
Možnosti využitia technológie termálneho vrtania na účely spájania tenkostenných nerovnakých materiálov v automobilovom priemysle

Anna Guzanová, doc. Ing., PhD.*

Katedra technológií, materiálov a počítačovej podpory výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: anna.guzanova@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3515

Nikita Veligotskyi, Ing.

Katedra technológií, materiálov a počítačovej podpory výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: nikita.veligotskyi@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3515

Dagmar Draganovská, doc. Ing., PhD.

Katedra technológií, materiálov a počítačovej podpory výroby, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Mäsiarska 74, 040 01 Košice.
E-mail: dagmar.draganovska@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 3515

Possibilities of using thermal drilling technology for joining thin-walled dissimilar materials in the automotive industry

Abstract: The article deals with the study of the applicability of flowdrill technology for the formation of joints between thin metallic materials based on iron and aluminium alloy. This technology is primarily used to create holes in profiles with a local increase in material thickness to accommodate a greater number of threads. If used to drill two interleaved thin-walled materials, a joint is formed as a secondary effect. The quality of the resulting bushings forming the interference fit joint was investigated. The joints were formed using a combination of uncoated deep drawn steel, galvanized *HSLA* steel and *aluminum* alloy, in different positions in the joint. Subsequently, tensile shear testing of single joints was performed. The load carrying capacity of the joints was also tested in combination with adhesive bonding. The load capacity of the joints combined with bonding was significantly higher compared to flowdrill joints. The combination of both technologies yields an increase in the absorbed energy of the joint at failure.

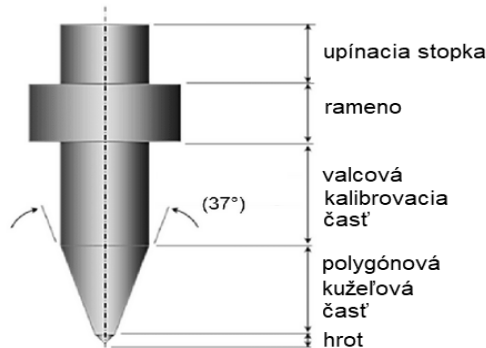
Keywords: joining, thermal drilling, dissipated energy.

ÚVOD

Technológia termálneho vrtania (*flowdrill*) je beztriesková technológia výroby otvorov s lokálnym pretvorením materiálu do tvaru puzdra, ktorá produkuje minimálne množstvo odpadu a tým prispieva k ochrane životného prostredia a šetreniu materiálu [1-3]. Vrták sa pomocou relatívne vysokého axiálneho tlaku a rýchlosti otáčania tlačí do materiálu, v ktorom vplyvom trecieho tepla ($600\text{ }^{\circ}\text{C} \div 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) dôjde k zmäkčeniu materiálu a následnému preniknutiu nástroja [4-6]. Pri prenikaní nástroja dochádza k plastickému toku materiálu v smere vrtania, ktorý vytvorí puzdro, ako aj proti

smere vrtania, čo vytvorí golier. Do vytvoreného puzdra je možné vytvoriť závit na upevnenie spojovacieho elementu [7]. Tvar nástroja má priamy vplyv na tvar vytvoreného puzdra a goliera [8-10] (obr. 1). Hrot nástroja iniciuje vznik otvoru, polygónová kužeľová časť generuje trecie teplo a následne vytlačí deformovaný materiál. Valcová kalibračná časť nástroja tvaruje puzdro do valcového tvaru a prírubová časť má za úlohu tvarovať golier. Táto časť môže mať aj reznú hranu, ktorá môže golier odstrániť [11, 12]. Dĺžka a priemer nástroja, ako aj tvárniace parametre (otáčky, posuv) sa volí s ohľadom na hrúbku materiálu, ktorý sa má vrtáť. Dĺžka nástroja sa volí s ohľadom na hrúbku

materiálu, ktorý sa má vŕtať. Experimentuje sa aj s tzv. kombinovaným nástrojom s dvoma priermi, pomocou ktorého je možné výrazne znížiť axiálnu silu v procese vŕtania a tým znížiť deformáciu obrobku a predĺžiť životnosť nástroja. Životnosť nástrojov je ovplyvnená aj správnym mazaním a celkovou údržbou.



Obr. 1. Časti nástroja na termálne vŕtanie

Pri štúdiu procesu termálneho vŕtania vzniká otázka, či by bolo možné využiť ho aj na spájanie tenkostenných materiálov preniknutím nástroja cez preplátované materiály, kde by dve vnorené puzdrá vytvorili tvarový spoj [13].

Pri využití technológie termálneho vŕtania na spájanie dvoch tenkých materiálov sa môže javiť ako problém medzera, ktorá vznikne medzi materiálmi vplyvom ich rôznej tvárnosti pri pôsobení

axiálnej sily a v dôsledku toho, že puzdro vytvorené na vrchnom materiáli odtláča spodný materiál [14].

Medzera je menšia pri použití spájacieho elementu, ktorý pri doťahovaní oba materiály k sebe pritlačí. Pri kombinácii technológie termálneho vŕtania s lepením by práve lepidlo mohlo vyplniť medzeru a zabrániť tak vzniku prípadnej štrbinovej korózie.

Cieľom experimentálnych prác bolo overiť možnosť využitia technológie termálneho vŕtania na spájanie oceľových a hliníkových materiálov vo forme plechov. Zároveň bola otestovaná aj možnosť kombinácie termálneho vŕtania s adhéznym spájaním.

1 POUŽITÉ MATERIÁLY A METÓDY

Na prípravu spojov bola použitá nepovlakovaná hlbokotážná oceľ *DC04* (ďalej: *DC*) valcovaná za studena, pozinkovaná jemnozrnná vysokopevná mikrolegovaná oceľ *TL 1550-220+Z* (ďalej: *TL*) so zvýšenou tvárnosťou za studena a napokon precipitačne vytvrdená zliatina hliníka *EN AW-6082 T6 (AlSi1MgMn)*, ďalej: *Al*. Chemické zloženie materiálov, ich mechanické a fyzikálne vlastnosti a stav povrchu/mikroštruktúry pri dodaní uvádzajú tab. 1 až tab. 3. Spoje boli vytvorené medzi nerovnakými materiálmi, podľa matice uvedenej v tab. 4.

Tab. 1. Chemické zloženie materiálov (hm. %)

<i>DC</i>									
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Fe</i>					
0,040	0,250	0,009	0,008	zvyšok					
<i>TL</i>									
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Al</i>	<i>Nb</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>
0,100	1,000	0,500	0,080	0,030	0,015	0,100	0,150	0,200	zvyšok
<i>Al</i>									
<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	
1,00	0,40	0,06	0,44	0,70	0,02	0,08	0,03	zvyšok	

Tab. 2. Mechanické vlastnosti a stav povrchu/mikroštruktúry

	R_e [MPa]	R_m [MPa]	<i>A</i> [%]	hrúbka [mm]	Stav povrchu/mikroštruktúry
<i>DC</i>	197	327	39	0.8	elektrostaticky olejovaný
<i>TL</i>	292	373	34	0.8	pozinkovaný, Zn vrstva 100 g·m ⁻² , olejovaný
<i>Al</i>	290	340	14	1.0	precipitačne vytvrdený

Tab. 3. Fyzikálne vlastnosti materiálov

	merná hm. [kg·m ⁻³]	T_{lav} [°C]	tepelná vodivosť [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	koef. tep. rozťažnosti ×10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	modul pružnosti [GPa]
<i>DC, TL</i>	7860	~1500	45	10.8 ÷ 12.5	~210
<i>Al</i>	2700	555	180	24	~ 70

Tab. 4. Matica vytváraných spojov

Materiál v hornej pozícii	Materiál v dolnej pozícii
DC	Al
Al	DC
TL	Al
Al	TL

1.1 Nástroj, parametre procesu termálneho vŕtania

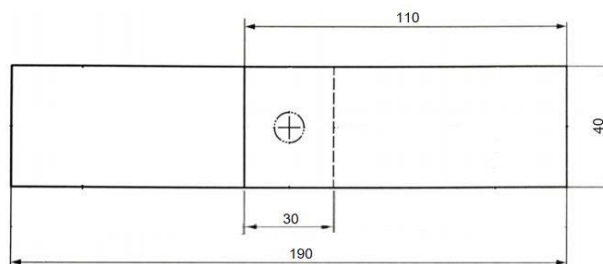
Podľa hrúbky spájaných materiálov a hrúbky spoja bol zvolený nástroj na termálne vŕtanie *Flowdrill Long* bez orezu s priemerom 5,3 mm. Procesné parametre sú uvedené v tab. 5.

Tab. 5. Parametre termálneho vŕtania

Parameter	Hodnota
Rezná rýchlosť	113 m·min ⁻¹
Otáčky	7200 min ⁻¹
Posuv	200 mm·min ⁻¹

1.2 Tvar a rozmery skúšobných vzoriek

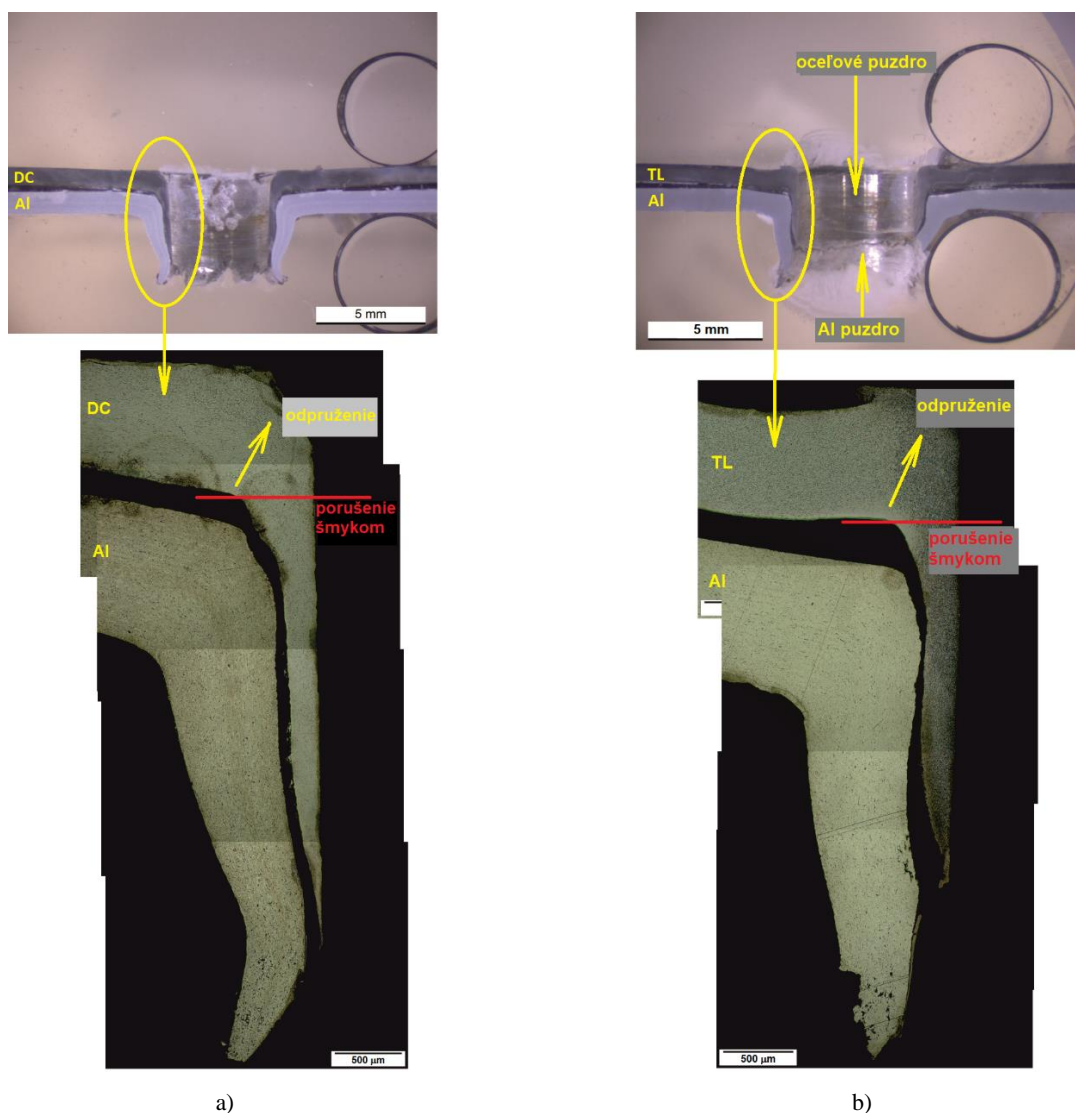
Pri výpočte rozmerov skúšobných vzoriek sme sa riadili normou *STN EN ISO 12996*. Výsledné rozmery skúšobných vzoriek sú znázornené na obr. 2. Otvor je vytvorený vždy v strede preplátovanej plochy.



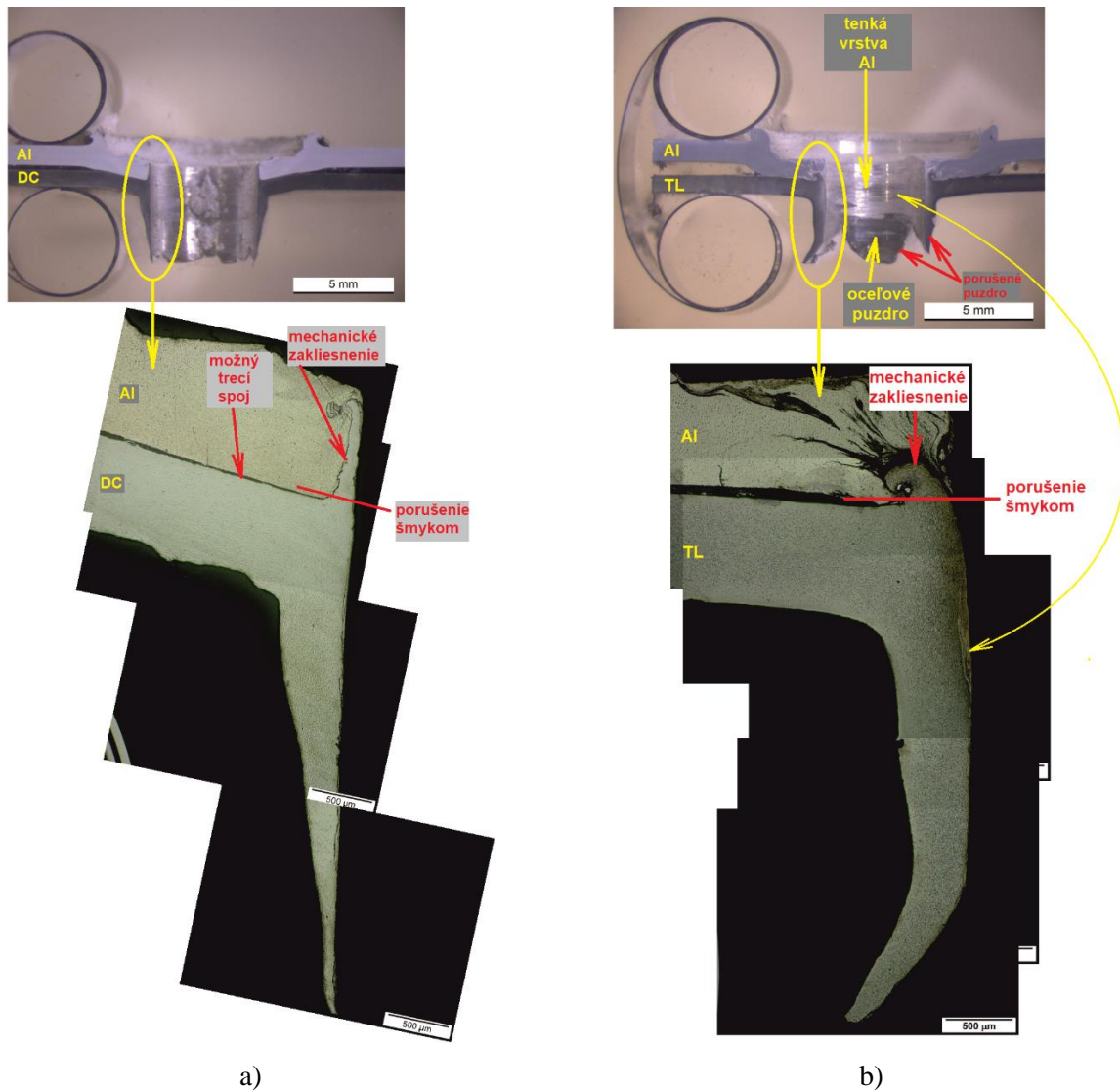
Obr. 2. Tvar a rozmery skúšobných vzoriek

1.3 Lepidlo a proces lepenia

Na lepenie vzoriek bolo použité lepidlo *RB 5197 (Henkel)*, ktoré je na báze gummy a je vhodné aj pre kombináciu s odporovým zváraním. Hrúbka lepidla



Obr. 3. Metalografické rezy spojov a) DC-Al a b) TL-Al, Nital, HF



Obr. 4. Metalografické rezy spojov a) Al-DC a b) Al-TL, Nital, HF

0,2 mm. Postup pri tvorbe kombinovaných spojov: nanosenie lepidla, preplátovanie materiálov, termálne vrtanie, vytvrdenie lepidla pri 175 °C, 25 min v peci. Pevnosť v ťahu samotného adhezíva je 12 MPa, pevnosť v šmyku pri 20 °C je > 15 MPa.

1.4 Testovanie spojov

Vytvorené spoje boli testované na pevnosť v šmyku pri namáhaní na ťah na univerzálnom trhacom stroji TIRA test 2300 pri rýchlosti zaťaženia 10 mm·min⁻¹. Počas zaťaženia bola zaznamenávaná závislosť zaťaženie - posun pričnicka. Zo získaných závislostí sme určili vybrané nasledovné mechanické charakteristiky spojov, odporúčané normou STN EN ISO 12996:

- F_{max} - maximálna sila zaznamenaná pri skúške,
- sF_{max} - posunutie pri ťahovej strihovej sile F_{max} .

2 VÝSLEDKY

2.1 Mikroskopické hodnotenie spojov

Metalografické rezy vytvorených spojov zosnímané pri 50-násobnom zväčšení sú uvedené na obr. 3 a obr. 4.

Obrázok 3 ukazuje metalografiu spojov, kde oceľové materiály sú v hornej pozícii a Al v spodnej pozícii. Pri oboch spojoch je vidieť, že obe vzniknuté puzdrá (oceľové i hliníkové) prešli procesom tvarovania súčasne, o čom svedčí zhodný priečny profil oboch puzdiar. Po odchode nástroja od materiálov prestala pôsobiť vertikálna prítlačná sila od prírubovej časti nástroja a došlo k odpruženiu ocele, čím vznikla medza medzi vnútorným a vonkajším puzdrom medzera. Červená čiara označuje miesto, kde dôjde k porušeniu puzdra šmykom pri následnom zažení.

Na obr.4 je metalografia spojov, kde oceľové materiály sú v spodnej pozícii a Al v hornej pozícii.

Metalografické rezy na obr. 4 odhaľujú details, ktoré neboli pozorovateľné voľným okom. Hliníková zliatina v hornej pozícii bola vytlačená z miesta otvoru do strán. Plastický tok ocele v smere posuvu nástroja vytvoril puzdro. Menší objem materiálu sa premiestnil aj proti smeru posuvu nástroja a vytvoril bariéru medzi hliníkovou zliatinou a nástrojom. Tento malý výstupok by pri vŕtaní jedného materiálu vytvoril golier. Teraz sa však zakliesnil do hliníkovej zliatiny a vytvoril s ňou mechanický spoj. Pri spoji Al-TL je na vnútornej strane oceľového puzdra lokálne vidieť tenkú nesúvislú vrstvu nalisovanej hliníkovej zliatiny. Pri materiáli DC je golier vyšší ako pri oceli TL, čo súvisí s nižšími mechanickými vlastnosťami a vyššou ťažnosťou ocele DC v porovnaní s TL. Z metalografie uvedených spojov vyplýva, že porušenie tohto typu spoja sa bude realizovať šmykom goliera a predpokladá sa malá únosnosť týchto spojov.

2.2 Testovanie spojov

Krivky zaťažovania jednotlivých spojov sú uvedené na obr. 5.

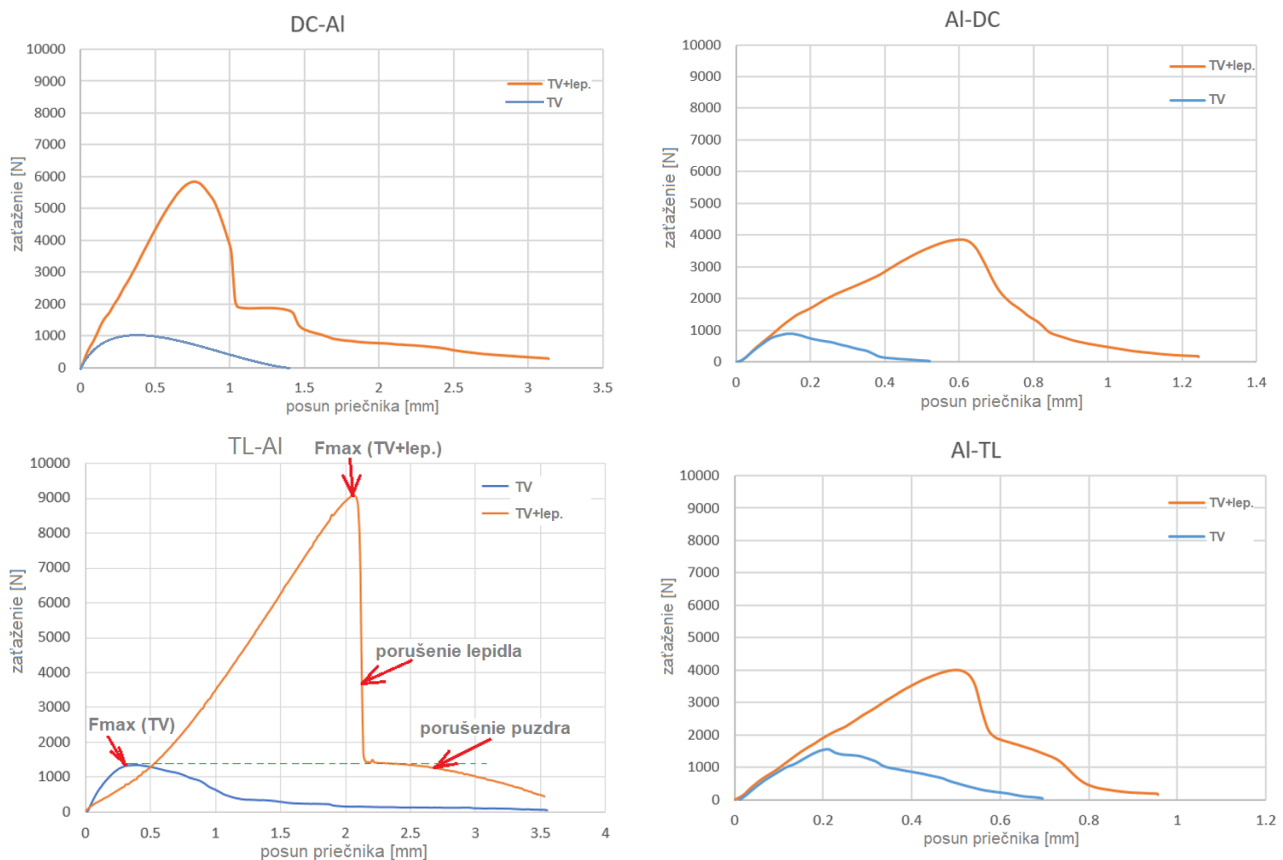
Z kriviek zaťažovania spojov vytvorených len termálnym vŕtaním je zrejmé, že spoje kde bol

vrchným materiálom Al sa porušili vždy do 1 mm pohybu priečnika, kým spoj TL-Al sa porušil pri vyšších hodnotách dráhy priečnika - až do 2.5 mm. To naznačuje vyššiu schopnosť TL-Al spoja absorbovať energiu pri namáhaní. Pri všetkých spojov vytvorených termálnym vŕtaním je zostupná časť krivky postupná, nejde o okamžitý strih, ale postupné ušmyknutie puzdra.

Zaťažujúce krivky spojov s lepidlom ukazujú značné zvýšenie maximálnej sily F_z , teda únosnosti spojov. Na zostupnej časti krivky sú viditeľné dve oblasti: začiatok zostupu z maximálnej sily je prudký, čo zodpovedá porušeniu lepidla, potom nastáva spomalenie zostupu, ktoré zodpovedá postupnému porušeniu puzdra a nastáva približne na úrovni F_{max} príslušného spoja vytvoreného termálnym vŕtaním.

Spoje kombinované s lepením majú niekoľkonásobne vyššiu únosnosť ako FD spoje. Prínos FD k celkovému správaniu spoja spočíva v spomalení zostupnej časti krivky a k zvýšeniu celkovej absorpcie energie spoja porušením puzdra. Z tohto pohľad je preto dôležitou technológiou FD vytvoriť súvislé puzdro s čo najväčšou hrúbkou v mieste šmyku. Plocha pod zaťažujúcou krivkou vyjadruje deformačnú prácu potrebnú na porušenie spoja, resp. absorpčnú schopnosť spoja.

Porovnanie hodnôt deformačnej práce pre skúmané



Obr. 5. Porovnanie kriviek zaťažovania spojov vytvorených termálnym vŕtaním (TV) a spojov kombinovaných s lepením (TV + lep)

kombinácie materiálov a metódy ich spájania sú uvedené v tab. 6.

Tab. 6. Základné charakteristiky spojov F_{max} a S_{Fmax} a deformačná práca W na porušenie spoja

spoj	F_{max} [N]	S_{Fmax} [mm]	W [J]
Termálne vrtanie			
DC-Al	997	0,20	0,32
Al-DC	834	0,15	0,23
TL-Al	1300	0,40	1,61
Al-TL	1569	0,24	0,53
Termálne vrtanie a lepenie			
DC-Al	5857	0,77	5,70
Al-DC	3861	0,60	2,07
TL-Al	9077	2,07	10,31
Al-TL	3993	0,51	1,72

Z hľadiska spotrebovanej energie pri zaťažení je výhodné, keď uvedené charakteristiky dosahujú čo najvyššie hodnoty. Čím sú tieto hodnoty väčšie, tým viac energie spoj absorbuje pred porušením, čo je pozitívne z hľadiska bezpečnosti pri náraze. Napríklad, spoj TL-Al síce nevykázal najvyššiu únosnosť ($F_{max} = 1300$ N), ale absorboval najviac energie pri porušení ($W = 1,61$ J). V kombinácii s lepením došlo k významnému zvýšeniu únosnosti tohto spoja ($F_{max} = 9077$ N) a aj k zvýšeniu absorpcie energie ($W = 10,31$ J).

ZÁVER

Publikovaná experimentálna štúdia potvrdila možnosť využiť technológiu termálneho vrtania na spájanie tenkostenných kovových materiálov. Zo získaných výsledkov sa dajú sformulovať nasledujúce zistenia:

- technológiou termálneho vrtania je možné vytvoriť tvarový spoj, a to samostatne alebo v kombinácii s lepením,
- dôležitú úlohu pri spájaní nerovnakých materiálov majú ich fyzikálne vlastnosti, najmä teplota tavenia a tepelná vodivosť materiálov. Vhodné je poznať aj teplotnú závislosť mechanických vlastností spájaných materiálov,
- vzhľadom na rozhodujúci vplyv fyzikálnych vlastností na správanie materiálov pri lokálnom ohreve hrá pozícia spájaných materiálov významnú úlohu,
- ak sa má vytvoriť tvarový spoj s dvoma koncentrickými puzdrami, do hornej pozície sa odporúča umiestniť materiál s vyššou teplotou tavenia a vyššou tuhosťou. Takto vyrobené

spoje vykazovali aj najvyššiu mechanickú únosnosť,

- každá materiálová kombinácia si vyžaduje hľadanie optimálnych procesných parametrov, alebo detailne prepracované tepelno-deformačné modelovanie procesu,
- kombinácia technológie termálneho vrtania s lepením vedie k utesneniu spoja, k zvýšeniu únosnosti spoja a k zníženiu rizika štrbinovej či galvanickej korózie. Pri namáhaní kombinovaného spoja dochádza najprv k porušeniu lepeného spoja a následne k porušeniu puzdra, čo zvyšuje prácu potrebnú na porušenie spoja.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaM SR a SAV v rámci projektu VEGA 1/0229/23: Výskum využiteľnosti technológie termálneho vrtania na tvorbu multimateriálových spojov v automotive, KEGA 037TUKE-4/2024: Vytvorenie interaktívneho nástroja pre zvýšenie zručností a kompetencií študentov v rámci výučby predmetov zameraných na tvorbu konštrukčnej dokumentácie a APVV-20-0303: Inovatívne prístupy pri obnove funkčných povrchov laserovým naváraním.

LITERATÚRA

- [1] European Aluminium Association (2015): *Hybrid joining techniques*. Available on the internet: <https://www.aec.org/page/extrusion-aluminum-joining-manual>.
- [2] MESSLER, W. S. (1993): *Joining of advanced materials*. USA: Butterworth-Heinemann, 560 p., ISBN 0-7506-9008-9.
- [3] SIRISALEE, P. a kol. (2006): *Multi-criteria material selection of monolithic and multi – materials in engineering design*. In: *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8, No. 1-2, pp. 48-56.
- [4] MORI, K. a kol. (2013): *Joining by plastic deformation*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 2, pp. 673-694.
- [5] MARTINSEN, K. a kol. (2015): *Joining of dissimilar materials*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 2, pp. 679-699.
- [6] KLEINER, M. a kol. (2003): *Manufacturing of lightweight components by metal forming*. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 5, No. 2(2), pp. 521-542.
- [7] GRAF, M. a kol. (2018): *Macroscopic modeling of thin-walled aluminium-steel connections by flow drill screws*. In: *Thin-Walled Structures*, Vol. 130, pp. 286-296.

- [8] KUMAR, R. - HYNES, N. R. J. (2019): *Thermal drilling processing on sheet metals: A review*. In: International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, Vol. 2, pp. 193-205.
- [9] STREPPPEL, A. H. - KALS, H. J. J. (1983): *Flowdrilling: a preliminary analysis of a new bush-making operation*. In: CIRP annals: manufacturing technology, Vol. 32, No. 1, pp. 167-171.
- [10] KUMAR, R. a kol. (2019): *Multi-objective optimization of green technology thermal drilling process using grey-fuzzy logic method*. In: Journal of Cleaner Production, Vol. 236, 117711
- [11] MILLER, S. F. a kol. (2006): *Experimental and numerical analysis of the friction drilling process*. In: J. Manuf. Sci. Eng, Vol. 128, pp. 802-810.
- [12] KANAGARAJU, T. a kol. (2016): *Optimization of drilling parameters for thrust force and torque in friction drilling process*. In: Middle-East J. Sci. Res., Vol. 24, No. 4, pp. 1577-1582.
- [13] SCHMERLER, R. - ROTHE, F. - GRUNERT, M. (2020): *Hybrid joining using the flow drill technology*. Available on the internet: (PDF) Hybridfügen durch Fließlochformen Hybrid joining using the flow drill technology (researchgate.net)
- [14] SKOVRON, J. D. a kol. (2015): *Effect of thermal assistance on the joint quality of Al6063-T5A during flow drill screwdriving*. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 137, No. 5, 051019.