

## Oponentský posudok

### habilitačnej práce

**Ing. Mariána Mikulu, PhD.**

#### **„Tvrde nanoštruktúrované vrstvy“**

Pre posúdenie som dostal k dispozícii habilitačnú prácu Ing. Mariána Mikulu, PhD., životopis a autoevaluačný spis menovaného, dokumentujúci plnenie kritérií pre habilitačné konania na Univerzite Komenského v Bratislave autorom, hodnotenie jeho vedeckej a pedagogickej činnosti, vrátane zoznamu publikácií a citácií autora, prehľad pedagogickej činnosti autora, ako aj jeho ďalších aktivít dokumentujúcich jeho odbornú spôsobilosť.

Na základe dostupných podkladov konštatujem, že Ing. Mikula je medzinárodne uznávanou vedeckou osobnosťou, čo dokumentuje 18 publikácií evidovaných v databáze Current Contents, a publikovaných ako výsledok systematickej práce v oblasti výskumu a prípravy nanoštruktúrovaných tvrdých vrstiev nanášaných metódami fyzikálnej depozície, na ktoré zaregistroval k dátumu podania habilitačnej práce 103 ohlasov evidovaných v medzinárodných citačných databázach.

Samotná práca obsahuje pomerne rozsiahly (61 strán) sumarizujúci úvod, v ktorom habilitant prehľadne uvádza najdôležitejšie výsledky svojej práce získané počas vedeckého pôsobenia na Katedre experimentálnej fyziky Fakulty matematiky, fyziky a informatiky UK, zamerané na prípravu nanoštruktúrovaných tvrdých povlakov nanášaných metódami magnetronového naprašovania. Prehľad je doplnený 9 vlastnými prácami autora publikovanými v renomovaných recenzovaných zahraničných periodikách, ktoré sú, okrem jednej výnimky, prvoautorské. Úvod je písaný formou vedeckého pojednania, kde autor vlastné výsledky vhodne dopĺňa a kriticky diskutuje na základe poznatkov publikovaných v predmetnej oblasti v zahraničí, pričom nezostáva v rovine fenomenologického popisu zistených skutočností, ale rozvíja problematiku do hĺbky s využitím rozsiahleho teoretického aparátu a pokročilých metód modelovania.

Autor vo svojej prácach prezentuje celý rad unikátnych výsledkov, pričom za najdôležitejšie považujem:

1. Príprava veľmi tvrdých  $TiB_x$  vrstiev, pri ktorých sa zmenou depozičných parametrov podarilo meniť preferenčnú orientáciu kryštalitov, čím sa dosiahli tvrdosti vrstvy presahujúce 50 GPa.
2. Zvýšenie teplotnej stability nitridových vrstiev v systéme Cr-Al-Y-N pomocou legovania Ta, čím sa teplota použitia takýchto vrstiev zvýšila nad 1000 °C.
3. Zvýšenie lomovej húževnatosti krehkých nitridových vrstiev v systéme Ti-Al-N legovaním ťažko tavitelnými kovmi, ako Nb a Ta.
4. Zvýšenie oxidačnej odolnosti nanokompozitných Ti-B-Si a amorfných Si-Cr-N vrstiev.

Získané výsledky majú, okrem nepochybnej vedeckej hodnoty, aj praktické implikácie, najmä v oblasti predĺženia životnosti, zvýšenia teploty použitia a zvýšenia pridanej hodnoty materiálov používaných v strojárskom priemysle pri obrábaní kovov.

#### Pripomienky:

Z formálneho hľadiska môžeme konštatovať že predkladaná práca je pripravená na veľmi vysokej úrovni, je vyvážená, prehľadná a napriek vysokej vedeckej úrovni ľahko čitateľná. Drobné nedostatky sa príležitostne objavujú vo viacerých nie celkom presných formuláciách, prípadne v používaní nepresnej terminológie (napr. „husté“ vrstvy, správne sa používa výraz „hutné“, energia nie je exotermická ani endotermická, str. 11, „miznúco malá hustota náboja“ (?), str. 47, atď) .

K práci mám nasledujúce otázky:

1. Na strane 8 autor schematicky prezentuje mikroštruktúry nanoštruktúrovaných materiálov, pričom uvádza dva prípady: kryštalické zrná nanometrových rozmerov oddelené amorfnými hranicami zrn a nanometrové zrná distribuované v amorfnej matici. V čom spočíva, podľa názoru autora, na štruktúrnej a atomárnej úrovni rozdiel medzi hranicami zrn a amorfnou maticou?
2. Z povahy merania tvrdosti tenkých vrstiev vyplýva, že je potrebné použiť extrémne nízke zaťaženia, aby sa pri meraní eliminoval vplyv substrátu. Tvrdosť materiálu je však veličina, ktorú zásadne ovplyvňuje sila aplikovaná pri meraní, pričom pri nízkych zaťaženiach sú namerané hodnoty významne vyššie (tzv. indentation size effect, ISE). Nakoľko by potom hodnoty namerané vo vrstvách pomocou nanoindentačných meraní pri zaťaženiach na úrovni niekoľkých mN boli porovnateľné s mikrotvrdosťami nameranými na kusových vzorkách s rovnakým zložením a porovnateľnou

mikroštruktúrou pri zaťaženiach na úrovni 1 – 10 N? Nie sú extrémne vysoké hodnoty tvrdosti namerané vo vrstvách v niektorých prípadoch výsledkom ISE?

3. Existuje experimentálny dôkaz, že počas žihania dochádza k odplyňovaniu Ar z vrstiev a k preusporiadaniu atómov v mriežke do energeticky výhodnejších polôh, ako autor uvádza na str. 23?
4. V práci autor vo viacerých prípadoch uvádza, že sa podarilo pripraviť vrstvy so zvýšenou lomovou húževnatosťou, pričom nikde neuvádza metódu, akou sa lomová húževnatosť stanovila. Správne uvádza, že lomovú húževnatosť je možné zvýšiť znížením elastického modulu pri súčasnom zachovaní tvrdosti materiálu, čo u skúmaných materiálov dokumentoval nameranými údajmi, ale priamy dôkaz v práci chýba. Za takýto nemožno, podľa môjho názoru, považovať ani mikroohybový test neporušeného votknutého nosníka. Lomová húževnatosť sa vo väčšine prípadov vyjadruje vo forme hodnoty  $K_{IC}$ , teda kritickej hodnoty intenzity napätia, pri ktorej dochádza, pri namáhaní v ťahu, k šíreniu existujúcej ostrej trhliny v materiáli. To mikroohybový test, vzhľadom na absenciu trhliny, nespĺňa. Poprosím o podrobnejšie vyjadrenie k tejto otázke.

Na záver chcem upozorniť, že uvedené otázky nemajú za cieľ znižovať úroveň práce, ale slúžia skôr ako námet do diskusie.

Na základe predložených materiálov môžem konštatovať, že Ing. Martin Mikula, PhD. je erudovaným vedeckým pracovníkom a medzinárodne uznávaným odborníkom v oblasti prípravy nanoštruktúrovaných tvrdých povlakov. Po zhodnotení jeho vedeckých výstupov a pedagogických aktivít **jednoznačne odporúčam prijať jeho habilitačnú prácu ako podklad k habilitačnému konaniu na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského a po jej úspešnom obhájení udeliť menovanému vedecko-pedagogickú hodnosť „docent“.**

V Trenčíne, 22. 12. 2017

.....  
Prof. Ing. Dušan Galusek, DrSc.