
Experimentálna analýza tribologických vlastností povrchov konštrukčných materiálov

Jozef Bronček, doc. Ing., PhD.*

Katedra konštruovania a častí strojov, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: jozef.broncek@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2929

Martin Vicen, Ing. PhD.

Katedra materiálového inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: martin.vicen@fstroj.uniza.sk

Norbert Radek, doc. Ing, PhD.

Kielce University of Technology,
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Kielce 25-314, Poľsko.
E-mail: norrad@tu.kielce.pl

Tomáš Bulko, Bc.

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

Experimental analysis of the tribological properties of the surfaces of structural materials

Abstract: The presented article deals with the tribological properties of the surfaces of structural materials. Comparing the results of experimental measurements of three different surfaces (chrome steel 100CrMnMoSi8-4-6, blackened steel surface, DLC coating) and three different balls (chrome steel 100Cr6, silicon carbide, tungsten carbide) made it possible to observe the influence of the materials of the friction pair on the tribological properties.

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

ÚVOD

K treniu dochádza v miestach, kde sa voči sebe pohybujú a navzájom otierajú dve alebo viaceré súčiastky. Trenie je fenomén, ktorý nie je možné odstrániť, no je možné ho eliminovať.

Väčšina degračných mechanizmov materiálov vzniká a šíri sa z porúch vzniknutých práve na povrchu súčiastok. Pre zvýšenie trvanlivosti a prevádzkovej bezpečnosti súčiastok je preto dôležité vyvíjať alternatívne povrchové vrstvy, resp. nové povlaky povrchových vrstiev súčiastok trecích uzlov [1, 2, 3].

Jednou z možností úpravy povrchu súčastí trecích uzlov je povlakovanie. Od povlaku sú pritom požadované vlastnosti ako vysoká tvrdosť, odolnosť voči opotrebeniu a nízky koeficient trenia.

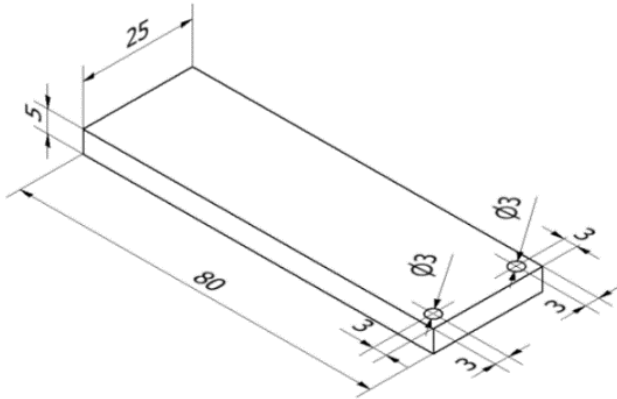
Ideálnym riešením pre mnoho aplikácií sa stali DLC povlaky. Jedná sa o ich použitie v prípadoch, kde sú súčasti trecieho uzla vystavené extrémnemu treniu, opotrebeniu a vysokému zaťaženiu [4, 5].

1 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálna časť príspevku sa zaoberá tribologickými vlastnosťami kalenej ložiskovej ocele 100CrMnMoSi8-4-6 pred a po povlakovaní.

Jednotlivé vzorky sa líšili povrchovou úpravou. Vzorka Sa1 mala nepovlakovaný leštený oceľový povrch, Sa2 bola povlakovaná DLC povlakom a Sa3 mala čierneny povrch. Pre každú vzorku sa ako protikus použili tri rôzne typy guľičiek z rôznych materiálov – chrómovej ocele 100Cr6, karbidu kremíka SiC a karbidu volfrámu WC.

Prehľad kombinácií tribologických dvojíc sa uvádza v tab. 1. Tvar a rozmery skúšobnej vzorky sú zobrazené na obr. 1. Tvrdosť povrchu vzoriek sa pohybovala v rozsahu 58,5 HRC až 60 HRC. Skúšobné telieska mali priemer $\varnothing 4$ mm. Skúška prebiehala v atmosférických podmienkach a bez prítomnosti maziva. Teplota prostredia bola 20 °C.



Obr. 1. Rozmery a tvar skúšobnej vzorky

Tab. 1. Prehľad kombinácií tribologických dvojíc

Vzorka	Substrát	Povlak	Gul'ôčka
Sa1	100CrMnMoSi8-4-6	Bez povlaku	100Cr6
			SiC
			WC
Sa2	100CrMnMoSi8-4-6	DLC povlak	100Cr6
			SiC
			WC
Sa3	100CrMnMoSi8-4-6	Čiernenie	100Cr6
			SiC
			WC

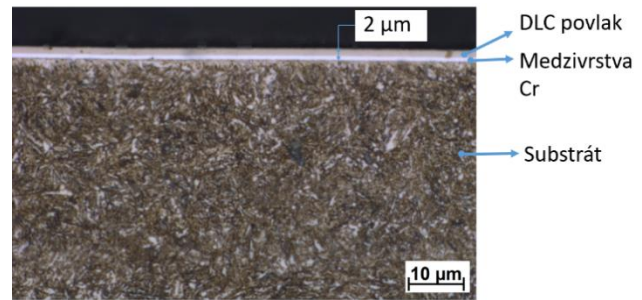
2 MATERIÁL POVLAČOV

Vzorky s označením Sa2 boli povlakované PVD technológiou metódou magnetronového naprašovania v spoločnosti STATON s. r. o. Povlakovanie prebiehalo vo vákuovej komore. Povlakovacia komora má po obvode 6 katód (terčov). V tomto prípade sa použili katódy z materiálu WC. Do katód sa privádzalo napätie zo zdroja. Štartovací tlak v komore bol 10^{-3} Pa. Pracovný tlak v procese povlakovania bol od 0,1 Pa do 1 Pa. Do komory bol privádzaný pracovný odprašovací plyn argón Ar a reaktívny plyn acetylén C_2H_2 . Substrát v držiaku vykonával rotačný pohyb, pričom prechádzal popri katódach a pri každom prechode pred katódu sa na substráte vytvorila jedna vrstva povlaku.

Samotný proces povlakovania trval cca 1 hodinu. Celý výrobný proces trval celkovo 6 hodín. Priečny rez vzorky s povlakom je zobrazený na obr. 2.

Povrch vzoriek s označením Sa3 bol upravený metódou čiernenia. Metódou sa vytvorila na povrchu

materiálu čierna matná alebo tmavomodrá vrstva oxidu železato-železitého $Fe + Fe_2O_4$ (magnetit). Pri používaní v kombinácii s konzervačnými olejmi vrstva má antikoročné vlastnosti.

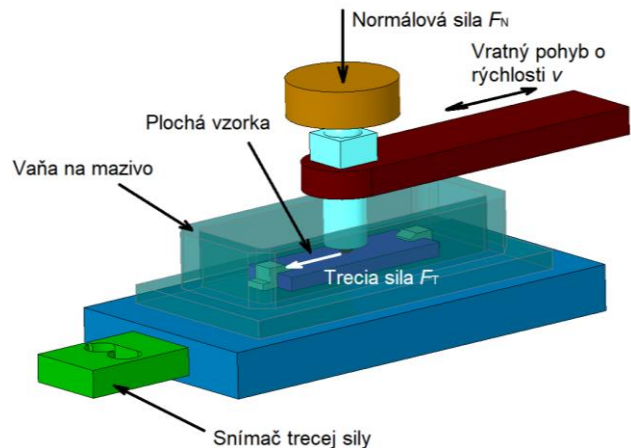


Obr. 2. Priečny rez vzorkou

3 METODIKA EXPERIMENTU

Tribologické skúšky sa vykonali na špeciálnom testovacom lineárnom mikrotribometri (obr. 3). Testovacie zariadenie pracuje na princípe metódy Ball On Disk podľa normy ASTM G133-05 2022.

Gul'ôčka vykonávala recipročný priamočiary pohyb po povrchu vzorky. Priebeh rýchlosti pohybu gul'ôčky mal sínusový charakter. Rýchlosť sa pohybovala v rozsahu hodnôt $v = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Na gul'ôčku pôsobila prítlačná normálová sila $F_N = 10 \text{ N}$. Čas experimentu bol stanovený na 17500 s. Dĺžka dráhy s trecej dvojice bola 350 m. Podmienky skúšky pri všetkých meraniach boli rovnaké.



Obr. 3. Zjednodušené zobrazenie princípu činnosti skúšobného lineárneho mikrotribometra

4 VÝSLEDKY EXPERIENTU

Do vyhodnotenia experimentu boli zahrnuté namerané hodnoty získané pri skúške. Prehľad dosiahnutých hodnôt koeficientov trenia sa uvádzajú v tab. 2.

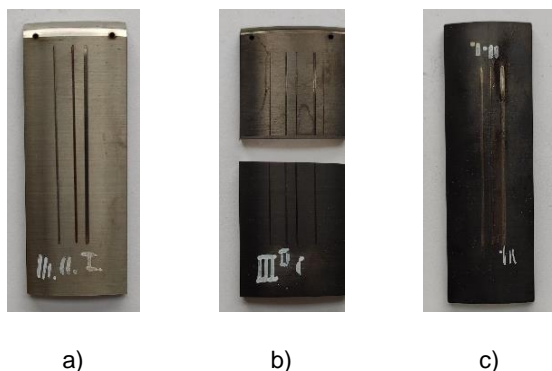
Z hodnôt uvedených v tabuľke možno konštatovať, že najvyššie hodnoty koeficienta trenia sa dosiahli pri vzorke Sa3 s čierneným povrchom.

Na obr. 4 sú zobrazené jednotlivé vzorky po skúške. Na povrchu vzoriek vidieť stopy po skúškach: a) Sa1:

stopa I – guľôčka *Cr*, stopa II – *SiC*, stopa III – *WC*.
 b) *Sa2*: stopa I – *Cr*, stopa II – *SiC*, stopa III – *WC*. c)
Sa3: stopa I – *Cr*, stopa II – *SiC*, stopa III – *WC*.

Tab. 2. Prehľad dosiahnutých hodnôt koeficientov trenia

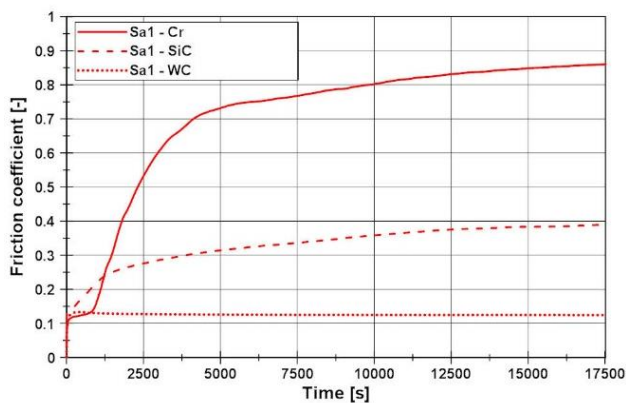
Vzorka	Substrát	Povlak	Guľôčka	Koeficient trenia (-)
<i>Sa1</i>	100CrMn MoSi8-4-6	Bez povlaku	100Cr6	0,86
			<i>SiC</i>	0,39
			<i>WC</i>	0,12
<i>Sa2</i>	100CrMn MoSi8-4-6	DLC povlak	100Cr6	0,36
			<i>SiC</i>	0,23
			<i>WC</i>	0,16
<i>Sa3</i>	100CrMn MoSi8-4- 6	Čiernenie	100Cr6	0,82
			<i>SiC</i>	0,82
			<i>WC</i>	0,34



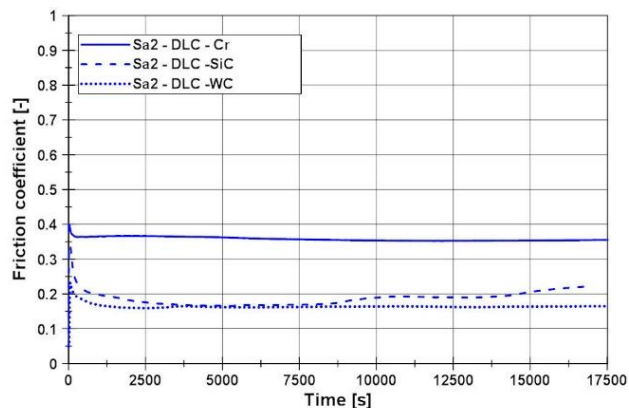
Obr.4 Vizuálne zobrazenie vzoriek po skúške

Priebeh koeficientov trenia pre vzorky *Sa1* bez povlaku, *Sa2* s *DLC* povlakom, a *Sa3* s čiernym povlakom a pre jednotlivé typy guľôčok (*Cr*, *SiC* a *WC*) v závislosti na čase sa uvádzajú v diagramoch na obr. 5 až obr. 7.

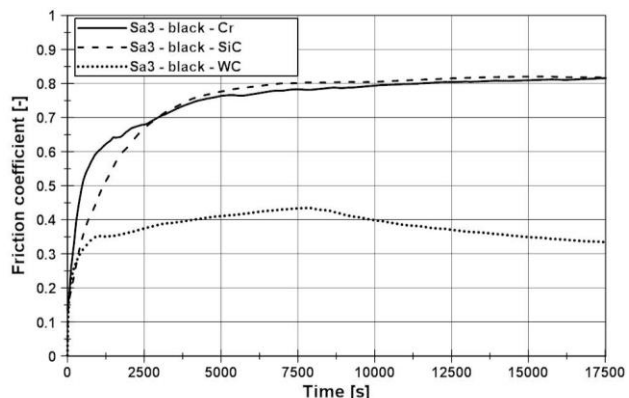
Priebeh koeficientov trenia pre materiál guľôčok *Cr*, *SiC* a *WC* a vzorky bez povlaku *Sa1*, *Sa2* s *DLC* povlakom, a *Sa3* s čiernym povlakom sa uvádzajú v diagramoch na obr. 8 až obr. 10.



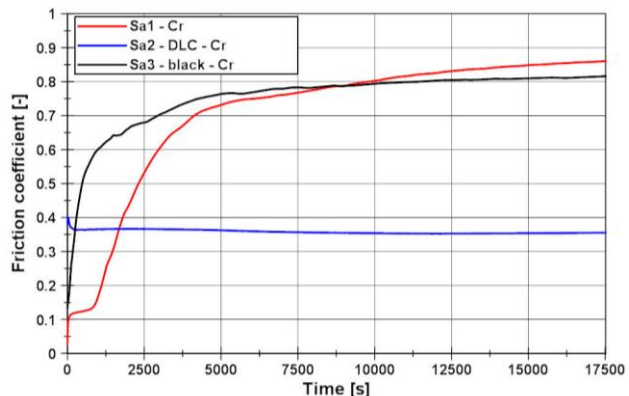
Obr. 5. Priebeh koeficientu trenia na vzorke *Sa1*



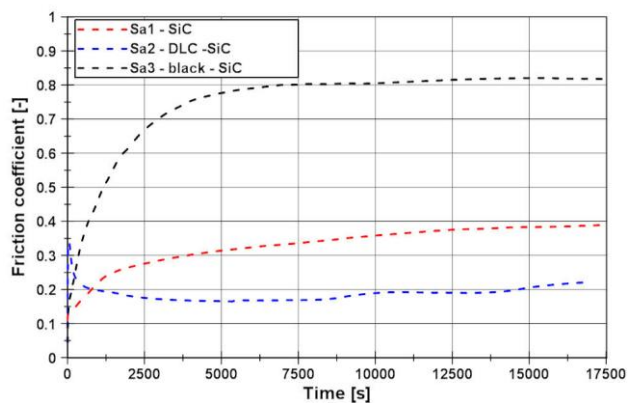
Obr. 6. Priebeh koeficientu trenia na vzorke *Sa2*



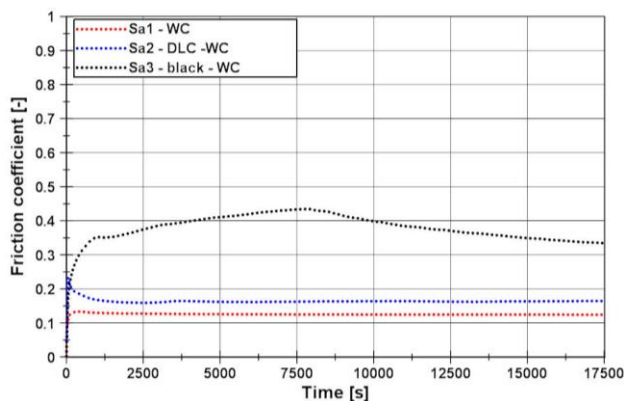
Obr. 7. Priebeh koeficientu trenia na vzorke *Sa3*



Obr. 8. Priebeh koeficientu trenia pre guľôčku *Cr* a hodnotené substráty



Obr. 9. Priebeh koeficientu trenia pre guľôčku *SiC* a hodnotené substráty



Obr. 10. Priebek koeficientu trenia pre guľôčku WC a hodnotené substráty

ZÁVER

Porovnanie výsledkov experimentálnych meraní troch rôznych povrchov (chrómová oceľ 100CrMnMoSi8-4-6, čiernený oceľový povrch, DLC povlak) a troch rôznych guľôčok (chrómová oceľ 100Cr6, karbid kremíka, karbid volfrámu) umožnilo vyhodnotiť vplyv materiálov trecej dvojice na tribologické vlastnosti súčiastok trecieho uzla. Z analýzy priebehov hodnôt súčiniteľa trenia sa zistilo nasledovné:

- materiál s čierneným povrchom vykazoval vysoké hodnoty koeficienta trenia v rozsahu hodnôt 0,34 až 0,82. Pri tejto vzorke bolo taktiež pozorované predratie povlaku,
- hodnoty koeficienta trenia pri použití vzorky z chrómovej ocele 100CrMnMoSi8-4-6 mali najvyššiu variabilitu, v závislosti od materiálu guľôčky 0,12 až 0,86 (-),
- vzorka povlakovaná DLC povlakom vykazovala nízke hodnoty súčiniteľa šmykového trenia 0,16 až 0,36. Pozorované priebehy majú odlišný tvar ako pri ostatných vzorkách. Predratie povlaku na tejto vzorke nebolo pozorované,

Z analýzy priebehov hodnôt súčiniteľa trenia v závislosti na materiáli guľôčky Cr, SiC a WC sa zistilo:

- pri použití guľôčky z chrómovej ocele sa pozorovali konzistentne najvyššie hodnoty súčiniteľa trenia,
- najnižšie hodnoty súčiniteľa trenia sa zistili pri guľôčke z materiálu karbidu volfrámu WC,

- z porovnania trecích dvojíc je zrejmé, že najvhodnejšou tribologickou dvojicou je vzorka s povlakom DLC a guľôčka z materiálu karbidu volfrámu WC.

Pod'akovanie

Tento článok bol vypracovaný v rámci riešenia projektu s názvom Implementácia jazyka geometrickej špecifikácie výrobkov do oblasti súradnicovej 3D metrologie KEGA 033 ŽU-4/2022.

LITERATÚRA

- [1] KOVALÍČEK, M. - BRONČEK, J. - FABIAN, P. - BALLO, V. (2015): *Výskum trecích vlastností povlaku WC/C na ložiskovej oceli*. In: Technológ, 172-175 s., ISSN 1337-8996.
- [2] HAZLINGER, M. - MORAVČÍK, R. (2013): *Chemicko-tepelné spracovanie materiálov*. 1. vydanie, Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave, 171 s., ISBN 978-80-227-3924-5.
- [3] VICEN, M. - FABIAN, P. - BRONČEK, J. - RADEK, N. (2018): *Hodnotenie tribologických vlastností nitrinovanej vrstvy na tepelne spracovanej oceli 100Cr6*. In: Technológ, roč. 10, č. 2, s. 80-85, ISSN 1337-8996.
- [4] 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.
- [5] ČUCHOR, M. - ONDRIGA, J. (2023): *Porovnanie koeficientov trenia povlaku DLC pri vybraných tribologických dvojiciach*. In: Technológ - 02/2023.
- [6] PETRŮ, M. a kol. (2014): *Experimental and numerical analysis of crack propagation in ligh composite materials under dynamic fracturing*. In: Communications, Vol. 16, No. 3a, pp. 82-89.
- [7] NESLUŠAN, M. - BRONČEK, J. - MINÁRIK, P. - ČAPEK, J. - VICEN, M. - DRBUL, M. (2022): *Friction and wear of AlSi 304 by the SiC ball and its monitoring via Barkhausen noise emission*. In: Wear, 0222, 510-511, 204492.
- [8] ASTM G133-05 (2016): *Standard Test Method for Reciprocating Ball-on-flat Sliding*. In: Wear.