

## Oponentní posudek k obhajobě disertační práce

**Jméno:** Ing. Jan Nacházel

**Název disertační práce:** Vliv parametrů tváření rotačním kováním a podmínek umělého stárnutí na mechanické vlastnosti a strukturu vytvrditelné hliníkové slitiny řady 2024

**Fakulta:** Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní

**Studijní program:** P2301 Doktorský studijní program

**Studijní obor:** 3911V016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

**Školitel:** Dr. Ing. Zbyšek Nový

**Oponent:** Ing. Vladivoj Očenášek, CSc

**Zaměstnavatel:** SVÚM a.s.

Oponent měl k dispozici jak výtisk disertační práce, tak její autoreferát. Předkládaná disertační práce se zabývá rotačním kováním vytvrzovatelné slitiny EN AW 2024 a změnám struktury a vlastností, ke kterým dochází v deformované struktuře při tepelném zpracování. Proti běžným technologickým postupům je velká plastická deformace za studena vložena mezi rozpouštěcí žíhání precipitační vytvrzení. V běžné praxi se používá pouze malá plastická deformace do 5%, například při vypínání lisovaných profilů a tyčí. Vliv vložené velké deformace se z provozních a jiných důvodů nepoužívá. Z tohoto pohledu jsou výsledky přínosem pro rozšíření znalostí o vlivu větší plastické deformace na precipitační procesy, které ve slitině 2024 probíhají. Cílem experimentálních prací bylo kombinací rotačního kování a tepelného zpracování získat unikátní mechanické vlastnosti a doložit je strukturními analýzami.

Členění práce je systematické a přehledné. Práce je v podstatě rozdělena do čtyř kapitol, a to teoretické části, části experimentální, výsledkové části a diskuse výsledků. Teoretická část je zpracována podrobně a obsahuje potřebné informace z literárních zdrojů, které se týkají slitiny 2024 z hlediska struktury a zpevňování.

V experimentální části jsou podrobně popsány jak použité metody při přípravě vzorků, tak experimentální metody hodnocení struktury a vlastností. Při analýze struktury byly využity metody elektronové mikroskopie (SEM, TEM), DSC analýzy a texturní analýzy. Autor v průběhu řešení disertační práce provedl řadu experimentů, u kterých bylo nutné zajistit podmínky tak, aby byly dodrženy požadavky na opakovatelnost a porovnatelnost zkoušek a jejich vyhodnocení.

I když jsou výsledky ve výsledkové části diskutovány a porovnávány s literaturou, dávají dosažené výsledky řadu podnětů k širší diskusi. Z tohoto pohledu mohla být diskuse výsledků bohatší.

Práce je zpracována pečlivě a bez věcných chyb, výsledky jsou dokumentovány na výborné úrovni a svědčí o kvalifikovaném zpracování výsledků. Obrazová dokumentace výsledků je na potřebné úrovni. Práce splňuje požadavky na jazykovou úroveň psaného textu.

Rozsah použité literatury a její citace v textu, v teoretické i výsledkové části, svědčí o pečlivém a systematickém přístupu k zadanému tématu. Seznam publikované literatury svědčí

o úspěšném zvládnutí formulace závěrů vyplývajících z výsledků výzkumných prací v průběhu vědecké přípravy. Svědčí rovněž o týmové spolupráci na pracovišti disertanta.

Teoretická část, dosažené výsledky, způsob a úroveň zpracování a jejich interpretace tak svědčí o tom, že autor je schopen samostatné vědecké práce v oboru materiálového inženýrství. Předložená práce představuje materiál, který lze využít jak v publikační činnosti, tak při volbě dalšího směřování výzkumu v oblasti vztahu mezi strukturou a vlastnostmi po deformaci a tepelném zpracování vytvrzovatelných slitin hliníku.

K práci mám následující formální připomínky, poznámky a dotazy do diskuse:

**a) Formální připomínky:**

- s. 12 – zirkon vers. zirkonium;
- s. 13 – Mn se leguje, není to nečistota, mělo by být zmíněno, že k popisovaným změnám Mn dochází hlavně při homogenizačním žhání lité struktury;
- S. 17 – S fáze může být od semikoherentní až po koherentní;
- V textu je určitá nejednotnost v používání termínů jednotlivých typů fází: primární a sekundární fáze, základní složky, intermetalické fáze, disprzoidy.

**b) Věcné připomínky a dotazy do diskuse:**

- 1) Vzhledem k tomu, že výchozím materiálem pro deformační experimenty byla lisovaná tyč, bylo by vhodné blíže popsat změny ve struktuře při homogenizačním žhání, kterému jsou podrobeny lité čepy před lisováním. To by přispělo k používání jednotných termínů při identifikaci fází, a to jak ve výliscích, tak v deformovaných a tepelně zpracovaných vzorcích.
- 2) Použitá deformace rotačním kováním vložená mezi rozpouštěcí žhání a stárnutí se ukázala jako výrazný zdroj zpevnění. Dosažované pevnostní hodnoty jsou mimořádné. Běžnými výrobními technologickými postupy nelze těchto hodnot dosáhnout ( $R_m=650$  MPa). Dosažené výsledky jsou zdrojem řady otázek, které by bylo zajímavé vysvětlit. Velikosti logaritmických deformací 0,1 a 0,3 jsou vzhledem k redukci průřezu v procentuálním vyjádření relativně malé (11, resp. 36%). Při tažení za studena s těmito redukcemi není obvykle protváření průřezu rovnoměrné (gradient deformace). **Lze po tváření pomocí RS nějakým způsobem kvantifikovat homogenitu deformace po průřezu?**
- 3) Výchozí struktura je rekrystalizovaná a hrubozrnná s protaženými zrny. To byl zřejmě důvod, proč nebylo deformací při rotačním kování dosaženo jemnozrnné struktury. Zajímavé by proto bylo tyto pokusy provést s výchozí jemnozrnnou strukturou. To však není jednoduchá technologická záležitost, protože připravit jemnozrnnou rovnoosou rekrystalizovanou strukturu v lisovaných tyčích vyžaduje speciální deformační postup.
- 4) Na Obr. 30 a 40 z TEM a SEM jsou patrné submikronové S-fáze  $Al_2CuMg$ . **Je to otázka do diskuse, zda mohly vzniknout precipitací,** nebo se jedná o nerozpuštěné větší fáze z lité struktury. Viz též diskuse na str. 63.
- 5) Na sekvenci rozpadu tuhého roztoku mají vliv doby mezi ochlazením a deformací a mezi deformací a umělým stárnutím (Obr. 17). V těchto časových prodlevách probíhá vždy přirozené stárnutí, které vytváří ve struktuře „podklad“ pro precipitaci při umělém stárnutí. Při větších rozdílech v délce prodlev může dojít k prokazatelnému ovlivnění konečných mechanických vlastností, protože byla ovlivněna sekvence rozpadu přesyceného tuhého roztoku. **Jaké byly prodlevy mezi rozpouštěcím žháním a rotačním kováním a mezi**

**deformací a umělým stárnutím? Na jaké teplotě byly vzorky udržovány v době prodlevy mezi deformací a umělým stárnutím?** Jedná se zejména o případ víceetapové deformace.

- 6) Zajímavé jsou výsledky, kdy byl sledován vliv rychlosti ochlazování – voda, kapalný dusík. Nejsem přesvědčen, že posun křivek na Obr. 20 je nevýznamný. Jedná se sice o malý ale o systematický posun, **pro který by mělo existovat vysvětlení**. Překvapivé je i to, že podle předpokladu by mohla větší rychlost ochlazování v dusíku zajistit vyšší obsah vytvrzujících prvků v tuhém roztoku a tím zajistit i vyšší mechanické vlastnosti. Proti tomuto očekávání jsou mechanické vlastnosti vzorků ochlazovaných v dusíku nižší, než vzorků ochlazovaných ve vodě.
- 7) V příloze práce jsou uvedeny mapy prvků. **Vyskytovaly se v některých fázích Fe a Si?**

### **Celkové hodnocení**

**Předkládaná práce svědčí o zvládnutí náročných experimentů i interpretace dosažených výsledků. Autor práce prokázal, že má předpoklady pro samostatnou vědeckou práci. Cíle zadané práce byly splněny. Na základě dosažených výsledků doporučuji disertační práci k obhajobě.**



Vladivoj Očenášek  
Odolena Voda 18. 11. 2019

## Oponentní posudek disertační práce

Autor: Ing Jan Nacházel

Název práce: Vliv parametrů tváření rotačním kovááním a podmínek umělého stárnutí na mechanické vlastnosti a strukturu vytvrzitelné hliníkové slitiny řady 2024

Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni

Studijní program: P2301 doktorský

Studijní obor: 3911V016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

Školitel: Dr. Ing. Zbyšek Nový

Oponent: doc. Ing. Karel Šperlink, CSc., FEng.

Zaměstnavatel: AIP ČR, ČSNMT, z.s.

Pro hodnocení byla k dispozici vlastní, výše uvedená, disertační práce a její autoreferát.

Předkládaná disertační práce se zabývá problematikou vlivu parametrů tváření (rotační kováání) a tepelného zpracování vytvrzovatelné slitiny hliníku EN AW 2024 na strukturu a mechanické vlastnosti a jejich změny v závislosti na konkrétních podmínkách zpracování. Práce je výjimečná z hlediska velikosti vložené plastické deformace a celkového rozsahu změny tepelně mechanických parametrů. Ve své podstatě se jedná o termomechanické zpracování jehož cílem bylo získání základních informací o výsledných mechanických vlastnostech souvisejících s konečnou strukturou. Zde je nutné konstatovat, že se jedná o stále aktuální problematiku v daném oboru a v podstatě nový přístup k vloženým deformacím, které jsou oproti klasickému termomechanickému zpracování (TMZ) průřadně lisovaných výlisků výjimečné. Na straně druhé celková šíře měněných parametrů značně přesahuje

rozsah a možnosti disertační práce a ve své podstatě otevírá nový směr výzkumu.

Vlastní práce obsahuje čtyři základní kapitoly. V nejširší teoretické části (kap.2.) uchazeč prokázal dostatečné znalosti čerpané z literárních podkladů, které se vztahují ke slitině 2024 k provedeným experimentům. Experimentální program (kap.3.) je popsán poměrně stručně oproti předchozí teoretické části, rovněž tak i dosažené výsledky (kap.4.) i diskuse (kap.5.)

Jak vlastní práce, tak i autoreferát jsou zpracovány velmi pečlivě, obrazová dokumentace výsledků je kvalitní, stejně tak i jazyková úroveň textových částí. Práce je přehledná a prokazuje dostatečné znalosti autora k samostatné vědecké práci. Dosažené maximální mechanické vlastnosti jsou zcela výjimečně vysoké a lze je považovat za mimořádný přínos práce disertanta, zasluhující publikování. Na druhé straně, jak již bylo výše uvedeno, řešená problematika svým rozsahem značně převyšuje požadavky na disertační práci. Proto je i vlastní diskuse výsledků poněkud omezená a zjednodušená. Z tohoto hlediska bych proto doporučoval v experimentech pokračovat v oblasti dosažených maximálních mechanických vlastností, kdy by bylo nutné prověření především únavových, lomových a korozních vlastností. Tato poznámka ovšem nesnižuje pozitivní hodnocení disertační práce.

K dané práci mám tyto připomínky, které jsou spíše podnětem pro širší diskusi:

- 1) Z hlediska terminologického doporučuji důsledně používat termín vytvrzovatelné slitiny hliníku, což je odlišný termín od vytvrzitelných, který se sice často používá, ale je nesprávný.
- 2) Např. na obr.23 je správně uváděny smluvní mez trvalých deformací 0,2 a nelze používat termín mez kluzu, která se u převážné většiny neželezných kovů a slitin nevyskytuje.
- 3) V teoretické části postrádám zmínku o vlivu nečistot, neboť právě tyto negativně ovlivňují únavové a lomové vlastnosti. Zde ale musím poznamenat, že v minulém století byly ve VÚK Panenské Břežany dosaženy mimořádné výsledky zvyšování výše uvedených vlastností.
- 4) V závěru zmíněný vysoký potenciál v leteckém průmyslu mne poněkud zarmoutil. Vývoj v devadesátých letech minulého století totiž vedl k devastaci leteckého průmyslu, což se dosud nepodařilo napravit. Proto ale považuji dosažené výsledky za mimořádné, po doplnění prací i perspektivní.

- 5) V experimentální i výsledkové části postrádám bližší specifikaci experimentálních vzorků, počet zkušebních těles pro zkoušku tahem (2) je minimem, otázkou je i měření nehomogenity tvrdosti po průřezu. Právě možnou nehomogenitu vlastností vzorků by bylo účelné důkladně prověřit. Toto ale souvisí s již zmíněným konstatováním, že velký rozsah proměnných parametr termomechanického zpracování je v podstatě nad rámec disertační práce, což ale naopak upřesňuje další zaměření experimentů.
- 6) Zařazení ochlazování vzorků po RŽ do vodíku nepovažuji za významné a proto by bylo dobré proč a co přineslo. Chlazení vodou je totiž známé všeobecně jako plně dostatečné.
- 7) V práci postrádám specifikaci parametrů prodlév v rámci TMZ.
- 8) Seznam publikované literatury je relativně obsáhlý, pouze u dvou je ale disertant na prvním místě.
- 9) Zajímalo by mne do jaké míry patří metoda rotačního kování mezi SPD deformační techniky
- 10) Nebylo by efektivní provádět proces deformace za studena kombinací rotačního kování a techniky CONFORM?

Celkové zhodnocení:

Předložená disertační práce se zabývala aktuální a významnou problematikou TMZ hliníkové slitiny 2024. Rozsah prací a dosažení mimořádně vysokých mechanických statických vlastností jsou velice významné. Disertant plně prokázal dostatek znalostí pro samostatnou vědeckou práci. Disertační práci doporučuji k obhajobě.



Karel Šperlink  
Praha 20.11.20109