

prof. Ing. Alexander Schrek, PhD. , Strojnícka fakulta STU v Bratislave

## Oponentský posudok dizertačnej práce

Názov práce: **Studium vlivu rychlostních parametrů na tvařitelnost hliníkových slitin**

Autor práce: **Ing. Martin Harant**

Školiace pracovisko: **Fakulta strojíního inženýrství, VUT v Brně**

Doktorský studijný odbor: **Strojírenská technologie**

Študijný program: **Strojírenská technologie**

Školitel: **prof. Ing. Milan Forejt, CSc.**

Dizertačná práca je napísaná na 92 stranách, je rozdelená do ôsmich kapitol, obsahuje 66 obrázkov, 8 tabuliek a zoznam 79 publikácií použitých v citáciách. Predstavuje analýzu vplyvu rôznych rýchlostných parametrov tvárnenia pri dynamickom ťahovom zaťažení na tvárnosť vybranej hliníkovej zliatiny EN AW -2024-T3.

V úvode práce bol realizovaný literárny a teoretický rozbor materiálových vlastností hliníka a jeho zliatin na odlievanie a tvárnenie. Analyzované boli materiálové vlastnosti s dôrazom na spôsoby a metódy ich hodnotenia pri dynamickom tlakovom a ťahovom zaťažení. Taktiež autor v teoretickej časti venoval pozornosť materiálovým modelom.

Experimentálna časť dizertačnej práce je zameraná na hodnotenie vlastností zliatiny EN AW -2024-T3 vo vytvrdenom stave vzoriek vyrobených z plechu s hrúbkou 0,8 mm statickou skúškou v ťahu a ťahovým zaťažením v režime vysokých rýchlostí deformácie na Hopkinsonovom zariadení. Skúšky boli vyhodnocované v režime kvázistatických ( $0,001 \text{ s}^{-1}$ ), stredných ( $1 \text{ s}^{-1}$ ) a vysokých rýchlostí deformácie ( $800 \text{ s}^{-1}$ ) na vzorkách s rôznou orientáciou na smer valcovania ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  a  $90^\circ$ ). Deformácie boli merané prostredníctvom 2D DIC analýzy. Výstupom boli závislosti skutočného napätia a deformácie, Lankfordov koeficient a exponent deformačného spevnenia. Súčasne s napäťovodeformačnou analýzou bola vykonaná aj štruktúrna a fraktografická analýza.

Ďalej autor venoval pozornosť hodnoteniu vlastností zliatiny EN AW -2024-T3 v mäkkom stave po rozpúšťacom žíhaní. Vzorky boli vyrobené z plechu s hrúbkou 1 mm a podrobené statickej skúške v ťahu v režime kvázistatických ( $0,0007 \text{ s}^{-1}$ ) a stredných ( $0,18 \text{ s}^{-1}$ ) rýchlostí deformácie. Testovanie bolo realizované pred tepelným spracovaním vzoriek a v intervale do 15 min po ňom. Podobne ako v prvom prípade deformácie boli zaznamenané prostredníctvom 2D DIC analýzy a vyhodnocované boli závislosti skutočného napätia a deformácie, Lankfordov koeficient a exponent deformačného spevnenia pred a po tepelnom spracovaní. Vplyv plošnej anizotropie hodnotený nebol.

V tretej experimentálnej časti sa autor venuje modifikácii skúšobného zariadenia na realizáciu Hopkinsovho testu pri zaťažení v ťahu SHTB s impaktorom urýchľovaným pneumatickým kanónom využívajúcim prstenec na testovanie vzoriek kruhového a plochého prierezu. Funkčnosť zariadenia bola predbežne numericky simulovaná v softvéri ANSYS s modulom LS-Dyna a overená praktickými experimentami na vzorkách s kruhovým i plochým prierezom so vzájomným porovnaním výsledkov.

Ako oponent zaujmem k práci stanovisko z nasledovných hľadísk:

### 1. Aktuálnosť zvolenej témy.

Tému dizertačnej práce považujem za aktuálnu. Hliníkové zliatiny v tvárnenej i odlievanej podobe majú nezastupiteľné postavenie v priemysle. Akékoľvek nové poznatky

o ich vlastnostiach, nové neštandardné spôsoby ich hodnotenia a získané výsledky rozširujú možnosti ich použitia a zvyšujú bezpečnosť konštrukcií a zariadení z nich vyrobených.

## **2. Splnenie cieľov dizertačnej práce.**

Dizertačná práca Ing. Martina Haranta svojim celkovým obsahom v plnej miere splnila ciele stanovené v prvom bode.

## **3. Postup riešenia, výsledky dizertačnej práce a prínos dizertanta**

Pri realizácii cieľov autor zvolil všeobecne používané postupy a metódy spracovania získaných výsledkov. Vychádza zo súčasného stavu poznatkov v tejto oblasti podloženú zoznamom použitej literatúry obsahujúcej 79 publikácií, článkov a študijných materiálov. Jednotlivé kapitoly riešenia v teoretickej aj praktickej časti na seba logicky nadväzujú. Rozsiahle sú výsledky práce.

V kapitole hodnotenia vlastností zliatiny EN AW -2024-T3 vo vytvrdenom stave autor uvádza, že materiál má negatívnu citlivosť napätovodeformačných vlastností na rýchlosť deformácie a orientáciu skúšobných vzoriek na smer valcovania. Zaznamenaný bol čiastočný pokles  $R_{p0,2}$  pri zmene rýchlosti deformácie nie je však predpokladaný vplyv adiabatického ohrevu. Na základe zistených hodnôt Lankfordovho koeficientu sa materiál výraznejšie deformoval v smere hrúbky vzorky, než v smere šírky, materiál sa vyznačuje veľkou anizotropiou. Zliatina vo vytvrdenom stave nie je vhodná na tvárnenie. Exponent deformačného spevnenia sa zásadne nemenil s rýchlosťou deformácie a orientáciou vzoriek na smer valcovania. Pri štruktúrnej analýze bola hodnotená veľkosť a orientácia zŕn, predĺžené zrná v pozdĺžnej rovine spôsobujú vyššiu pevnosť v smere valcovania. Pri fraktografickej analýze bola pozorovaná bočná strana lomovej plochy vzoriek, ktoré boli pri všetkých rýchlostiach skúšky podobné. EBSD analýzou bola dokumentovaná orientácia zŕn a deformácia vzhľadom na smer pôsobiacej sily. Priamym pozorovaním lomových plôch bol dokumentovaný nízkoenergetický tvárny lom s prítomnosťou intermetalických fáz predstavujúcich koncentrátoory napätia. Nebol pozorovaný vplyv rýchlosti zaťaženia. Na základe výsledkov mechanických skúšok autor definoval Johnsov-Cookov materiálový model bez zohľadnenia vplyvu teploty, keďže skúšky boli realizované pri teplote okolia.

Výsledky hodnotenia napätovodeformačných vlastností zliatiny EN AW -2024-T3 po rozpúšťacom žíhaní autor porovnal so stavom pred tepelným spracovaním. Tepelné spracovanie spôsobilo pokles pevnosti a výraznú citlivosť na rýchlosť deformácie od kritической hodnoty deformácie. Dokumentovaný bol tiež A typ PLC efektu. Zistený bol výrazný pokles  $R_{p0,2}$  (cca 50%), čiastočný hodnôt Lankfordovho koeficientu a nárast exponentu deformačného spevnenia. Keďže k porušeniu všetkých vzoriek pri ťahovom zaťažení došlo v oblasti zmeny prierezu, je možné predpokladať zvýšenú vrubovú citlivosť materiálu spôsobenú aj PLC efektom.

Ďalším výsledkom riešenia je adaptácia Hopkinsonovho tlakového zariadenia na ťahové skúšky vzoriek s kruhovým a plochým prierezom a overenie jeho funkčnosti simuláciami a experimentami. Boli porovnané záznamy elastických deformácií spôsobených šírením napätových pulzov na merných tyčiach s identifikovaním iniciačného, odrazeného, preneseného a parazitného pulzu.

Prínosom dizertanta je získanie množstva výsledkov a realizácia istej metodiky hodnotenia materiálových vlastností. Podstatný je široký okruh pracovísk s ktorými spolupracoval a kde zbieral skúsenosti.

#### 4. Význam pre prax a rozvoj vedného odboru

Dosiahnuté výsledky dávajú praktický obraz o hliníkovej zliatine EN AW-2024-T3 o jej vhodnosti resp. nevhodnosti na tvárnenie v danom stave. Sú podkladom pre ďalšie výpočty potrebné pri návrhu technológie tvárnenia, konštrukciu tvárniaceho nástroja. Zvolená metodika hodnotenia vlastností je použiteľná všeobecne aj pre iné materiály. Navrhnutá modifikácia zariadenia na Ústave strojírenské technologie FSI VUT v Brně umožní jeho použitie na množstvo ďalších experimentov a taktiež v pedagogickom procese napr. v predmete Teorie tváření.

#### 5. Formálna úprava dizertačnej práce a jazyková úroveň

Práca je vypracovaná na veľmi dobrej úrovni bez zásadných pripomienok. Vyzdvihujem grafickú úroveň fraktografickej analýzy. Jazyková úroveň je dobrá, práca je napísaná v slovenskom jazyku.

#### 6. Otázky oponenta

1. Podľa akého kritéria boli zvolené rozmery a spôsob upnutia vzoriek z plechov pri skúškach.
2. Môže adiabatický ohrev pri rozmeroch vzorky a vysokých rýchlostiach deformácie ovplyvniť namerané hodnoty.
3. Prečo boli použité rozdielne metódy merania pri Hopkinsovom teste - trubkový impaktor, resp. impaktor s prstencom. Prečo boli použité rozdielne rozmery merných tyčí pri experimentoch.
4. Pri akom experimente a za akých podmienok došlo k porušeniu vzorky Obr. 57.
5. Tuhosť prstenca Obr. 48, 58 je dostatočná vzhľadom na prierez merných tyčí. Neovplyvní šírenie pulzov pri meraní.
6. Na str. 71 je uvedené, že materiál vo vytvrdenom stave „vykazuje značnú anizotropiu“. Aký je to typ anizotropie.

Pri obhajobe prosím dizertanta zaujať stanovisko k vyššie uvedeným a otázkam.

#### Záver:

**Predložená práca spĺňa podmienky kladené na dizertačné práce.** Prácu odporúčam k obhajobe. Po úspešnej obhajobe a odpovedaní na otázky odporúčam udeliť Ing. Martinovi Harantovi vedecko-akademický titul

**„philosophiae doctor“ – PhD.**

V Bratislave 07.11.2024.

prof. Ing. Alexander Schrek, PhD.