
OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Název: **Možnosti nedestruktivního hodnocení kvality difúzních spojů**
Autor: **Ing. Pavel Nachtnebl, IWE**
Školitel: **doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D. IWE**
Oponent: **prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**

Požadovaná kritéria hodnocení disertační práce:

- a) Dosažení v disertaci stanoveného cíle.
- b) Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky.
- c) Teoretický přínos disertační práce.
- d) Praktický přínos disertační práce.
- e) Vhodnost použitých metod řešení.
- f) Způsob, jak byly použité metody aplikovány.
- g) Zda doktorand prokázal odpovídající znalosti v daném oboru.
- h) Formální úroveň práce.
- i) Doporučení či nedoporučení k obhajobě.

Úvod posuzující aktuálnost zvoleného tématu

Tématika difúzního svařování je pro svoje komplexní vlastnosti (cena přístroje, problematika difúzního procesu s vazbou na celou řadu faktorů, vyhodnocení jakosti vytvořeného spoje apod.) velmi aktuální a zcela jistě patří na vědecké pracoviště. Z tohoto pohledu je téma práce nejen aktuální, ale i disertabilní s hlubokým vědecko-výzkumným potenciálem.

Disertant Ing. P. Nachtnebl se rozhodl, že se bude věnovat tématu, které je v oblasti svarových spojů zcela zásadní. Tím jsou nedestruktivní metody testování svařenců vytvořených touto technologií. Dle EN ISO 4063 se jedná o metodu 45. Nedestruktivní testování má již z podstaty věci celou řadu úskalí a temných míst, ke kterým je nutné přistupovat s vědeckým citem. V obecné rovině je to vhodnost použité metodiky NDT pro identifikaci předpokládané vady, dále je to posouzení, zda vady, které se mohou vyskytovat, ale nejsou identifikovány, mohou mít negativní dopad na požadované vlastnosti. V neposlední řadě je to i pohled z druhé strany, tj. posouzení, zda zjištěná vada má negativní dopad na užité vlastnosti a jak se bude tato vada vyvíjet při další exploataci. Jak z tohoto úvodu vyplývá, autor tématem své práce vstoupil do poměrně široké oblasti nejasností, které nelze v jedné disertační práci vyřešit, ale dává tak základ pro další stupně navazujícího výzkumu. Proto považuji uvedenou motivaci v úvodu jeho disertační práce za zcela rozhodující a pro realizaci vědecko-výzkumných činností jako zásadní.

Předložená disertační práce má 141 stran textu se zahrnutím potřebných snímků, grafů a tabulek. Disertační práce je členěna do 8 kapitol a doplněna seznamem použité literatury a publikační činností autora. V obsahu je uvedena příloha, avšak v práci není žádná zařazena. Následuje teoretická část, v níž jsou uvedeny také konkrétní výsledky autora, ale to především ve vazbě podpoření uváděné citace. Na 46. straně je kapitola 3. Cíle disertační práce. Následuje (od strany 49) experimentální část. Na konci je shrnutí popsanych tří experimentů a diskuse výsledků. Za velmi přínosnou považuji kapitolu uvádějící přínos pro vědu a praxi. Zde autor až skromně uvádí svůj přínos, neboť na tak obtížném poli poznatků a souvislostí dosáhl jak teoretických, praktických, ale i aplikovatelných výsledků. Závěr obsahuje dosažení jednotlivých cílů (hlavní byly 3). Dosažení cílů bude ještě následně, samostatně posouzeno.

Cíle disertační práce byly stanoveny na základě citované kapitoly 2.8 a jejich řešerských výsledků. Autor měl v této kapitole, která má 10 stran a popisuje současný stav problematiky difúzního spojování, konkrétně definovat nedostatky, které je třeba řešit a také, co se od tohoto řešení očekává za přínos a dopad na dosažené poznatky a praktický význam pro další základní nebo aplikovaný výzkum, popř. pro průmyslovou praxi. Z této provazby by lépe vyplynuly stanovené cíle i jejich přínos. Hlavním cílem je návrh nového způsobu nedestruktivní kontroly difúzních spojů pomocí nekonvenční metody zjišťování elektrických vlastností difúzního spoje a pomocí metody phased array (ultrazvukové testování). Metoda phased array se již používá přes 15 let, bohužel zatím nenašla tak široké uplatnění v praxi, ale to je dáno konzervativností prostředí, nikoliv její novostí. Co se týká elektrických vlastností, pak je elektrická konduktance (popř. elektrická rezistivita) ovlivněna nejen vnitřními vadami, ale také vzniklými strukturními fázemi, popř. zpevňovacími (odpovňovacími) procesy. V takto širokém pojetí měla být koncipována kapitola předcházející stanovení cílům disertační práce. Na druhou stranu významným přínosem disertační práce a jejích cílů je vytvoření výzkumného plánu a oslovení zahraničních pracovišť a navázání aktivní spolupráce s Ústavem pro svařování (RWTH) Aachen.

a) Dosažení v disertaci stanoveného cíle

Cíle disertační práce byly jasně stanoveny. Jejich vazba na řešerské studii byla diskutována v předchozím textu. V celé práci se prokázal nedostatek vhodných, především ucelených řešerských poznatků, které by se vztahovaly k dané problematice (difúzní svařování, analýza vlastností). To není chyba autora práce, ale velmi to zhoršuje postup činností, protože dosažené výsledky nelze s dalšími publikovanými poznatky konfrontovat. Vznik prvních poznatků z dané oblasti znamená naplnění stanovených cílů, protože další činnosti (budoucí vědecké i praktické práce) mají vytvořený velmi pevný základ dalšího výzkumu. Jednotlivé cíle, tak jak byly uvedeny, byly dosaženy. Autor práce získal velmi cenné poznatky nejen z hlediska požadovaného stavu povrchu, kdy se prokázalo, že větší vliv než drsnost a způsob jejího snížení má rovinnost a velikost kontaktní plochy. Rovněž byly odzkoušeny tři systémy materiálů (heterogenní spoj s a bez mezivrstvy niklu, homogenní spoj hliníkové slitiny EN AW 5754). Třetím cílem bylo najít vhodnou metodu nedestruktivního testování. Pro absenci věrohodných dat z referenčního vzorku (nebyl stejně exploatován jako spojované vzorky) nebylo možné provést odpovídající srovnání s výsledky elektrické rezistivity a impedančních charakteristik. Za velmi cenné považuji optimalizaci procesu analýz využívající ultrazvukovou metodu phased array. Dosažené výsledky jsou velmi cenné a to i z pohledu vzniku mezinárodní skupiny BONDTEST, která působí od roku 2016 a prozatím nedisponuje ani těmito výchozími poznatky. Cíle v disertační práci byly dosaženy podle zadání.

b) Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky

Jak již bylo uvedeno, situace doktoranda Ing. Pavla Nachtnebla, IWE je z hlediska literárních poznatků i poznatků mezinárodních týmů velmi těžká, protože je nedostatek průkazných informací a z literární rešerše sice vyplynuly dílčí, avšak nikoliv ucelené poznatky, na nichž by bylo možné postavit vlastní experiment. Současný stav poznání je takový, že mnohdy publikované výsledky nemají širší experimentální základ a neposkytují tak hodnověrné poznatky. V této situaci musel doktorand hledat vlastní řešení. Na druhou stranu se mu podařilo shromáždit velmi cenné informace o jednotlivých zahraničních týmech, které se difúzním svařováním zabývají. Velmi cenné jsou i autorovo poznámky k dosaženým výsledkům a polemika, která je následně využita při diskuzi vlastních výsledků a poznatků.

c) Teoretický přínos disertační práce

Práce se opírá o 109 publikačních pramenů, z nichž je pouze velmi malé množství přímo použitelných pro vlastní práci, ale autor z nich musel extrahovat použitelné poznatky. Teoretická část práce mohla mít jinou skladbu, která by více cílila na problematiku vzniku rozhraní, ale také ohřev vzorků v podtlakové peci a rovněž vliv teplotní a silové exploatace na elektrické vlastnosti použitých materiálů. Rovněž mohla být větší pozornost věnována použitým materiálům, a to po stránce tepelných změn i vzniku intermetalických sloučenin. Na druhou stranu některé informace, které se týkají difúzního svařování, jsou příliš rozsáhlé a následně v praktické části nejsou využity. Jak již bylo uvedeno, postavení autora bylo nelehké, protože neexistuje dostatečné množství literárních podkladů, které by napomohly vytvořit uvedenou osnovu a ta se také jinak hodnotí po provedených experimentech, než když vzniká souběžně popř. dokonce před vlastními testy a analýzami. V tomto kontextu hodnotím disertační práci rovněž jako velmi přínosnou, protože položí základ pro další podobné práce. Velmi cenné je také to, že jsou zde také využitelné poznatky pro průmyslovou praxi.

d) Praktický přínos disertační práce

Praktický přínos spočívá ve více rovinách. Prvním přínosem je prohloubení poznatků v oblasti difúzního svařování a popisu jednotlivých důležitých vlivů, a naopak uvedení vlivů, které nejsou podstatné. Další rovinou je popis zahraničních pracovišť a jejich specifikací, které se difúzním svařováním zabývají. Dalším praktickým přínosem je ověření jednotlivých metod nedestruktivního testování a předložení konkrétních výsledků, které lze přenést i na svarové spoje vytvořené jinými technologiemi. Autor měl v závěru disertační práce věnovat větší pozornost kapitole 7.2, která tyto přínosy popisuje. V praktické části jsou uvedeny další přínosy, které zde nebyly shrnuty. Přínosem pro praxi jsou nejen pozitivní poznatky, ale také cesty, které nepřinášejí výsledky, které by byly na základě současného poznání použitelné, např. aplikaci RTG prozařovací metody pro defekty na svarovém rozhraní o rozměrech řádově mikrometrů.

e) Vhodnost použitých metod řešení

f) Způsob, jak byly použité metody aplikovány

Disertační práce obsahuje poměrně značné množství experimentálních vzorků. Jednak jsou to vzorky heterogenních spojů mezi slitinou Ti6Al4V (autor použil značení Ti Gr.5) a korozivzdornou ocelí X5CrNi18-9. Zde byly provedeny dva experimenty. Následovaly

homogenní spoje hliníkové slitiny EN AW5754. Zde byly provedeny tři experimenty, v nichž bylo poměrně velké množství vzorků. Bylo tak získáno velké množství experimentálního materiálu, který bylo nutné podle základních kritérií vyhodnotit a získat informace, s kterými by se mohlo dál pracovat. Konkrétně byly provedeny metalografické výbrusy a posouzena svarová oblast a tyto výsledky byly následně dány do souvislosti s dalšími měřeními elektrických vlastností a nedestruktivními testy. Následně byla u vybraných vzorků provedena analýza mechanických vlastností – zkouška tahem. Výsledků bylo dosaženo poměrně hodně, autor je diskutoval a hledal souvislosti. Pro lepší přehlednost měl více využívat tabulkové a grafické znázornění dosažených výsledků. Z mého profesního pohledu měl také větší pozornost věnovat výsledkům metalografické analýzy a detailněji sledovat, co se odehrává na rozhraní (v místě svaru). Mělo být zařazeno větší množství analýz na řádkovacím elektronovém mikroskopu a více využita možnost EDX analýzy. Ve snímcích a energiově dispersních analýzách se vyskytuje ve vazbě na kyslík i křemík, který není nikde uveden a není hledána souvislost s jeho přítomností (kdyby byl povrch broušen, může se jednat o brusná zrna). Vhodnost dalších použitých metod je obtížné posuzovat, protože se jednalo o prvotní, průkopnické testy, které ukazují výsledky, které poskytují další prostor pro úvahy o smysluplnosti výsledků. Protože se jednalo o první práce, které nebyly dostatečně podloženy v odborných publikacích, bylo nutné vyzkoušet všechny experimentální možnosti.

g) Zda doktorand prokázal odpovídající znalosti v daném oboru

Doktorand měl poměrně obtížnou situaci z hlediska odborných informací, které se týkají jeho práce, řešení a využití analytických metod. V mnoha směrech byl prvním, který realizoval uvedené experimenty a dával jednotlivé výsledky do souvislosti. Doktorand navrhl experimentální plán, který následně korigoval dle dosažených výsledků a získaných poznatků. Svoje přednosti prokázal již v sestavení experimentálního plánu a ve své flexibilní reakci na prvotní dosažené výsledky. Dalším významným prokázáním schopností, které jsou u doktorandského studia důležité, je diskuse výsledků a hledání vzájemných vazeb, které jsou následně přenášeny zpět do upraveného experimentálního programu. Dále jeho přínos spočívá v hledání aplikačního využití, a to nejen zvolené technologie, ale také použitých analýz.

h) Formální úroveň práce

Z mého pohledu jediným nedostatkem disertační práce je její formální úroveň, která zbytečně poklesla častými překlepy. Také některé snímky nejsou dostatečně čitelné (umístěné popisy, legendy, tabulky). Autor měl více využít tabulkové a grafické znázornění výsledků, ale také značení jednotlivých vzorků. Vazba vzorků na použité parametry je uvedena v místech, kde se s nimi dál nepracuje a tam, kde by byl tento popis přínosem, chybí. Rovněž snímky mikrostruktur měly být opatřeny větším popisem, který by přiblížil, co je na snímcích významné. Na druhou stranu celá řada grafů, a to především dokumentující stav procesu difúzního svařování, je velmi dobře provedena a poskytuje přehlednou formou informaci o zvoleném procesu a jeho reálném průběhu.

Doporučení k obhajobě

Posuzovaná disertační práce „*Možnosti nedestruktivního hodnocení kvality difúzních spojů*“ autora Ing. Pavla Nachtnebla IWE splňuje všechny věcné a formální kritéria pro disertační práci. Autor prokázal dostatečné teoretické a praktické znalosti, které mu umožnily získat cenné výsledky a následně je správně analyzovat a vyhodnotit.

Na základě výše uvedeného posudku **doporučuji**, aby byla tato disertační práce předložena k obhajobě před komisí daného doktorského studijního programu. Po úspěšné obhajobě, aby byl panu Ing. Pavlu Nachtneblovi IWE dle zák. č. 111/1998 Sb. § 47 **udělen vědecko-akademický titul *philosophiae doctor (Ph.D.)***.

Otázky k obhajobě:

- 1) Jaké jsou možnosti zvýšení výkonu ohřevu vzorků na teplotu difúzního svařování?
- 2) Jaké intermetalické fáze lze očekávat u aplikovaných heterogenních svarů titanové slitiny a korozivzdorné oceli a homogenních svarů hliníkové slitiny?
- 3) Jaká je závislost elektrické vodivosti na teplotě, deformaci, strukturní změně? Otázka se vztahuje k rozdílným vlastnostem etalonu a svařených válečků z hliníkové slitiny.
- 4) Existuje pracoviště, které by mělo daný svařovací proces zautomatizovaný natolik, aby v komoře proběhlo očištění (např. iontový bombard) a následné difúzní svaření?

V Plzni, 5. května 2022

prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE