

ANALÝZA VPLYVU PARAMETROV BODOVÉHO ODPOROVÉHO ZVÁRANIA NA KVALITU ZVAROVÝCH SPOJOV

René KUBÍK

THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF RESISTANCE SPOT WELDING PARAMETERS ON THE QUALITY OF SPOT WELDS

Abstrakt

Cieľom tejto štúdie je kvantifikovať vplyv parametrov bodového odporového zvarovania (zváracieho prúdu, času a prítláčnej sily) na kvalitu bodových zvarových spojov pri zvarení dvojfázovej ocele HCT 600 X. Interné nespojitosti v bodových zvarových spojoch akými sú dutiny, póry či trhliny majú za následok pokles únosnosti spoja, čo v prevádzkových podmienkach môže viesť k neželaným následkom. Tieto nespojitosti sa môžu vyskytovať vo zvarových spojoch z dôvodu nevhodnej voľby zváracích parametrov ktorými sú zvárací prúd, čas a prítláčna sila. Vplyv zváracích parametrov bol hodnotený ťahovou skúškou a metalografickou analýzou zvarových spojov.

Kľúčové slová: zváracie parametre, ťahová skúška, metalografická analýza, dvojfázová ocel, progresívne vysokopevné ocele

Abstract

The main goal of this paper is to quantify the influence of resistance spot welding parameters (welding current, time and pressing force) on the quality of resistance spot welds during dual phase (HCT 600 X) steel welding. Internal discontinuities may occur in spot welds such as cavities, porosity or cracks that may decrease spot weld's load-bearing capacity. This can lead into undesired consequences during joint loading in engineering practice. These discontinuities in spot welds can occur when improper welding parameters (welding current, time and pressing force) are used during welding. The influence of welding parameters on spot welds quality was evaluated by tensile test and metallographic analysis of spot welds.

Key words: welding parameters, tensile test, metallographic analysis, dual phase steel, advanced high strength steels.

Úvod

Bodové odporové zváranie je v oblasti spájania plechov automobilovej karosérie používané od roku 1950 a zároveň je dominantnou a efektívnou metódou spájania oceľových plechov v automobilovom priemysle. [1] Pre tento priemysel boli špecificky vyvinuté materiály spadajúce do kategórie progresívnych vysokopevných ocelí. Jedným z týchto materiálov je dvojfázová ocel, ktorá v sebe kombinuje vlastnosti vysokej pevnosti a dobrej tváriteľnosti. Progresívne vysokopevné ocele sa začali používať v automobilovej karosérii pre zvýšenie bezpečnosti pasažierov absorpciou nárazovej energie a zároveň z dôvodu redukcie hmotnosti vozidla čo vedie k zníženiu spotreby pohonných hmôt vozidla. Feriticko-martenzitické dvojfázové (DP – dual phase) ocele patria medzi bežne používané ocele z kategórie progresívnych vysokopevných ocelí (AHSS – advanced high strength steels) v automobilovom priemysle. [2] DP ocele sú produkované kontrolovaným ochladzovaním z austenitickej alebo feriticko-austenitickej fázy transformáciou austenitu na ferit pred rapidným ochladzovaním, ktoré transformuje zvyšný austenit na martenzit. [3] Bodové odporové zváranie je primárnou zvaracou metódou pre materiály vo forme plechov a používa sa v automobilovom priemysle ako vysoko produktívna alternatíva k iným zváracím metódam. [4,5]

Kvalita bodového odporového zvaru je ovplyvnená niekoľkými faktormi: elektrický prúd, prítláčna sila zváracích elektród, čas zvarovania, materiál zváracích elektród, hrúbka a druh zvarovaných materiálov. Experimentálne štúdie z pohľadu formovania zvarovej šošovky poskytujú informácie o vplyve rôznych zváracích parametrov na vlastnosti zvarového spoja.

Metodika experimentu

Pre experiment bola použitá dvojfázová ocel DP 600 alebo HCT 600 X o hrúbke 0,9 mm. Tento typ ocele patrí na základe klasifikácie z pohľadu pevnosti do kategórie progresívnych vysokopevných ocelí (AHSS). Základné mechanické vlastnosti a chemické zloženie ocele DP 600 sú uvedené v Tab. 1 a 2.

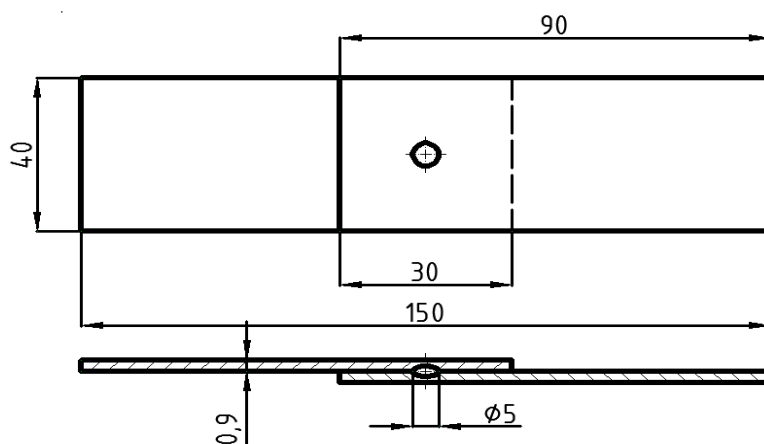
Tab. 1 Mechanické vlastnosti ocele DP 600

R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₈₀ [%]	n
600	330	20	0,14

Tab. 2 Chemické zloženie ocele DP 600

C	Mn	Si	P	Al	Cu
0,086	1,857	0,022	0,018	0,071	0,012
Cr	W	Co	V	Nb	Mo
0,203	< 0,002	0,015	0,011	0,016	0,178
S	Ti		Ni		
< 0,002	< 0,002		< 0,002		

Z materiálu uvedeného vyššie boli strihaním vyrobené normalizované vzorky s rozmermi 40 x 90 mm a preplátovaním 30 mm v zmysle normy STN 05 1122 (Obr. 1). Následne boli vzorky odmastené a bodovo zvarené na bodovej zvaračke BPK 20 (VTS Electro Bratislava) Cu-Cr zvaracími elektródami (ON 42 3039.71). Špičky zvaracích elektród boli upravené do tvaru kužľa a priemer ich pracovnej plochy bol 5 mm.



Obr. 1 Rozmery normalizovanej vzorky pre skúšku ťahom

Parametre bodového odporového zvarovania (I – zvarací prúd, T – zvarací čas a F_z – prítláčná sila) nie sú pre zváranie DP ocelí normalizované. Avšak obsah uhlíka u DP ocelí neprekračuje 0,18% a preto môžu byť považované za nízkouhlíkové ocele, čiže počas experimentu boli DP ocele zvárané parametrami rovnakými akými sú zvárané nízkouhlíkové ocele. Tieto parametre bodového odporového zvarovania boli prevzaté od Medzinárodného zvaracieho inštitútu (IIW).

Tab. 3 Parametre BOZ pre vzorky B

	Welding parameters		
	T [per.]	F_z [kN]	I [kA]
B _I	10	5,0	5
B _{II}	15		
B _{III}	20		
B _{IV}	25		
B _V	30		
B _{VI}	35		
B _{VII}	40		
B _{VIII}	45		

Vplyv parametrov bodového odporového zvarovania na kvalitu bodových zvarových spojov bol hodnotený zváraním vzoriek s premenlivými hodnotami zvaracieho prúdu a času, následne sa vykonala skúška ťahom zvarovaných vzoriek a nakoniec ich metalografická analýza. Parametre bodového odporového zvarovania pre zváranie ocele DP 600 použité počas experimentu sú uvedené v Tab. 3 a 4.

Tab. 4 Parametre BOZ pre vzorky A

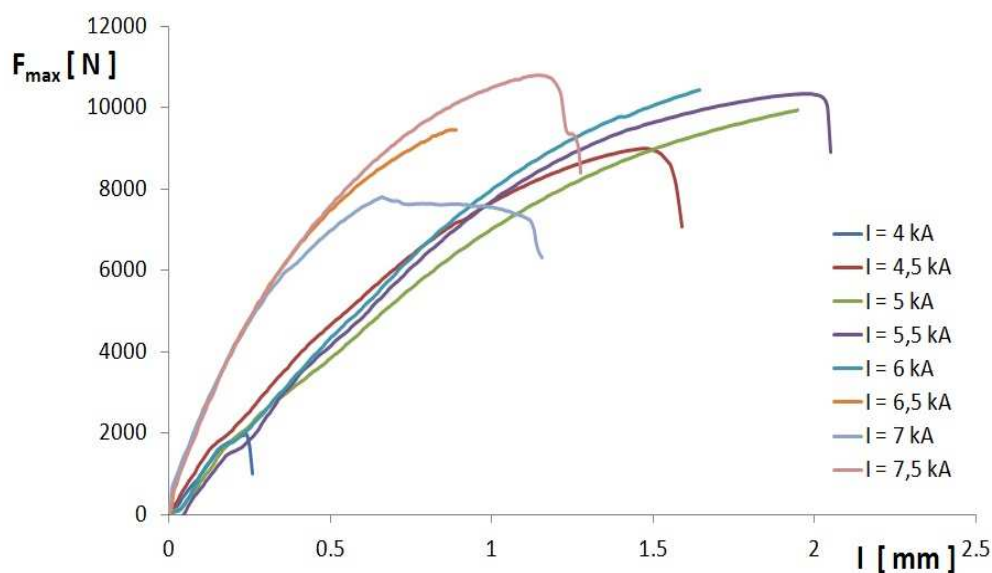
	Welding parameters		
	I [kA]	F _z [kN]	T [per.]
A _I	4,0	5,0	20
A _{II}	4,5		
A _{III}	5,0		
A _{IV}	5,5		
A _V	6,0		
A _{VI}	6,5		
A _{VII}	7,0		
A _{VIII}	7,5		

Vzorky s označením A boli zvárané s narastajúcou hodnotou zváracieho prúdu (I), hodnoty zváracieho času (T=20 per.) a prílačnej sily (F_z=5 kN) boli konštantné. Vzorky s označením B boli zvárané s narastajúcou hodnotou zváracieho času (T), hodnoty zváracieho prúdu (I=5 kA) a prílačnej sily (F_z=5 kN) boli konštantné.

Výsledky a diskusia

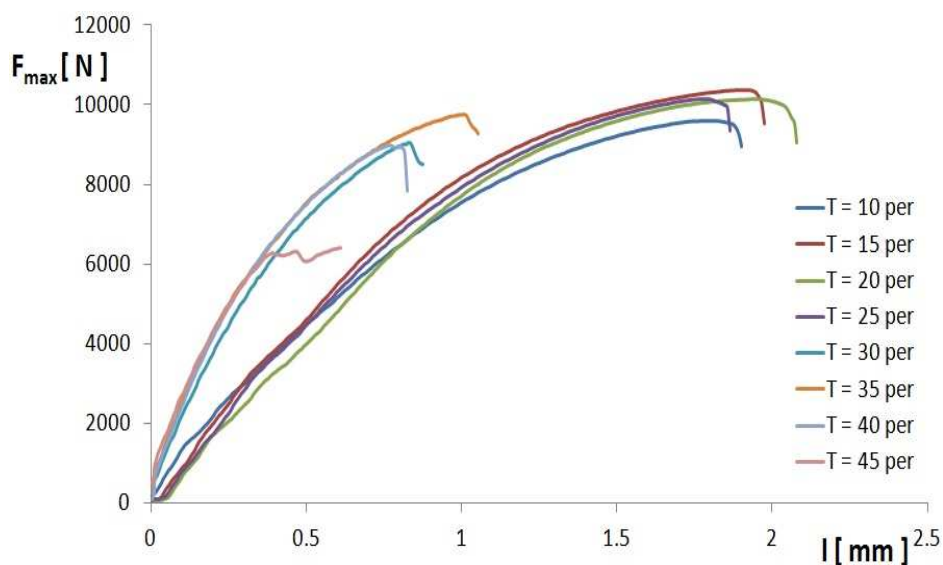
V priebehu bodového zvárania sa vyskytol iba jeden typ zvarového spoja a to tavný zvarový spoj, okrem vzorky A_I ktorá bola zváraná s najnižšou hodnotou zváracieho prúdu I=4 kA. Tepelná energia pre vytvorenie zvarového spoja bola nedostatočná, čo sa prejavilo vznikom tzv. studeného zvaru u spomínanej vzorky.

Obr. 2 zobrazuje výsledky ťahovej skúšky pre vzorky A. Studený zvar u vzorky A_I mal najnižšiu únosnosť: F_{max}=2000 N. Zvyšné vzorky A_{II} ÷ A_{VIII} vykazovali vyššie hodnoty únosnosti, hodnoty sa pohybovali v intervale od 7500 do 10 800 N. Dostatočná úroveň zváracieho prúdu zabezpečila potrebnú tepelnú energiu pre vytvorenie tavných zvarových spojov požadovanej kvality vo vzťahu k únosnosti. U vzoriek A_{VII} a A_{VIII} zváraných najvyššími hodnotami zváracieho prúdu (vyššími ako sa odporúča) sa objavila expanzia tekutého jadra zvarovej šošovky, avšak tento jav nemal žiaden značný negatívny dopad na ich únosnosť.



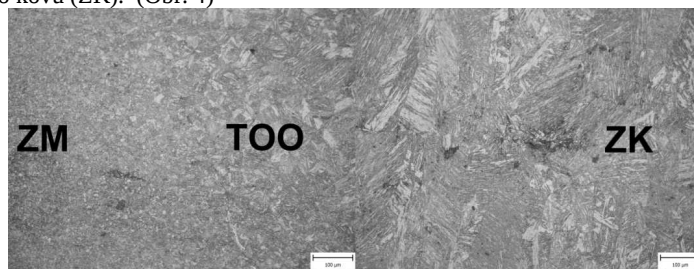
Obr. 2 Závislosť sily na dráhe u vzoriek A

Obr. 3 zobrazuje výsledky ťahovej skúšky pre vzorky B. U všetkých týchto vzoriek sa vyskytol tavný zvarový spoj. Hodnoty únosnosti ktoré boli namerané v priebehu ťahovej skúšky sa pohybovali od 9000 do 10 400 N. Pokles únosnosti (F_{max}=6400 N) bol pozorovaný u vzorky B_{VIII} (T=45 per.). Vzorky ktoré boli zvárané vyššími hodnotami zváracieho času (T=30 ÷ 40 per.) vykazovali nárast hodnôt únosnosti okolo 3000 N. Expanzia bola pozorovaná u vzoriek B_{VI}, B_{VII} a B_{VIII} čo viedlo k poklesu únosnosti len u vzorky B_{VIII}.



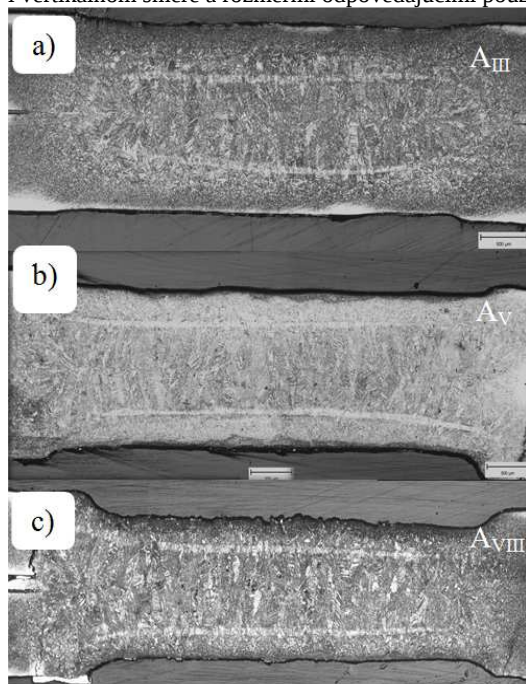
Obr. 3 Závislosť sily na dráhe u vzoriek B

Metalografická analýza potvrdila formovanie tavných bodových zvarových spojov u všetkých vzoriek A, okrem vzorky A_I ktorá bola zváraná najnižšou hodnotou zvaracieho prúdu $I=4$ kA, čiže u tejto vzorky vznikol studený zvar. U vzoriek s tavným zvarovým spojom boli pozorované charakteristické oblasti základného materiálu (ZM), tepelne ovplyvnenej oblasti (TOO) a oblasti zvarového kovu (ZK). (Obr. 4)



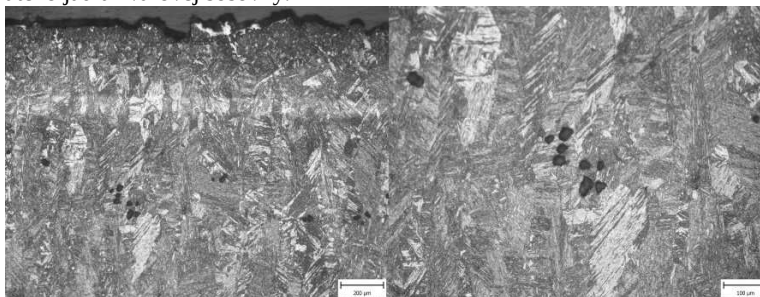
Obr. 4 Štruktúra ZM, TOO a ZK ocele DP 600

Obr. 5 zobrazuje mikroštruktúru bodových zvarových spojov vzoriek A_{III}, A_V a A_{VIII}. Všetky tieto vzorky zobrazujú proces tuhnutia zvarového kovu s charakteristickou dendritickou štruktúrou, symetrickým tvarom zvarovej šošovky v horizontálnom i vertikálnom smere a rozmermi odpovedajúcimi použitým zvaracím elektródam.

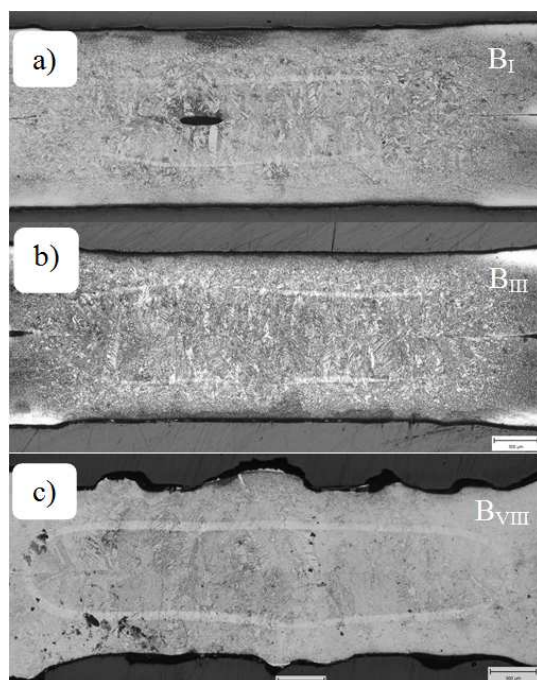
Obr. 5 Mikroštruktúra vzoriek A_{III}, A_V a A_{VIII}

Mikroštruktúra týchto vzoriek pozostáva z troch významných oblastí. Oblasť základného materiálu (ZM) pozostáva z jemnozrnnej štruktúry feritickej matrice obsahujúcej druhú tvrdú martenzitickú fázu vo forme ostrovčekov. Prechodová oblasť medzi ZM a zvarovým kovom (ZK) tvorí tepelne ovplyvnená oblasť s hrubozrnou štruktúrou pozostávajúcou z martenzitickej fázy. Oblasť zvarového kovu pozostáva takmer výhradne z martenzitu ako dôsledok rýchleho ochladzovania bodového zvarového spoja, kde sa austenit transformuje na martenzit. Vzorka A_{III} má najvýraznejšie viditeľné oblasti ZM, TOO a ZK bez výraznejšie viditeľných nespojitostí v zvarovom kove. Veľkosť bodového zvaru odpovedá priemeru špičky použitej zvaracej elektródy. S narastajúcou hodnotou zvaracieho prúdu narastala aj veľkosť zvarovej šošovky u vzoriek A_V a A_{VIII}.

Prítomnosť malých dutín (Obr. 5b a 5c) možno pozorovať u vzoriek A_V a A_{VIII} ($I=6,0$ kA a $7,5$ kA). Tieto dutiny vytvorené v zvarovom kove sú dôsledkom vysokých hodnôt zvaracieho prúdu, kde došlo k roztaveniu zinkovej vrstvy na povrchu plechu a jeho následnému odpareniu. Nebol zaznamenaný žiaden pokles únosnosti u vzoriek A_V a A_{VIII} z dôvodu prítomnosti interných nespojitostí. Obr. 6 zobrazuje detail dutín vzniknutých v zvarovom kove vzorky A_{VIII} v dôsledku nukleácie a rastu v priebehu tuhnutia tekutého jadra zvarovej šošovky.



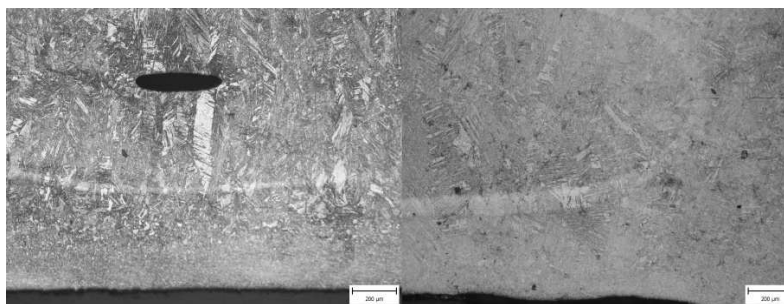
Obr. 6 Nespojitosti v oblasti zvarového kovu vzorky A_{VIII}



Obr. 7 Mikroštruktúra vzoriek B_I , B_{III} a B_{VIII}

Prítomnosť veľkej dutiny možno pozorovať v centrálnej časti zvarového kovu vzorky B_I (Obr. 7a). Táto vzorka má najmenšie rozmery zvarovej šošovky v porovnaní so zvyšnými vzorkami skupiny B, pretože použitie zvaracieho času ($T=10$ per.) zapríčinilo nedostatočný rozvoj tepelnej energie pre vytvorenie kvalitného zvaru. Z dôvodu objemového zmršťovania v priebehu tuhnutia zvarovej šošovky sa vytvorila veľká dutina v oblasti zvarového kovu vzorky B_I . S narastajúcou hodnotou zvaracieho času zároveň narastali aj rozmery zvarovej šošovky vzoriek B_{III} a B_{VIII} (Obr. 7b a 7c). Žiadne výrazné nespojitosti neboli pozorované v oblasti zvarového kovu vzorky B_{III} ktorá bola zváraná zvaracím časom $T=20$ per. Najvyššie hodnoty zvaracieho času ($T=45$ per.) boli príčinou výraznej deformácie na rozhraní zvaracia elektróda/povrch plechu s následným značným opotrebením špičiek zvaracích elektród. Taktiež bolo pozorované zvýšené množstvo pórov a dutín v oblasti ZK a TOO vzorky B_{VIII} ako dôsledok expanzie jadra zvarovej šošovky v priebehu zvarovania.

Obr. 8 zobrazuje detailný pohľad na interné nespojitosti v oblasti zvarového kovu a tepelne ovplyvnenej oblasti u vzoriek B_I a B_{VIII} .



Obr. 8 Nespojitosti v oblasti ZK a TOO vzoriek B_I (vľavo) a B_{VIII} (vpravo)

Interná nespojitost' typu dutina bola pozorovaná v centrálnej časti zvarového kovu vzorky B_I (Obr. 8 vľavo) a niekoľko pórov prítomných v oblastiach zvarového kovu a tepelne ovplyvnenej oblasti vzorky B_{VIII}. U vzorky B_{VIII} bol pozorovaný pokles únosnosti cca o 3000 N v porovnaní so zvyšnými vzorkami skupiny B.

Záver

Parametre bodového odporového zvarovania dvojfázových ocelí musia byť optimalizované, aby sa v priebehu zvarovania predišlo vzniku interných nespojitostí ktoré priamo prispievajú k redukcii únosnosti zvarového spoja čo predstavuje potenciálne riziko pri nasadení konkrétnej konštrukcie do prevádzkových podmienok. Preto boli v tejto štúdii skúmané účinky zvaracieho prúdu a času na kvalitu zvarových spojov pri zvaraní dvojfázovej ocele DP 600. S výnimkou vzorky A_I zvaranej najnižšou hodnotou zvaracieho prúdu I=4 kA boli pozorované iba tavné zvarové spoje. Najvyššia hodnota únosnosti bola nameraná u vzoriek zvaraných zvaracím prúdom 7,5 kA, avšak metalografická analýza odhalila prítomnosť trhlín a dutín v zvarovej šošovke. Najvýznamnejší vplyv na kvalitu zvarových spojov ocele DP 600 má zvarací prúd. Hodnota zvaracieho prúdu 5 kA mala za dôsledok tavný zvarový spoj požadovanej kvality bez akýchkoľvek defektov, avšak rozmery zvarovej šošovky boli menšie a zároveň nižšie hodnoty únosnosti. Zvyšovanie hodnoty zvaracieho času až do T=25 per. spôsobilo zvýšenie únosnosti zvarových spojov. Ďalšie zvyšovanie zvaracieho času nad 45 per. neviedlo k zvýšeniu únosnosti, pretože v zvarových šošovkách sa objavili dutiny a póry. Tieto nespojitosti sa negatívne prejavili na únosnosti bodových zvarových spojov.

Pod'akovanie

Príspevok bol spracovaný v rámci projektu APPV 14-0834.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] Mucha, J. – Bartczak, B.: Sheets clinching process analysis. Archives of Mechanical Technology and Automation, 31, 2011, s. 59-68.
- [2] Pouranvari, M: Susceptibility to interfacial failure mode in similar and dissimilar resistance spot welds of DP600 dual phase steel and low carbon steel during cross-tension and tensile/shear loading conditions, Materials Science & Engineering A, Vol. 546, 2012, p. 129-138.
- [3] Kaščák, Ľ. - Mucha, J. - Slota, J. - Spišák, E.: Application of modern joining methods in car production, 1st edition, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2013.
- [4] Zhang, H. - Senkara, J.: Resistance welding: Fundamentals and Applications, 2nd edition, Taylor & Francis, New York, 2006.
- [5] Kaščák, Ľ. - Brezinová, J. – Halama, M. - Viňáš, J.: Quality Evaluation of Resistance Spot Welds of Hot-Dip Galvanized Sheets In Corrosive Environment, Chemické Listy, Vol. 105, 2011, p. 709-712.

ADRESA AUTORA:

Ing. René Kubík, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra počítačovej podpory technológií, Mäsiarska 74, 040 01 Košice, Slovenská republika, e-mail: rene.kubik@tuke.sk

RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU

Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.

REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS

Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.