
Hodnotenie tribologických vlastností DLC povlakov vybraných tribologických dvojíc

Matúš Čuchor, Ing.*

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: matus.cuchor@fstroj.uniza.sk

Jozef Ondriga, Ing.

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: jozef.ondriga@fstroj.uniza.sk

Tribological evaluation of DLC coatings for specific tribological pairs

Abstract: *DLC* coatings have several characteristics that have industrial applications. Principal advantages include a low coefficient of friction, hardness, abrasion resistance, and corrosion resistance. Coatings are evaluated using a number of test procedures. The ball-on-flat method was used to conduct the tests that are the focus of this paper. The tribological pair consisted of a *DLC*-coated plate and test balls made from three different materials. Experiments provide the friction coefficient curves as well as an optical evaluation of the *DLC* coating's wear. In all three types of examined tribological pairings, the coating was worn, but the *DLC* coating on the plate was not completely removed. After the break-in phase, the coefficient of friction has approximately constant values.

Keywords: coefficient of friction, tribology experiment, *DLC* coating

ÚVOD

Trendom dnešnej doby je prinášať na trh produkty, ktoré majú minimálnu uhlíkovú stopu a zároveň sú ekologické. Kladené sú vysoké požiadavky na udržateľnosť a úsporu energie pri prevádzke takýchto zariadení. Jednou z možností ako zvýšiť úsporu energie je navrhovať strojné zariadenia tak, aby trenie medzi pohyblivými sa súčasťami zariadenia bolo minimálne. K treniu dochádza všade tam, kde sa voči sebe pohybujú dve telesá. Trenie je fenomén, ktorý nie je možné odstrániť, no dá sa regulovať. Úprava povrchu súčastí trecieho uzla umožňuje efektívnu reguláciu trenia. Povrch je možné upravovať viacerými možnosťami. Prax ukázala, že povlakovanie povrchu súčastí trecieho uzla je výhodné. Požadované vlastnosti na povlak sú vysoká tvrdosť, odolnosť voči opotrebeniu, nízky koeficient trenia. *DLC* povlaky sa ukázali ako ideálne riešenie pre mnoho aplikácií, najmä tam, kde sú súčasťami trecieho uzla vystavené extrémnemu treniu, opotrebeniu a vysokému zaťaženiu [1].

DLC povlak (*Diamond Like Carbon*) je nanokompozitný povlak, ktorý disponuje jedinečnými vlastnosťami prírodného diamantu. Uhlík sa vyskytuje v dvoch alotropných formách. Jedna je

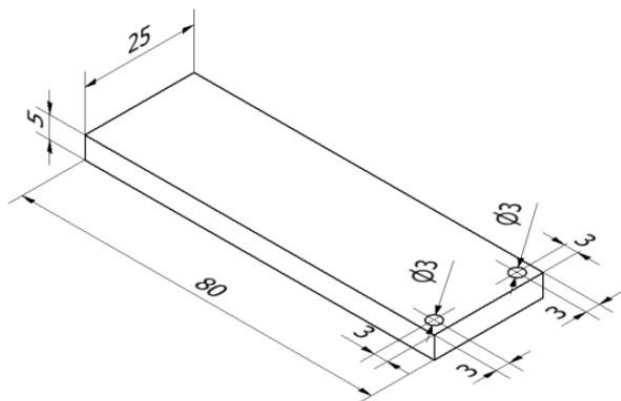
v štruktúre kryštálu diamantu a druhá v štruktúre kryštálu grafitu [2]. Tieto dve formy však vykazujú odlišné užitočné vlastnosti. Kryštálová štruktúra diamantu je najtvrdšou známou látkou a naopak štruktúra kryštálu grafitu je mäkká a klzná. Vlastnosti *DLC* povlaku sú kombináciou týchto vlastností. Vyznačujú sa vysokou tvrdosťou a zároveň nízkym koeficientom trenia v tribologických aplikáciách. Povlakovanie *DLC* je možné za nízkych teplôt (do 200 °C) a je možné ich nanášať na kovy, nekovy, sklo, plasty kremík a mnoho ďalších [3].

Pre experiment bol zvolený povlak *DLC*, ktorý bol nanosený na základnom materiáli 100CrMn6. Ide o ložiskovú ocel, ktorá bola pred povlakovaním zakalená. Vysoká tvrdosť substrátu je žiaduca. V prípade, že by bol substrát výrazne mäkkší ako povlak, mohlo by nastať prepadávanie povlaku do substrátu. Ideálny stav je, keď povlak a substrát majú rovnaké hodnoty tvrdosti. *DLC* povlak bol nanosený na substrát metódou *PVD*, ktorej výhodou takejto metódy depozície je nízka teplota povlakovania, teda nedochádza k tepelnému ovplyvneniu povlakovaného substrátu. Takto pripravené vzorky boli testované na tribometri metódou „*Ball on flat*“, kde sa zisťoval priebeh koeficientu trenia [4].

1 TRIBOLOGICKÝ EXPERIMENT

1.1 Príprava vzoriek

Vzorka má tvar platničky s rozmermi 80x25 mm. Rozmery vzorky sú uvedené na obr. 1. Materiál vzorky je ložisková ocel s označením 100CrMn6. Chemické zloženie je uvedené v tab. 1 podľa normy EN ISO 683-1. Vzorka bola prekalená v celom objeme a povrch dosahuje hodnotu tvrdosti 64 HRC. Pred samotným povlakovaním sa povrch brúsil a následne ručne vyleštil do zrkadlového lesku pomocou diamantovej pasty so zrnitosťou 3µm.



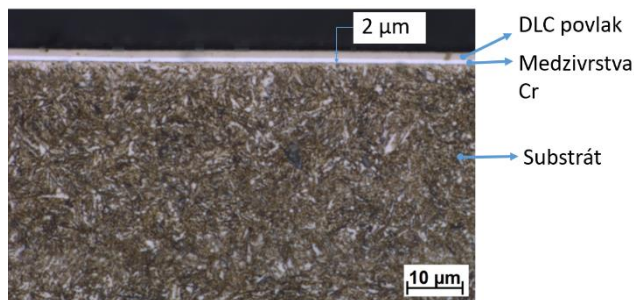
Obr. 1. Rozmery vzorky pre experiment

Tab. 1. Chemické zloženie substrátu v hmotnostných percentách

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.93 ÷ 1.05	0.45 ÷ 0.75	1.0 ÷ 1.2	max. 0.02	max. 0.015	1.4 ÷ 1.65	max. 0.1

1.2 DLC povlak

Nanometrický povlak bol nanesený na maticu technologickou metódou PVD-magnetronovým naprašovaním. Povlakovanie bolo realizované v spolupráci s firmou STATON-Turany. Pripravená nepovlakovaná vzorka sa umiestnila do vákuovej komory povlakovacieho zariadenia. Vákuová komora je evakuovaná na 10^{-4} Pa. Následne sa do komory doplnia zmes inertného plynu Ar a reaktívneho plynu N, čím v tejto atmosfére dochádza v komore k chemickým reakciám, ktorých výsledkom sú chemické zlúčeniny deponované na povrch vzorky. Podmienkou naprašovania je prítomnosť ionizovaného prostredia-plazmy. To sa vytvorí tlecím výbojom, ktorý horí medzi katódou (terčom) a anódou. Napätie medzi nimi je od 200 V do 600 V. V oblasti tzv. katódového spádu sú ióny urýchľované smerom k terču (katóde). V prvom kroku depozície sa deponuje tenká vrstva Cr, ktorá zvyšuje príľnavosť DLC povlaku k substrátu. Vytvorený tenký povlak DLC je nanesený na povrchu vzorky o hrúbke priemerne 2 µm [5,6]. Priečny rez vzorkou je znázornený na obr. 2.



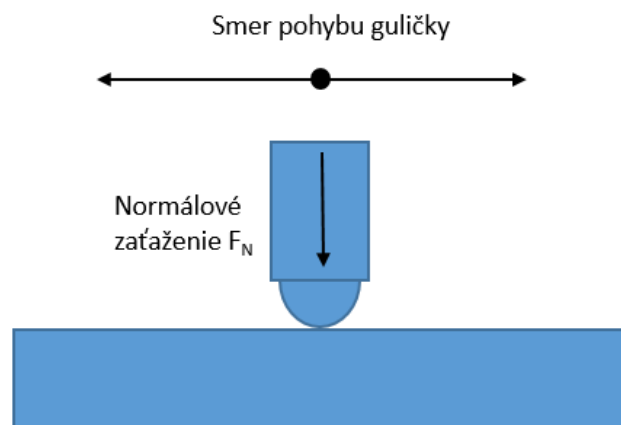
Obr. 2. Priečny rez vzorkou

1.3 Metodika experimentu

Experiment prebiehal v priestoroch tribologického laboratória na Katedre konštruovania a častí strojov na Žilinskej univerzite v Žiline. Hlavným cieľom bolo porovnanie priebehov koeficientov trenia pri použití rôznych tribologických dvojíc. Tribologická sústava bola tvorená dvomi členmi. Testovacia vzorka tvorila prvý člen sústavy a počas merania ostala nemenná. Druhý člen bola testovacia guľôčka s priemerom $d = 4$ mm. Na účely experimentu boli použité tri guľôčky, ktoré sa odlišovali svojím materiálovým zložením:

- guľôčka z ocele 100Cr6,
- guľôčka z SiC,
- guľôčka z DLC na báze WC.

Schéma priebehu merania je na obr. 3. Skúška prebiehala v atmosférických podmienkach bez prítomnosti maziva. Teplota prostredia bola 20 °C. Guľôčka mala recipročný pohyb po povrchu vzorky. Rýchlosť pohybu guľôčky mala sínusový charakter a pohybovala sa v rozsahu hodnôt $v = 0$ mm·s⁻¹ až 20 mm·s⁻¹. Na guľôčku bola vyvíjaná prítlčná sila $F_N = 10$ N. Čas experimentu bol stanovený na 6000 s. Podmienky pri všetkých meraniach boli rovnaké.

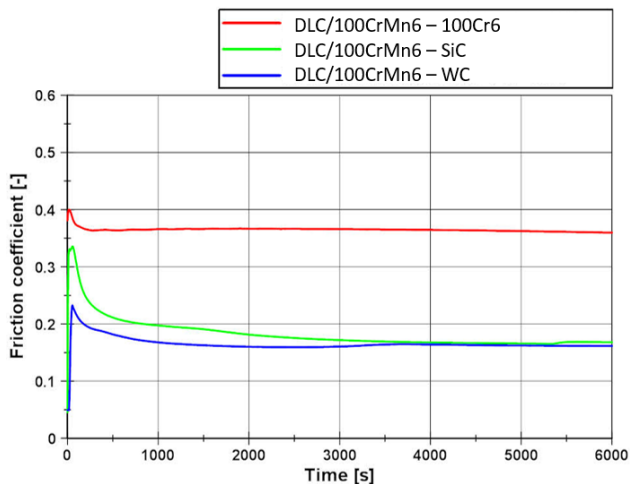


Obr. 3. Schematické znázornenie tribologického experimentu

2 VÝSLEDKY

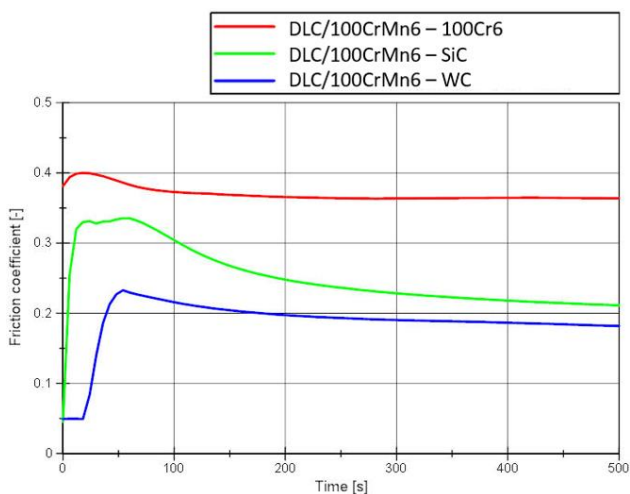
Výstupom meraní je priebeh koeficientu trenia v čase pri troch tribologických dvojiciach, pričom prvý člen

dvojice (povlakovaná vzorka) ostáva rovnaká a mení sa druhý člen (gul'ôčka). Priebehy koeficientov trenia sú uvedené v grafe na obr. 4. Ako bolo uvedené, meranie bolo vykonané pri rovnakých prevádzkových podmienkach.



Obr. 4. Priebeh koeficientov trenia jednotlivých tribologických dvojíc v závislosti od času

Koeficient trenia vo všetkých prípadoch v prvých sekundách experimentu rástol. Detail tohto priebehu je znázornený na obr. 5. Táto fáza sa nazýva zabiehacia fáza. Po čase dosiahol svoje maximum a od tohto maxima mal klesajúcu tendenciu až do momentu, keď sa ustálil na konštantnej hodnote.



Obr. 5. Priebeh koeficientov trenia v prvých 500 s experimentu

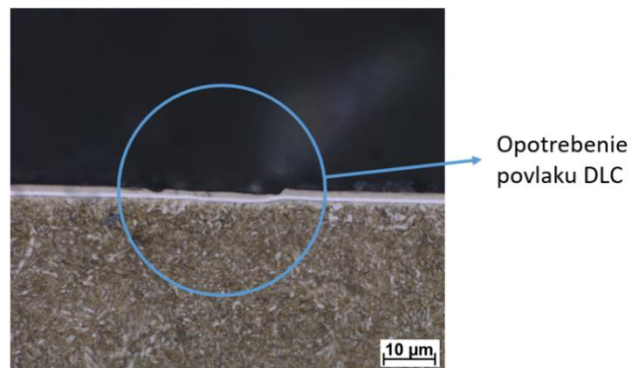
Na vzorke s gul'ôčkou z ocele 100Cr6 mal koeficient trenia na začiatku hodnotu $\mu = 0,38$ (-). V čase $t = 20$ s od začiatku merania dosiahol koeficient trenia svoju maximálnu hodnotu $\mu = 0,4$ (-). Od tohto momentu mal klesajúcu tendenciu až v čase na konci skúšky $t = 6000$ s dosiahol svoje minimum $\mu = 0,37$ (-). Pri meraniach s gul'ôčkou SiC a gul'ôčkou DLC/WC mali koeficienty trenia rovnaké hodnoty $\mu = 0,05$ (-) na začiatku merania. Meranie s gul'ôčkou SiC v čase $t = 50$ s dosiaholo svoju maximálnu hodnotu koeficientu trenia $\mu = 0,34$ (-). Na konci merania v čase $t = 6000$ s mal koeficient trenia svoju minimálnu hodnotu $\mu = 0,16$ (-). Meranie s gul'ôčkou DLC/WC

malo podobný priebeh ako s gul'ôčkou SiC. Rozdiel bol v dosiahnutej maximálnej hodnote koeficientu trenia $\mu = 0,24$ (-). Minimálna hodnota na konci merania bola $\mu = 0,17$ (-).

2.1 Vizuálne vyhodnotenie

Po vykonaní experimentu bol povlak vyhodnocovaný pomocou svetelného mikroskopu od firmy ZEISS. Cieľom bolo pozorovať miesto kontaktu povlaku vzorky s testovacou gul'ôčkou. Pozorovaním bolo možné určiť mieru poškodenia povlaku. Vzorka sa pred samotným pozorovaním musela prispôsobiť tak, aby bolo možné takéto opotrebovanie vyhodnotiť. V mieste s najväčším predpokladaným opotrebením sa vykonal priečný rez. Takto upravená vzorka bola vyčistená od prípadných nečistôt a zároveň zbavená mastnoty. Nasledovalo lisovanie vzorky za tepla do bakelitu. Po brúsení a leštení bola vzorka pripravená na pozorovanie pomocou svetelného metalografického mikroskopu.

Na vzorke po vykonaní experimentu boli tri stopy, viditeľné voľným okom. Opotrebenie povlaku bolo možné pozorovať pod mikroskopom. Vo všetkých troch prípadoch došlo k opotrebeniu povlaku, ale nie jeho úplnému zničeniu. Na obr. 6. je znázornená stopa tribologickej dvojice DLC povlaku a gul'ôčky z materiálu 100Cr6. Nakoľko pri tejto tribologickej dvojici bol nameraný najvyšší koeficient trenia, je možné pozorovať najhlbšiu stopu.



Obr. 6. Opotrebenie povlaku na vzorke v priečnom reze

ZÁVER

Všetky tribologické dvojice majú podobný charakter priebehu koeficientov trenia. V prvých sekundách merania sa koeficient trenia zvýšil. Tento jav sa pozoruje v dôsledku trenia medzi gul'ôčkou a skúšobnou vzorkou. Toto trenie vo svojej dvojakej podobe pozostáva z deformačnej a adhéznej alebo mechanickej a molekulárnej zložky trenia. V prvých sekundách pohybu gul'ôčky po vzorke bola prítomná dominantná deformačná časť. Koeficient trenia narástol na maximum a po tejto fáze sa deformácia postupne eliminovala. Prejavilo sa to poklesom hodnôt koeficientu trenia, až kým sa nestabilizoval na konštantnej hodnote. V tejto fáze boli časti

mikrodrsnosti povlaku vzorky plasticky deformované. Celkové trenie ovplyvňovala len adhezívna zložka trenia, ktorá sa prejavila ako konštantná hodnota koeficientu trenia.

Na základe výsledkov meraní možno konštatovať, že najnižšia hodnota súčiniteľa trenia bola nameraná pre tribologickú dvojicu zloženú z DLC povlaku naneseného na doske a guľôčky z materiálu WC. Pri všetkých troch meraniach došlo k opotrebovaniu povlaku, ale nedošlo k jeho úplnému zničeniu.

Koeficient trenia mal v počiatočnej fáze klesajúci charakter a v hlavnej fáze vykazoval vo všetkých skúmaných prípadoch konštantný priebeh.

LITERATÚRA

- [1] VICEN, M. - BRONCEK, J. - BOKUVKA, O. - NIKOLIC, R. - RADEK, N. (2021): *Tribological behaviour of the susaslide diamond-like carbon coating*. In: Transactions of Famena, Vol., 45, No. 2.
- [2] VICEN, M. - BOKUVKA, O. - TRSKO, L. - DRBUL, M. - NIKOLIC, R. - NOVY, F. (2021): *Influence of Shot Peening on the Wear Behaviour of*

Medium Carbon Steel. In: Production Engineering Archives, 28(3), 241-245.

[3] DRABIK, M. - TRUCHLY, M. - BALLO, V. et al. (2018): *Influence of substrate material and its plasma pretreatment on adhesion and properties of WC/a-C:H nanocomposite coatings deposited at low temperature*. In: Surface and coatings technology, 333, 138-147.

[4] BRONCEK, J. - DZIMKO, M. - HADZIMA, B. (2014): *Experimental investigations of aluminium alloys 2024-T 3 form in terms of tribocorrosion characteristics*. In: Acta Metallurgica Slovaca, Vol. 20, No. 1, pp. 97-104.

[5] DZIMKO, M. - KOVALICEK, M - GAJDOSOVA, E. (2020): *Experimental Verification of Tribological Properties of Thin Coatings for Artificial Human Joints*. In: Current Methods of Construction Design: Proceedings of the ICMD, Springer International Publishing, pp. 473-480.

[6] HOLLECK, H. - SCHIER, V. (1995): *Multilayer PVD coatings for wear protection*. In: Surf. Coat. Technol. 76, 328-336.