

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie, FS  
Technická univerzita v Liberci  
Studentská 2  
461 17 Liberec 1

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.  
ČVUT v Praze – Fakulta strojní  
Proděkan pro VaV činnost  
Technická 4  
166 07 Praha 6

## Oponentní posudek disertační práce

Název disertační práce: **Možnosti nedestruktivního hodnocení kvality difúzních spojů**  
Autor práce: **Ing. Pavel Nachtnebl**  
**ČVUT v Praze – Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **P2301 – Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **2303V002 – Strojírenská technologie**  
Školitel: **doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.**

Hodnocená disertační práce je zpracována v celkovém rozsahu 153 stran, včetně seznamu použité literatury a publikací autora a seznamu použitých tabulek a obrázků. Práce neobsahuje přílohy. Vlastní textová část je členěná do 8 kapitol a má 141 stran. Disertační práce se opírá o 109 citovaných literárních pramenů, z nichž většina je zahraničních. V souvislosti se zpracováním disertační práce publikoval autor práce s dalšími spoluautory 7 publikací, z nichž jedna je ještě v tisku.

Práce je zaměřena do oblasti posouzení vhodnosti použití rozdílných NDT metod pro difúzně vytvořené svarové spoje. Konkrétně se týká měření elektrické rezistivity a využití ultrazvukové a prozařovací metody u homogenních difúzních svarů z hliníkové slitiny EN AW-5754 (AlMg3). Difúzní svary byly tvořeny za různých procesních parametrů, přičemž NDT metody jsou aplikovány na všechny z nich a výsledky byly následně ověřeny pomocí metalografického rozboru. Na základě provedených analýz byla posouzena vhodnost a využitelnost výše uvedených NDT metod pro posouzení kvality difúzních spojů.

Cíle a hypotézy stanovené v disertační práci odpovídají jejímu názvu. V práci je definován jeden hlavní a tři dílčí cíle práce. Hlavní cíl práce je zvolen logicky vzhledem k zaměření práce. Je však otázkou, jak budu uvádět dále, zda byla optimalizační kritéria u prvního dílčího cíle zvolena vhodně vzhledem k výsledným vlastnostem difúzního spoje.

Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část, nicméně autor práce přidává dílčí teoretické pasáže i do části experimentální.

### Hodnocení disertační práce – připomínky a upozornění

V úvodu práce se autor správně věnuje základní definici difúzního spojování a jeho aplikační využitelnosti a logicky je řazena a zpracována teoretická část, tedy všechny kapitoly 2.X. Formální stránce zde ale nebyla věnována příliš velká pozornost. Mnoho slov je spojeno bez mezery a v seznamu zkratk není zachován stejný systém uvádění jednotek, např.  $(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$  a  $(\text{kJ}/\text{mol})$ , nejsou dodržovány horní indexy (viz Boltzmannova konstanta) a také doporučuji pro různé veličiny použít různé symboly, nebo je v případě stejného symbolu uvádět na různých řádcích. Doporučuji také nedělat samostatné kapitoly ze 4-5 řádkových odstavců a v obrázcích uvádět české popisky. Pozor na terminus technicus viz krystalové a krystalické. V textu uvedené odkazy na rovnice by měly být v závorkách. Veličiny použité v rovnicích (7) až (11) nejsou uvedeny v seznamu zkratk a z textu není zřejmé, jak je z rovnic (7) a (8) získána rovnice (9). Obrázky 10 a 11 jsou



bez jakéhokoliv vysvětlení v textu a u obrázků 12 až 14 není uvedeno, pro jaký typ materiálu jsou průběhy vytvořeny.

Rešerše současného stavu řešené problematiky má velmi vysokou úroveň a dává čtenáři ucelený přehled o stávajícím stavu dané problematiky. Stejně tak i definování a stanovení cílů disertační práce je logické a dostatečně popsáno.

Experimentální část, konkrétně kapitola 4.1., je z velké části kapitolou rešeršní. Při popisu max. přítláčné síly zařízení 1500 kN (str. 51), je uvedena hodnota silně nepravděpodobná.

Je trochu problematické, když se v kapitole 4.2.1. (str. 53) autor odkazuje na tab. 3, kterou ale čtenář najde až na str. 58. Dále je na str. 53 uvedeno, že vzorky byly leptány, ale není zde uveden ani typ leptadla, ani podmínky leptání.

Na (str. 55) se mluví o tom, že při použití Ni fólie se při kratších časech a nižších teplotách vyskytuje více trhlin. Nejedná se ale o trhliny v klasickém slova smyslu, ale pouze o nespojitosti z důvodu dosud neproběhlé difúze.

V úvodu kapitoly 4.2. autor uvádí důvody, proč byly použity pro homogenní spoje slitiny Al. Nikde ale není vysvětleno, proč autor vybral právě slitinu EN AW-5754. V textu je také uvedeno, že byla zvolena Al slitina, protože se tak často nepoužívá (kap. 4.2.) a zároveň je v kapitole 5.1. uvedeno, že byla zvolena slitina EN AW-5754, protože je poměrně často používána. Bylo by vhodné taková tvrzení sladit.

Velmi kladně hodnotím využití tlakové fólie (kap. 5.2.1.) z pohledu rozmístění vzorků v celém prostoru přítláčného zařízení. Pokud se ale realizovalo svařování pouze jednotlivých vzorků, bylo by vhodné udělat test s fólií pouze v těžišti přítláčného prostoru a v tomto místě vzorek také svařovat.

Na straně 82 je uvedeno, že přítláčná síla se pohybovala mezi 8 až 12 kN. To je ale rozdíl 30%. Bylo by vhodné vysvětlit důvody, proč je přítláčná síla tak rozdílná, případně považovat, jak zajistit rovnoměrnost přítláčné síly.

Při měření elektrické rezistivity (tab. 10) by bylo vhodné jako referenci změřit impedanci i u dvou, na sebe položených vzorků s broušenými stykovými plochami. Tím by byly jednoznačně definovány okrajové podmínky.

Na stránkách 96 až 98 je uvedeno, že defekty byly indikovány ve vzdálenostech 5,3 a 6,5 mm od hrany, znamená to, že difúzní rozhraní nebylo uprostřed vzorku vysokého 15 mm?

Na str. 99 jsou uvedeny důvody, proč byl vyřazen z hodnocení referenční vzorek. To by ale mělo být uvedeno již v kapitole 5.3.7.

Kap. 5.3.6. – nedává mi smysl pojem „nejvyšší průměrná pevnost ze 3 tělísek“ uvedený v Tab. 14. Pokud se jedná o nejvyšší dosaženou hodnotu, nemá to zcela vypovídající hodnotu. Pokud se jedná o průměrnou hodnotu, měla by být uvedena směrodatná odchylka. Bylo by také vhodné změřit pevnost i u dodaného základního materiálu, ne se pouze odkázat na materiálový atest.

Obdobě jak již bylo deklarováno výše, na str. 127 jsou uvedeny důvody vyřazení referenčního vzorku z měření. Vzorek byl vyřazen proto, že neprošel stejným teplotně-deformačním cyklem. To ale výrazně snižuje aplikovatelnost této metody. Pak nelze mezi sebou porovnávat touto metodou vzorky s velikostí deformace 1% a 23%. Přitom ale nejlepších výsledků bylo dosaženo právě při velké deformaci.

Na závěr poznámka týkající se optimalizace procesních parametrů. Je vhodné vždy měnit pouze jeden parametr. Zpravidla se pro danou teplotu difúzního spojování testuje vliv přítláčné síly tak, aby došlo k mikroplastické deformaci na rozhraní materiálů, ale zároveň aby se minimalizovala celková deformace vzorku. Na takto odladěných parametrech se následně optimalizuje čas difúze.



## **V průběhu obhajoby prosím autora předložené disertační práce o zodpovězení následujících otázek:**

- 1) Můžete prosím vysvětlit, v čem je základní rozdíl mezi koncentracemi  $C_0$  a  $C_s$ , aby bylo možné stanovit difuzivitu  $D$ ?
- 2) Čím si autor vysvětluje tak výrazné rozdíly v mechanických vlastnostech vzorků (tab. 3), odebraných ze stejného difúzního spoje. Z kterého místa difúzního spoje byly například vzorky 3-1, 3-2, 3-3 a 3-4 odebrány?
- 3) Čím si vysvětlujete odlišné rychlosti ohřevu na teplotu 500°C (str. 81 až 84), při stejně nastavených podmínkách?
- 4) Jakým způsobem byl stanoven čas chemického odstranění oxidů na difúzních plochách? Kontroloval jste, respektive je možné nějakým způsobem zkontrolovat přítomnost oxidů na svarových plochách?

## **Vyjádření k disertační práci**

### **Dosažení stanoveného cíle disertační práce**

Hlavní cíl i dílčí cíle práce tak jak byly v práci definovány, byly splněny. U dílčího cíle věnovaného optimalizaci procesních parametrů bych doporučil provádět postupnou optimalizaci. Ne tak, že jsou měněny všechny 3 základní procesní parametry.

### **Úroveň rozboru současného stavu řešené problematiky**

Rozsah rozboru současného stavu řešené problematiky má velmi vysokou úroveň a dává čtenáři ucelený přehled o stávajícím stavu dané problematiky. Odpovídá tedy a dle mého názoru i převyšuje požadavky kladené na vypracování disertační práce. Vyniká i vysokým počtem použitých a prostudovaných literárních zdrojů. Bylo by vhodné použít takto dobře zpracovaný rozbor k publikacím v časopise s IF.

### **Teoretický přínos práce**

S ohledem na popsanou problematiku a dosažené výsledky vidím u práce spíše praktický než teoretický přínos. Autor řešil problematiku hodnocení difúzních spojů nedestruktivními metodami. Pustil se do nelehkého a neprobádaného úkolu a tím je vyhodnocení kvality spoje pomocí elektrické rezistivity a impedanční charakteristiky. To by mohlo mít velmi významný teoretický přínos při popisu zohledňujícím vliv tepelného a samozřejmě i deformačního ovlivnění materiálu na dané charakteristiky. Byla by to i významná referenční hodnota. Takto se autor pouze omezil na konstatování, že reference použitého plného válce ze slitiny AlMg3 jako „ideálního“ difúzního spoje není využitelná.

### **Praktický přínos práce**

Praktický přínos práce by pro oblast NDT difúzních spojů mohl být značný. Potvrdila se vhodnost použití ultrazvukové kontroly metodou Phased Array pro NDT. Přestože to bylo očekávané, potvrdila se experimentálně také nevhodnost využití prozařovací metody, z důvodu příliš malé citlivosti na předpokládanou velikost vad. Neztracoval bych ani praktické využití měření elektrických veličin, za předpokladu vhodně zvolené referenční základny.

### **Vhodnost použitých metod řešení a způsob jakým byly aplikovány**

Doktorand použil vesměs moderní metody a postupy dostupné v průmyslové praxi pro oblast NDT testování kompaktnosti vytvořených spojů. Důležitá byla především verifikace vlastností pomocí metalografického vyhodnocení i analýza typu nespojitostí v místě difúzního spoje pomocí EDS analýzy. Lepší popis okrajových podmínek by si zasloužilo měření elektrických veličin, ale vzhledem k tomu, že se jednalo o pilotní využití, považuji stanovený postup za dostatečný. Použitím kombinace všech systémů, prokázal autor schopnost samostatné práce i technickou orientaci v dané problematice.



### **Prokázání odpovídajících znalostí v oboru**

Autorem navržené postupy NDT testování svědčí o dostatečných znalostech zejména v daném oboru. Bylo by ale vhodné obezřetněji volit optimalizační kritéria procesních parametrů difúzního svařování. Kde mohl být doktorand aktivnější, je oblast autorských publikací, kde bych, vzhledem k zajímavé oblasti zaměření, doporučil více se zaměřit na význačnější časopisy.

### **Formální úroveň práce**

Z pohledu formální úrovně práce mám pravděpodobně nejvíce výhrad. Text je sice psán srozumitelně, ale s řadou formálních chyb. V mnoha místech textu nejsou mezi slovy mezery, v seznamu zkratk jsou jednotky uváděny v různých formátech, je tam uváděna řada zcela zbytečných zkratk jako ČVUT, H<sub>2</sub>O atd. ale řada důležitých symbolů a veličin obsažených v textu tam chybí. V mnoha místech jsou definovány realizované postupy, ovšem podrobnosti o nich se čtenář dozví až o mnoho stránek, nebo dokonce kapitol dále.

### **Celkové hodnocení**

Přes uvedené výhrady považuji autorem stanovené cíle disertační práce za splněné a konstatuji, že v disertační práci Ing. Pavla Nachtnebla jsem nenašel závažné chyby bránící její obhajobě. Práci doporučuji k obhajobě před zkušební komisí a současně souhlasím s tím, aby po úspěšné obhajobě byla Ing. Pavlu Nachtneblovi udělena vědecko - akademická hodnost

**„Philosophiae Doctor (Ph.D.)“.**

V Liberci dne 10. 4. 2022

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D

