

# Jak nám pomáhají tenké vrstvy

S. Hlavatý, F. Solař

První soukromé jazykové gymnázium, Brandlova 875 Hradec Králové  
Sebastian.h@email.cz

## Abstrakt:

V miniprojektu byly studovány tenké vrstvy, které jsou v dnešní době hojně využívány v každodenním životě. Byla určena tloušťka, tvrdost a Youngův modul vrstev připravených v laboratoři a v průmyslové praxi. Bylo prokázáno, že ochranné multivrstvy mají větší tvrdost než substrát, což potvrdilo oprávněnost jejich aplikace.

## 1 Úvod

Homogenní materiály jsou v dnešní době velice důležité a v některých aplikacích nenahraditelné. Pro některé aplikace je však nutné využívat materiály, které jsou velmi drahé a obtížné na výrobu. Z tohoto důvodu jsou vytvářeny tenké vrstvy na dostupnějším substrátu. V dnešní době jsou používány například v energetice a dopravě, k výrobě náradí a ochraně vysoce namáhaných částí strojů, pro biokompatibilní implantáty do lidského těla, v optickém průmyslu či elektrotechnice [1].

## 2 Materiál a experimentální metody

V projektu jsme se zabývali zkoumáním 5 vzorků (tenké vrstvy na substrátu). Dva vzorky byly laboratorně vytvořeny a dva vzorky byly součástky používané v průmyslu. Poslední byl kontrolní vzorek substrátu (ocel), na který byly vrstvy nanášeny.

Laboratorní vzorky byly tvořeny ocelovým substrátem, na který byly metodou PVD nanášeny tenké vrstvy. U prvního vzorku se jednalo o multivrstvu vytvořenou střídáním vrstev chromu a nitridu chromu a u druhého titanu a nitridu titanu. Vzorky zastupující předměty z praxe byly ocelová destička pokrytá vrstvou mědi za účelem zabránění koroze a bit, jehož základ tvořila ocel a byl pokryt tenkou vrstvou nitridu titanu, aby se zvýšila životnost bitu díky vyšší tvrdosti vrstvy.

Tyto vzorky jsme podrobili zkouškám tvrdosti (jen v laboratoři vytvořené vzorky a vzorek substrátu) a také jsme změřili tloušťku studovaných tenkých vrstev. Tvrdost byla měřena za pomoci nanoindentoru NHT2 (Anton Paar, Graz), kdy přístroj vtlačil diamantový hrot tvaru trojbokého jehlanu do materiálu požadovanou silou. Přístroj během celého testu zaznamenává aplikovanou sílu  $F$  a hloubku vtisku  $h$ . Díky znalostem materiálových vlastností hrotu a jeho přesné geometrie lze ze záznamu síla-hloubka vtisku vypočítat tvrdost  $H$

zkoumaného materiálu a redukovaný Youngův modul pružnosti  $E_r$  (zahrnující elastické vlastnosti jak zkoumaného materiálu, tak použitého hrotu) ze vztahů [2]

$$H = \frac{F_m}{A_p(h_c)}, \quad E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A_p(h_c)}},$$

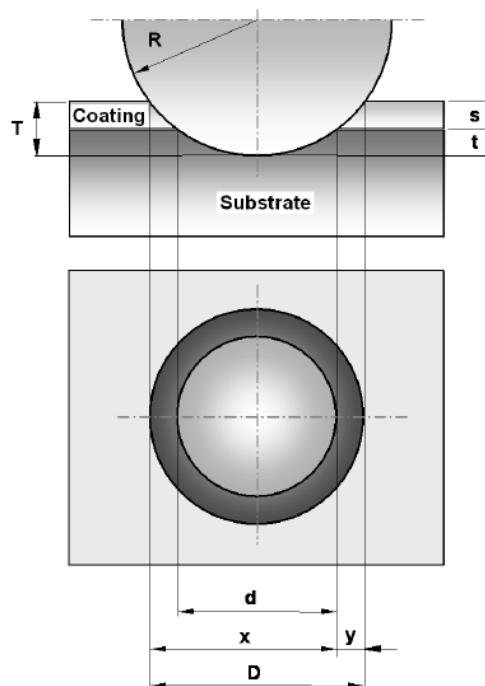
kde  $F_m$  je maximální aplikovaná síla,  $A_p$  je promítnutá kontaktní plocha,  $h_c$  je kontaktní hloubka,  $S$  kontaktní tuhost (směrnice odtěžující části křivky  $F-h$ ) a  $\beta$  je korekční parametr závisející na geometrii hrotu. Samotný Youngův modul vzorku  $E$  lze dopočítat ze vztahu

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i},$$

kde  $E_i$  je Youngův modul hrotu,  $\nu_i$  je Poissonův koeficient hrotu a  $\nu$  je předpokládaný Poissonův koeficient vzorku.

Následně jsme ještě zjistili tloušťku tenkých vrstev pomocí Calotestu. Při této metodě byl točící se kuličkou o poloměru  $R$  vybroušen důlek ve tvaru kulového vrchlíku do zkoumané vrstvy a následně byly pořízeny snímky pomocí metalografického mikroskopu, aby se mohly změřit potřebné parametry pro výpočet tloušťky vrstvy, viz obrázek 1. Tloušťka vrstev  $s$  byla určena ze vztahu [3]

$$s = \frac{xy}{2R}.$$



Obrázek 1: Princip metody calotestu. [3]

### 3 Výsledky

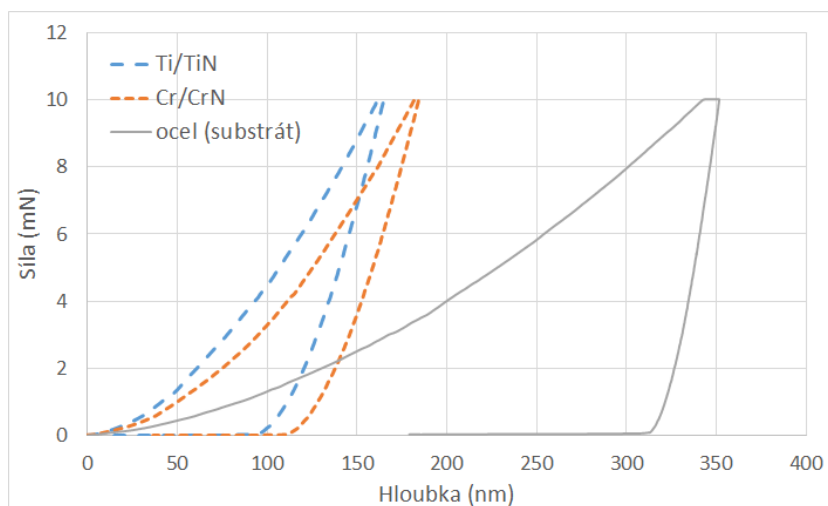
Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 – výsledky měření tvrdosti, Youngova modulu a tloušťky vrstev.

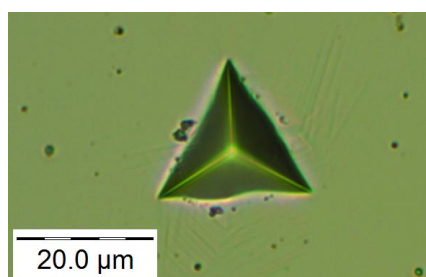
materiál	H (MPa)	E (GPa)	tloušťka vrstvy ( $\mu\text{m}$ )	tloušťka dílčí vrstvy (nitrid) ( $\mu\text{m}$ )
multivrstva Ti/TiN	$19508 \pm 3015$	$319 \pm 39$	$3.8 \pm 0.2$	$0.56 \pm 0.02$
multivrstva Cr/CrN	$15265 \pm 1609$	$261 \pm 14$	$6.0 \pm 0.1$	$0.74 \pm 0.01$
galvanicky nanesená měď	N/A	N/A	$4.2 \pm 0.8$	N/A
nitrid titanu (bit)	N/A	N/A	$2.5 \pm 0.5$	N/A
ocel (substrát)	$3411 \pm 1665$	$215 \pm 10$	N/A	N/A

Lze si povšimnout, že ocel, na které byly nanесeny multivrstvy, měla podstatně nižší tvrdost (přibližně pětkrát) než vrstvy nanесené na ni. Tenké vrstvy mají zároveň vyšší Youngův modul pružnosti. Porovnali jsme pouze laboratorní vzorky z důvodu jejich vysoké kvality a homogenity. U průmyslově vyráběných vrstev lze očekávat větší rozptyl a měření by bylo značně složitější. Průměrné zatěžovací křivky síla-hloubka vtisku jsou na obrázku 2 a ukázka vtisku vytvořeného diamantovým hrotem na obrázku 3.

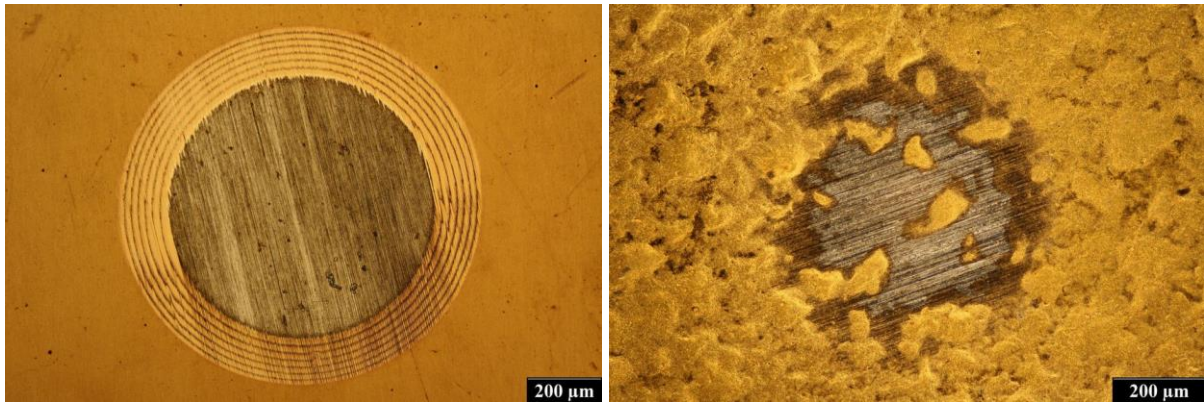
Charakteristické dutiny vybroušené při měření tloušťek vrstev jsou na obrázcích 4 a 5. Tloušťka vrstev se pohybovala od 2 do 6  $\mu\text{m}$ , kdy jednotlivé vrstvy nitridu ve studovaných multivrstvách měly tloušťku přibližně 0,5 až 0,7  $\mu\text{m}$ . Tenčí vrstvu u multivrstev, která byla tvořena buďto titanem nebo chromem, nebylo možné změřit z důvodu nízké rozlišovací schopnosti této metody a případné možné vysoké chyby měření.



Obrázek 2: Zatěžovací křivky síla-hloubka vtisku.



Obrázek 3: Zbytkový vtisk po diamantovém hrotem.



Obrázek 4: Multivrstva titanu a nitridu titanu. Obrázek 5: Nitrid titanu na oceli (bit).

Dokázali jsme, že multivrstvy hrají významnou roli na mechanické vlastnosti předmětu z hlediska tvrdosti a pružnosti, na které byl tento experiment zaměřen. Největší tvrdostí disponovala multivrstva titanu a nitridu titanu. Na základě vzhledu vrstvy a vybroušených dutin můžeme říci, že vzorky připravené v laboratoři disponují vyšší kvalitou a homogennou vrstev než průmyslově vytvořené vrstvy.

## 4 Shrnutí

Úspěšně jsme ověřili využitelnost a praktičnost tenkých vrstev v průmyslu pro zlepšení mechanických vlastností předmětů, především jejich tvrdosti a pružnosti. Nejlepší výsledky, co se tvrdosti týče, měla multivrstva titanu a nitridu titanu. Tenké vrstvy jsou v dnešní době velice důležité a nepochybně se jejich využitelnost bude i nadále zvyšovat. Bylo by zajímavé zkusit více kombinací materiálů, ze kterých jsou tenké vrstvy vytvořeny, a studovat jejich unikátní vlastnosti, jako je například kompatibilita s lidským tělem.

## Poděkování

Chtěli bychom poděkovat našemu vedoucímu Ing. Jaroslavu Čechovi, Ph.D. za odborné vedení při projektu a Katedře materiálů FJFI ČVUT v Praze, za možnost vypracovat tento projekt a za poskytnuté vybavení.

## Reference:

- [1] [http://www.ateam.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf) (19/06/2018).
- [2] W. C. OLIVER – G. M. PHARR.: *Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology*, J. Mater. Res., 2004, pp. 3–20.
- [3] *Calotest – User manual*, CSM Instruments, 2011, 11 p.