k vzniku vonkajších ani vnútorných chýb vo zvaroch. Rozmery jednotlivých oblasti zvarového spoja zodpovedajú použitým parametrom zvárania. Štruktúrna analýza prezentovala charakteristické zmeny pôvodnej jemnozrnnnej ferickej a feriticko-cementitickej štruktúry na štruktúry s meniacou sa veľkosťou zŕn, charakteristické pre úzke oblasti TOO a dendritickú štruktúru acikulárneho feritu s malým podielom polyedrického feritu vo zvarovom kove, ako aj s dobre čitateľným procesom tuhnutia zvarového kovu. Namerané hodnoty mikrotvrdosti v rozsahu 106 až 234 HV 0,01 pre TWB1 a rozsahu 111 – 242 HV 0,01 pre TWB2 zodpovedajú pozorovaným štruktúram v jednotlivých oblastiach zvarového spoja. Vysoký tepelný výkon, ako aj vysoká rýchlosť ochladzovania zvarového kovu stimulujú tvorbu jemnej mikroštruktúry v rámci zvaru s úzkou šírkou. K deštrukcii zvarových spojov počas statickej skúšky ťahom dochádzalo mimo zvaru, vždy v tenšom základnom materiáli vzorky. Zníženie rýchlosti zvárania pri zachovaní ostatných parametrov procesu eliminuje zmršťovacie dutiny predovšetkým v hornej časti zvaru. Vzniká však zárodok nemenej nebezpečnej chyby a to tvorba penetračnej zóny s nestabilnou šírkou zvaru. Aktívny vznik defektov v tepelne ovplyvnenej zóne je zároveň zvyčajne sprevádzaný redistribúciou chemických prvkov a dokonca disperzných fáz, čo následne stimuluje procesy fázových formácií v kove. Okrem toho môžu fázové útvary určitých rozmerov „posilniť“ hranice zŕn, čo prispieva k zjemneniu štruktúry. Ako dôležitá sa v rámci experimentov ukázala príprava zvarových hrán. Spájané plechy a obzvlášť plechy rôznych hrúbok plechov nesmú vykazovať na strižných hranách otrepy. Je nevyhnutné aby pri zváraní bola použitá nulová medzera medzi plechmi, čo minimalizuje vznik konvexných stiahnutí zvarového kovu na povrchu a koreni zvaru. Tieto stiahnutiny majú vrubový účinok a sú často miestami iniciácie porušenia laserom zhotovených zvarov. Nezanedbateľné je pre automobilový priemysel tiež estetické hľadisko v miestach spojov. Laserové zváranie je jednou z perspektívnych metód výroby karosérií automobilov.

Podakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektov APVV-20-0303 - Inovatívne prístupy pri obnove funkčných povrchov laserovým naváraním, projektu VEGA 1/0229/23 - Výskum využiteľnosti

technológie termálneho vŕtania na tvorbu multimateriálových spojov v automotive a projektu 046TUKE-4/2022 - Inovácia vzdelávacieho procesu implementáciou adaptívnych hypermediálnych systémov vo výučbe predmetov z oblasti technológií povlakovania a zvárania materiálov.

Literatúra

- [1] Uchihara, M.: Tailor Welded Blanks. *J. Japan Soc. Technol. Plast.* 2013, doi:10.9773/sosei.54.307.
- [2] Sun, G.; Tan, D.; Lv, X.; Yan, X.; Li, Q.; Huang, X.: Multi-Objective Topology Optimization of a Vehicle Door Using Multiple Material Tailor-Welded Blank (TWB) Technology. *Adv. Eng. Softw.* 2018, doi:10.1016/j.advengsoft.2018.06.014.
- [3] Staufer, H.: Laser Hybrid Welding in the Automotive Industry. *Weld. J. (Miami, Fla)* 2007.
- [4] Staufer, H.: Applications and Case Studies of Laser Hybrid Welding in the Automotive Industry. *Int. J. Microstruct. Mater. Prop.* 2010, doi:10.1504/IJMMP.2010.035942.
- [5] Katayama, S.: *Handbook of Laser Welding Technologies*; 2013; ISBN 9780857098771.
- [6] Dasgupta, A.K.; Mazumder, J.: Laser Welding of Zinc Coated Steel: An Alternative to Resistance Spot Welding. *Sci. Technol. Weld. Join.* 2008.
- [7] Zdravecká, E.; Slota, J.: Mechanical and Microstructural Investigations of the Laser Welding of Different Zinc-Coated Steels. *Metals (Basel)*. 2019, doi:10.3390/met9010091.
- [8] Kim, J.; Oh, S.; Son, M.; Ki, H.: A Study of Keyhole Behavior and Weldability in Zero-Gap Laser Welding of Zinc-Coated Steel Sheets at Subatmospheric Pressures. *J. Mater. Process. Technol.* 2017, doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.05.044.
- [9] Colombo, D.; Previtali, B.: Laser Dimpling and Remote Welding of Zinc-Coated Steels for Automotive Applications. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2014, doi:10.1007/s00170-014-5690-1.
- [10] Zhou, J.; Tsai, H.L.; Lehnhoff, T.F.: Investigation of Transport Phenomena and Defect Formation in Pulsed Laser Keyhole Welding of Zinc-Coated Steels. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2006, doi:10.1088/0022-3727/39/24/036.
- [11] Wan, Z.; Wang, H.P.; Li, J.; Yang, B.; Solomon, J.; Carlson, B.E. Effect of Welding Mode on Remote Laser Stitch Welding of Zinc-Coated Steel With Different Sheet Thickness Combinations. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2023, doi:10.1115/1.4055792.