

Doc. Ing. Branislav Hadzima, PhD.  
Katedra materiálového inžinierstva Strojnickej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina  
Tel.: ++421 41 513 6006 Fax.: ++421 41 565 2940  
e-mail: [branislav.hadzima@fstroj.uniza.sk](mailto:branislav.hadzima@fstroj.uniza.sk)

---



## OPONENTSKÝ POSUDOK DOKTORSKEJ DIZERTAČNEJ PRÁCE

Názov práce: Optimization of properties of Ti based alloys for biomedical and structural applications

Autor: RNDr. Josef Stráský

Školiteľ: doc. RNDr. Miloš Janeček, CSc.

Školiace pracovisko: Katedra fyziky materiálov, Matematicko-fyzikálna fakulta Univerzity Karlovy v Praze

Študijný program Fyzika kondenzovaných látok a materiálový výskum

Študijný odbor: Fyzika

Predložená dizertačná práca sa venuje problematike zliatin titánu, ktoré nachádzajú svoje využitie v ortopédii. Dizertačná práca má experimentálny charakter a téma bola riešená v spolupráci s partnerom z priemyslu. Výskum prebiehal v dvoch čiastočne odlišných oblastiach. Prvou oblasťou sú povrchové úpravy zliatiny Ti-6Al-4V a ich vplyv na únavovú odolnosť. Druhou oblasťou záujmu bol vývoj metastabilných beta-zliatin titánu so zvýšenou pevnosťou a nízkym modulom pružnosti. Zvlášť druhá riešená problematika je v súčasnej dobe veľmi intenzívne študovaná na úrovni základného aj aplikovaného výskumu. Ide o vysokoaktuálnu tému v študijnom programe najmä z hľadiska tvorby nových materiálov so špecifickými vlastnosťami.

Na štúdium mikroštruktúry a mechanických vlastností bolo použitých mnoho experimentálnych metód používaných na školiacom pracovisku ale tiež v rámci domácej aj medzinárodnej spolupráce. Autor uvádza, a vyplýva to aj z citovaných publikácií, ktorých je autorom, že súbežne s výskumom mechanických vlastností prebiehal aj výskum biokompatibility študovaných materiálov. Riešením dizertačnej práce vzniklo veľké množstvo originálnych výsledkov, ktoré boli už čiastočne publikované v medzinárodných časopisoch. Pokiaľ mi je známe, v rámci školiaceho pracoviska ide o prvú dizertačnú prácu, ktorá je zameraná na zliatiny titánu. V priebehu jej riešenia sa aj vďaka významnému prínosu autora štúdium tejto problematiky na pracovisku významne rozšírilo ako tematicky, tak aj personálne (bakalárske, diplomové práce aj pod vedením RNDr. Stráskeho).

Dizertačná práca predstavuje spis na 104 stranách. Po formálnej stránke práca vyhovuje predpisom, pri jej riešení bolo použitých 171 literárnych prameňov, čo je postačujúce množstvo na predkladaný typ práce. Takmer polovica literárnych prameňov

pochádza z obdobia posledných 10 rokov a viac ako štvrtina z obdobia posledných piatich rokov.

Práca je rozdelená do 6 hlavných kapitol. Je spracovaná v anglickom jazyku na podľa môjho názoru veľmi dobrej jazykovej a štylistickej úrovni, s malým množstvom preklepov. Úprava obrázkov je v celku jednotná až na drobné výnimky (nerovnaké mierky na obrázkoch 5.6 resp. kombinácia čiernobielych a farebných kriviek v ťahových diagramoch), všetky obrázky a grafy sú čitateľné a prehľadné. Z dôvodu použitej úpravy práce sa častokrát vyskytujú obrázky na iných stranách ako je ich textový popis, čo sťažuje orientáciu v práci. V práci je vhodne uvedený zoznam použitých skratiek.

Úvodná kapitola zoznamuje čitateľa s okolnosťami vzniku práce a tiež stručne uvádza študovanú tématiku a hlavné dosiahnuté výsledky.

Druhá kapitola sa najskôr zameriava na úvod do problematiky titánu a jeho zliatin. Autor ďalej uvádza hlavné požiadavky na mechanické vlastnosti pre výrobu ortopedických implantátov a podrobne diskutuje využitie zliatin titánu v ortopédii. Na základe nových vedeckých článkov autor referuje o súčasnom stave vývoja biokompatibilných beta-zliatin titánu. V závere kapitoly autor uvádza možné povrchové úpravy zliatin titánu s dôrazom na metódy využité v experimentálnej časti. Celá kapitola sa zameriava najmä na vývoj zliatin titánu, povrchové úpravy a využitie materiálov v ortopédii. Naopak, nie sú tu vysvetlené niektoré podľa môjho názoru dôležité fyzikálne mechanizmy, ktoré sú ale ďalej uvedené pri diskusii nameraných výsledkov. Zvlášť mechanizmy spevnenia (substitučné, intersticiálne a precipitačné) a ďalšie pozorované fenomény (dvojčatenie, ostrá medza klzu) mohli byť vysvetlené. Na druhej strane, vďaka absencii tohto popisu je práca kratšia a kompaktnejšia, tým pádom pre čitateľa so základmi fyziky kovových materiálov aj lepšie čitateľnejšia. Zároveň sa čitateľ môže zoznámiť s aktuálnym stavom v atraktívnej oblasti zliatin Ti pre ortopédiu, ktoré majú nepopierateľný praktický význam.

V tretej kapitole sú uvedené ciele dizertačnej práce. Je zrejmé, že ciele sa vyvíjali počas riešenia práce, čo súvisí so zavádzaním novej problematiky na školiacom pracovisku. Ciele sú dobre formulované, primerane ambiciózne a pomerne prakticky orientované. Ciele spĺňajú podmienky pre predkladaný typ práce.

V ďalšom texte posudku uvádzam *kurzívou* pripomienky a otázky, ktoré by mohol dizertant diskutovať počas obhajoby.

Experimentálna časť práce začína 4. Kapitolou, kde sú najskôr uvedené podmienky prípravy východiskovej zliatiny, uskutočnené povrchové úpravy a ďalej aj návrh nových zliatin a popis ich výroby. Technológia prípravy študovaných materiálov vyžadovala pomerne širokú spoluprácu niekoľkých pracovísk. *Z textu nevypláva, akú úlohu mal RNDr. Stráský pri príprave materiálov, pri návrhu jednotlivých krokov a prípadne parametrov technologických procesov. Autor by mohol túto nejasnosť vysvetliť bližšie v diskusii.* V rámci kapitoly ďalej nasleduje súpis použitých metód pre charakterizovanie podmienok experimentov. Autor popisuje metódy prehľadovou formou, podrobnejšie sa zaoberá len metodológiou ťahových skúšok a merania mikrotvrdomosti. Použité metódy sú pomerne štandardné, výnimku tvorí využitie akustickej emisie a tiež meranie modulu pružnosti ultrazvukovými metódami. Metódy boli zvolené vhodne za účelom zistenia vybraných vlastností alebo pre podrobnejšie vysvetlenie zaujímavých výsledkov.

K tejto časti práce mám nasledovné otázky a pripomienky:

- Experimentálne metódy sú popísané pomerne stručne. Úplne chýbajú schémy, ktoré by uľahčili orientáciu čitateľovi, ktorý nemusí byť s metódami oboznámený.
- *Pri elektroerozívnom obrábaní je uvedené, že bol využitý vysoký špičkový prúd (29A). Nie je ale jasné, aké prúdy sa používajú bežne a prečo.*
- Veta na strane 30: „Since no  $\alpha$ -phase was observed only along the surface, the forging temperature of bulk material did not fall below  $\beta$ -transus temperature.” Nie je formulované dostatočne jasne. *Autor by mohol vysvetliť vplyv teploty kovania na mikroštruktúru materiálu.*
- Strana 31: surface om samples --> surface of samples
- Popis únavových skúšok neobsahuje označovanie, ktoré je používané neskôr v grafoch S-N kriviek
- *Autor zvolil pre štúdium únavových vlastností metódu ohybu za rotácie. Pri praktickom použití ide skôr o zaťažovanie ťah-tlak. Chcel by som poprosiť autora o vysvetlenie voľby typu skúšky.*

V piatej kapitole práce autor uvádza výsledky experimentov, ktoré zároveň aj diskutuje. Je tu uvedené veľké množstvo získaných experimentálnych výsledkov. Prvá časť sa venuje experimentálnemu štúdiu povrchových úprav s dôrazom na pozorovanie pomocou skenovacej elektrónovej mikroskopie a na skúšky únavovej odolnosti. Pôvodne nízku únavovú odolnosť po elektroerozívnom obrábaní možno opäť zvýšiť leptaním a guličkovaním. Za tento postup bol priznaný patent Českým úradom priemyslového vlastníctví. *Autor by mohl vysvetliť svoj podiel na udelení patentu.*

V druhej časti sú experimentálne charakterizované novo vyvinuté zliatiny Ti-Nb-Zr-Ta s prímiesami železa, kremíka a kyslíka. Dosiahnuté výsledky sú veľmi podrobne diskutované na základe aktuálnych vedeckých prameňov. Na druhej strane boli zliatiny navrhnuté empiricky. Mechanické vlastnosti niektorých zliatin sú výhodné pre využitie v ortopédii. To je možné spoločne s kvalitnými publikáciami a udelením patentu považovať za hlavný výsledok tejto prakticky orientovanej práce.

K tejto kapitole mám nasledujúce otázky a pripomienky:

- str. 45: nie je zobrazená mikroštruktúra povrchových vrstiev po žíhaní pri teplotách 500°C a 800°C (uvádza sa len po žíhaní pri 700°C)
- str. 49: *Autor uvádza, že prúd elektroerozívneho obrábania 29 A, ktorý bol využitý pre väčšinu experimentálnych prác, bol navrhnutý na základe ťahových skúšok (str. 49). Zároveň autor uvádza, že ťahové skúšky nemôžu byť základom pre predpoveď únavových vlastností, ktoré sú rozhodujúce (str. 59). Je teda voľba prúdu 29 A optimálna?*
- str. 51 fatigue perfomance make --> fatigue performance makes
- str. 52 Obidva panely v obrázku 5.16 sú označené písmenom a)
- str. 59 Pozitívny vplyv guličkovania je nespochybniteľný, presný dôvod zvýšenia únavovej odolnosti ale nie je jednoznačne určený

- str. 61 a 62, pri optickej mikroskopii obr. 5.25 a) sa uvádza veľkosť zŕn 50 – 100  $\mu\text{m}$ , zatiaľ čo pri obrázkoch SEM je vedené viac ako >100  $\mu\text{m}$ , aj keď ide o rovnaký materiál
- str. 80, neúplný popis zliatin na obr. 5.48
- str. 81, interstitial --> interstitials
- str. 104, bonding orded --> bonding order
- str. 104, stress induced martensite --> stress induced martensite

V poslednej 6. kapitole dizertačnej práce sú popísané závery a je zdôraznená komplexnosť výskumu ortopedických implantátov. RNDr. Stráský zhŕňa hlavné dosiahnuté výsledky, diskutuje ich praktickú využiteľnosť. Ďalej sa vyjadruje k pokračujúcim činnostiam v skúmanej tématike na školiacom pracovisku a odvážne predpovedá smer ďalšieho vedeckého vývoja v oblasti biokompatibilných zliatin titánu.

K predloženej práci ako celku dávam nasledujúci námiet na všeobecnú diskusiu:

*RNDr. Stráský predpovedá rozšírené využitie ultrajemnozrnných zliatin Ti ako v praxi, tak aj z hľadiska základného výskumu. Problematika ultrajemnozrnných materiálov sa na školiacom pracovisku študuje už dlhšiu dobu. Dizrtant by mohol stručne diskutovať plánovaný výskum ultrajemnozrnných zliatin titánu na školiacom pracovisku.*

Záverom konštatujem, že stanovené ciele dizertačnej práce boli v celom rozsahu splnené. Práca má vynikajúcu odbornú úroveň s uvedením veľkého množstva kvalitných výsledkov a autor práce jednoznačne preukázal schopnosť samostatne viesť komplexný výskum vo vysokoaktuálnej oblasti. Predložená práca spĺňa všetky požiadavky na doktorskú dizertačnú prácu.

Prácu **doporučujem** k obhajobe a po úspešnej obhajobe **odporúčam** RNDr. Josefu Stráskému udeliť akademický titul „*Philosophiae doctor*“.

V Žiline, 05.08.2014

