

Vplyv technológie tepelného spracovania na tribologické vlastnosti vybraných ocelových materiálov

Jakub Harvanec, Ing.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jakub.harvanec@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 51 513 2771

Miloš Mičian, doc. Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: milos.mician@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 51 513 2768

František Nový, prof. Ing., PhD.

Katedra materiálového inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: frantisek.novy@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 51 513 2607

The influence of heat treatment technology on the tribological properties of steel materials

Abstract: The heat treatment technology changes all sorts of materials properties. We examined the change of tribological properties of selected powder metallurgy materials and conventional steels, in this article. We used special testing equipment, for measuring the changes of friction coefficient of individual tested materials, before application of the heat treatment and after application of the heat treatment. We tested two types of powder metallurgy steels and two types of conventional steels. The changes in friction coefficient are shown in the table and charts. We used boronising, nitriding and surface hardening as procedures of heat treatment.

Keywords: boronising, tribological properties, heat treatment.

ÚVOD

Pomocou postupov tepelného spracovania (TS) sa dosahuje zmena štruktúry materiálu pri pôsobení teploty a výdrže na tejto teplote a tým zmenu vlastností daného materiálu [1]. V experimentoch sa použili postupy povrchového kalenia, nitridovania a boridovania. Nitridovanie a boridovanie patrí k postupom chemicko-tepelného spracovania, pri ktorom dochádza počas spracovania k difúznemu nasýteniu povrchovej vrstvy materiálov dusíkom (nitridovanie) a bórom (boridovanie) [1]. Tie pri reakcií s kovom vytvárajú na povrchu materiálu veľmi tvrdú, oteruvzdornú vrstvu zloženú z nitridov alebo boridov železa.

1 EXPERIMENTÁLNE MATERIÁLY

Zloženie práškových materiálov je uvedené v tab. 1. Z dôvodu, že chemické zloženie práškových materiálov sa určuje a zmiešava presne podľa

potreby, tak výsledný materiál obsahuje minimum nepriaznivých prvkov. V tomto prípade bol najväčší rozdiel medzi materiálmi *PM1* a *PM2* v obsahu *Cu*. Predpoklad pred vykonaním experimentu bol, že zvýšený obsah *Cu* bude priaznivo vplývať na koeficient trenia, ktorého hodnota by mala byť pri materiáli *PM2* nižšia v porovnaní s materiálom *PM1*.

Tab. 1. Chemické zloženie práškových materiálov

Materiál	<i>Cu</i> [%]	<i>C</i> [%]	Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
<i>PM1</i>	1,8	0,75	7,1
<i>PM2</i>	4,0	0,60	7,0

Práškové materiály obsahujú okrem prvkov uvedených v tab. 1 aj 0,9 % maziva a spojiva, ktoré zlepšuje proces lisovania práškových materiálov a zabraňuje lepeniu materiálu na steny lisovacieho nástroja [6]. Konvenčné ocele boli vybrané kvôli

porovnaniu s práškovými materiálmi s tým že budú mať podobné mechanické vlastnosti ako zvolené práškové materiály.

Z prvkov chemického zloženia konvenčných ocelí v tab. 2 a tab. 3 majú najväčší význam prvky *C*, *Cr* a *Mo*, ktoré patria medzi karbidotvorné prvky a zároveň *C* a *Cr* zlepšujú kaliteľnosť ocele. Obmedzením pre aplikovateľnosť boridácie je obsah hliníka (max 0,3 %) a obsah kremíka (max 1%) [4]. Tieto predpoklady boli kľúčové pre zvolené druhy tepelného spracovania. Je zrejmé, že obe ocele majú rovnaký obsah uhlíka, no veľmi rozdielny obsah chrómu. To spôsobilo veľké rozdiely vo výsledkoch *TS*.

Tab. 2. Chemické zloženie ocele 15 142 [3]

Materiál	<i>C</i> [%]	<i>Si</i> [%]	<i>Mn</i> [%]	<i>P</i> [%]	<i>S</i> [%]	<i>Cr</i> [%]	<i>Mo</i> [%]
15 142	0,28 ÷ 0,35	max. 0,4	0,6 ÷ 0,9	max. 0,025	max. 0,035	0,9 ÷ 1,2	0,15 ÷ 0,3

Tab. 3. Chemické zloženie ocele 15 230 [2]

Materiál	<i>C</i> [%]	<i>Si</i> [%]	<i>Mn</i> [%]	<i>P</i> [%]	<i>S</i> [%]	<i>Cr</i> [%]	<i>Mo</i> [%]	<i>Ni</i> [%]
15 230	0,28 ÷ 0,35	max. 0,4	0,4 ÷ 0,7	max. 0,035	max. 0,035	2,8 ÷ 3,3	0,3 ÷ 0,5	max. 0,6

Vďaka nižšiemu obsahu chrómu, pri oceli 15 142, boli dosiahnuté lepšie výsledky po aplikácii nitridácie, naopak, vďaka zvýšenému obsahu chrómu v oceli 15 230, boli dosiahnuté lepšie výsledky po aplikácii boridácie. Tieto skutočnosti boli zistené až po vyhotovení a vyhodnotení jednotlivých skúšok na tepelne spracovaných vzorkách.

2 TEPELNÉ SPRACOVANIE

Pri spracovaní v atmosfére dusíka nitridy železa dosahujú tvrdosť až 1200 HV a tvoria sa pri teplote 470°C ÷ 580°C [1]. V tomto prípade sa použila nitridačná teplota 575°C, s výdržou na teplote 4 hod., v atmosfére $NH_3 + N_2$, s následným pomalým ochladzovaním.

Boridy železa dosahujú tvrdosť viac ako 2200 HV. Teplota boridácie môže byť zvolená v rozmedzí 850°C ÷ 1000°C [4], no pri špeciálnych druhoch boridácie je možné použiť teplotu 700°C (boridácia vo vákuu) a dokonca len 600°C pri boridácii v plazme. V experimente sa zvolila teplota boridácie 850°C s výdržou na teplote 6 hod. Avšak po analýze mikroštruktúry bolo zistené, že výsledná boridačná vrstva sa neprepojila s materiálom ale vytvorila sa len na jeho povrchu. Preto sa boridácia vykonala ešte raz s optimalizovanými podmienkami a to pri teplote 1000 °C s výdržou 6 hodín. Po následnej analýze bolo zistené, že boridácia bola úspešná a tak sa ďalej pokračovalo s analýzou tribologických vlastností, konkrétne k meraniu koeficientu trenia.

Taktiež sa na vzorkách aplikovalo povrchové kalenie, čo je postup tepelného spracovania, pri ktorom sa

pomocou induktora ohreje povrch súčiastky na požadovanú kaliacu teplotu a následne sa rýchlo schladí chladiacim médiom. Výdrž na teplote je veľmi krátka čo zabezpečí že sa zakalí len povrch súčiastky a nie celý objem. Tvrdosť, ktorú bolo možné dosiahnuť pri experimentálnom materiály bola od 700 HV10 do 850 HV10.

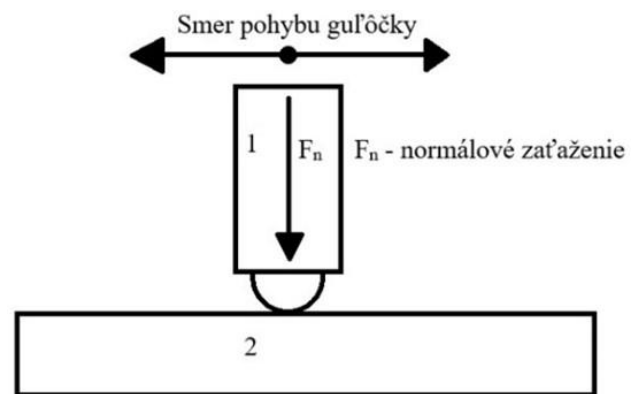
Vzorky boli pri ďalšom experimente značené podľa spôsobu tepelného spracovania a to dodatkovým znakom: *PK* - povrchovo kalená, *N* - nitridovaná, *B* - boridovaná. Vzorky bez dodatkového písmena označujú základný materiál bez *TS*.

Tvar skúšobných vzoriek bol hranolček s rozmermi 10°Ox10x100 mm, teda v tvare vhodnom pre skúšku

rázom v ohybe. Dĺžkový rozmer 100 mm je maximálny rozmer, ktorý je možné upnúť do zariadenia pre meranie koeficientu trenia.

3 TRIBOLOGICKÁ SKÚŠKA

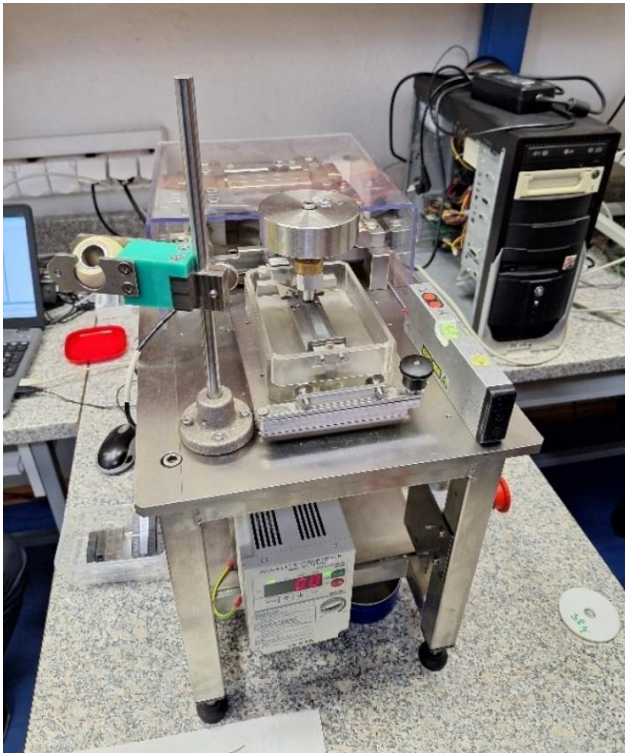
Trenie vzniká všade, kde sa voči sebe pohybujú dve telesá [5]. V tomto prípade to bola oceľová guľôčka z materiálu 100Cr6, ktorá sa pod zaťažením pohybovala po skúšobnej vzorke. Schéma tribologickej skúšky je zobrazená na obr. 1.



Obr. 1. Schéma tribologickej skúšky, 1 - prípravok s oceľovou guľôčkou, 2 - skúšobná vzorka

Pred samotnou skúškou, boli skúšobné vzorky očistené, aby sa na povrchu vzoriek nenachádzala mastnota alebo iné nečistoty, ktoré by ovplyvnili výsledok skúšky. Následne sa zvolili podmienky tribologickej skúšky. Rýchlosť priamočiareho vratného pohybu guľôčky po povrchu, bola 20 mm·s⁻¹. Testovací čas bol zvolený 6000 s, čo sa rovná vzdialenosti 100 m, ktorú guľôčka prejde po povrchu

skúšobnej vzorky. Skúšky prebiehali bez použitia maziva. Oceľová guľôčka bola zaťažená závažím s hmotnosťou 977 g a teda výsledná zaťažujúca sila, pôsobiaca na skúšanú vzorku bola 10 N. Experimentálny tribometer je zobrazený na obr. 2.



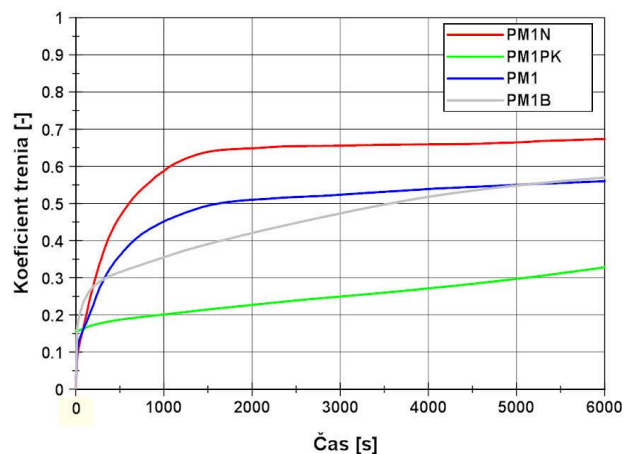
Obr. 2. Zariadenie pre meranie koeficientu trenia

Pri hodnotení vývoja koeficientu trenia sa hodnotia dve zóny. Prvá zóna, je zóna od začiatku skúšky až po bod, v ktorom sa hodnota koeficientu trenia ustáli. Druhá zóna, je oblasť od bodu ustálenia ďalej v čase. V tomto prípade k takémuto javu došlo len pri skúške materiálu *PM1* a *PM1N* a to v čase 2000 s. Preto sa tento čas vzal za smerodajný a v čase 2000 s sa vyhodnotili koeficienty trenia pre všetky materiály a ich varianty *TS*. Časové záznamy koeficientu trenia pri tribologickej skúške všetkých použitých vzoriek sú uvedené na obr. 3 až obr. 6. Hodnoty koeficientu trenia sú uvedené v tab. 4. Vzhľadom na celý priebeh koeficientu trenia je možné usúdiť, že pre práškové materiály sa najviac osvedčili postupy povrchového kalenia. Pri konvenčnej oceli 15 142 mal najlepší priebeh koeficientu trenia variant boridovaný, zatiaľ čo pri oceli 15 230 to bol variant nitridovaný.

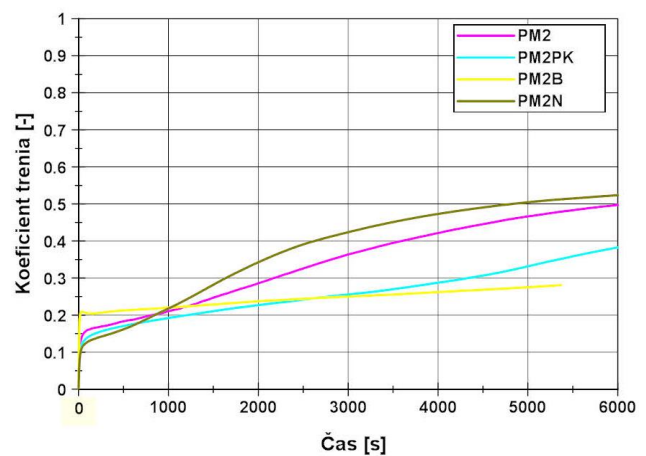
Pre ďalší výskum by bolo vhodné zmeniť parametre skúšky, a to buď zmenou zaťaženia, zvýšením rýchlosti pohybu guľôčky alebo predĺžením testovacieho času. Všetky tri varianty zmeny parametrov by spôsobili, že by sa koeficient po určitej dobe ustálil pri všetkých skúšaných vzorkách.

Tab. 4. Namerané hodnoty koeficientu trenia jednotlivých vzoriek v čase 2000 s

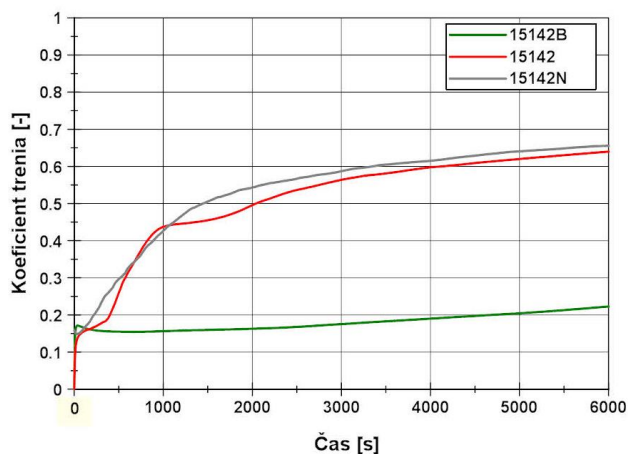
Označenie vzorky	Nameraný koeficient trenia [-]
<i>PM1</i>	0,51
<i>PM1PK</i>	0,24
<i>PM1N</i>	0,65
<i>PM1B</i>	0,42
<i>PM2</i>	0,28
<i>PM2PK</i>	0,23
<i>PM2N</i>	0,35
<i>PM2B</i>	0,25
15 142	0,5
15 142N	0,55
15 142B	0,17
15 230	0,52
15 230N	0,46
15 230B	0,48



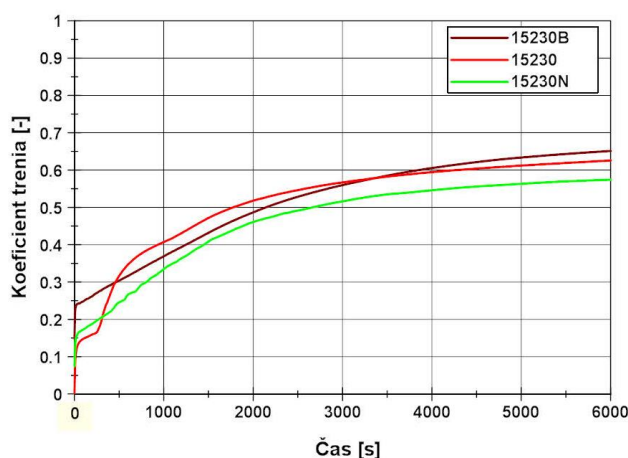
Obr. 3. Grafické znázornenie časového vývoja koeficientu trenia pre vzorky z materiálu *PM1* a jeho varianty



Obr. 4. Grafické znázornenie časového vývoja koeficientu trenia pre vzorky z materiálu *PM2* a jeho varianty



Obr. 5. Grafické znázornenie časového vývoja koeficientu trenia pre vzorky z materiálu 15 142 a jeho varianty



Obr. 6. Grafické znázornenie časového vývoja koeficientu trenia pre vzorky z materiálu 15 230 a jeho varianty

4 VYHODNOTENIE EXPERIMENTU

Pre práškový materiál s obsahom Cu 1,8 %, s označením $PM1$ bol, s ohľadom na koeficient trenia, najvýhodnejší postup TS - povrchové kalenie. Pri tejto vzorke bol dosiahnutý koeficient trenia 0,24, kdežto pri ostatných variantoch, vrátane vzorky bez TS , boli namerané hodnoty viac než dvojnásobné.

Pri meraní koeficientu trenia práškoveho materiálu s obsahom medi 4 %, s označením vzorky $PM2$ sa koeficienty trenia jednotlivých variant výrazne nelíšili, s výnimkou vzorky nitridovanej. Vzhľadom na zmenu ostatných vlastností po ďalšom skúmaní, bol pre tento druh materiálu stanovený najvýhodnejší postup TS - povrchové kalenie.

Pri konvenčnej oceli 15 142 boli pri meraní koeficientu trenia namerané najnižšie hodnoty pri vzorke boridovanej, a to 0,17. Avšak vzhľadom na ďalšie zmeny vlastností materiálu bol doporučený proces nitridácie, z dôvodu že pri nasledovnom hodnotení húževnatosti bolo zistené, že v materiáli po boridovaní prebehli štruktúrne zmeny, ktoré viedli k výraznému zníženiu vrubovej húževnatosti. Takýto materiál by bol v praxi takmer nepoužiteľný. Rázová

húževnosť konvenčných ocelí pred a po TS je uvedená v tab. 5.

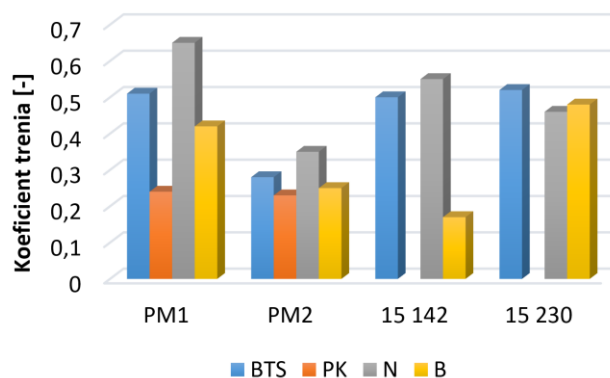
Tab. 5. Hodnoty rázovej húževnatosti konvenčných ocelí pred a po tepelnom spracovaní

Materiál	Priemerná hodnota vrubovej húževnatosti [$J \cdot cm^{-2}$]
15 142	131,5
15 142N	159,5
15 142B	5,3
15 230	91,1
15 230N	53,5
15 230B	128,8

Pri oceli 15 230 bol dosiahnutý najnižší koeficient trenia 0,46 pri vzorke nitridovanej a po aplikácii boridácie bol nameraný koeficient trenia 0,48, čo je porovnateľný výsledok. Vrubová húževnosť vzorky po nitridácii klesla o 42 %, kdežto po aplikácii boridácie stúpla o 41 %.

Priemerná mikrotvrdosť nitridovanej vzorky z ocele 15 230 bola 665 HV_{0,01} s maximom 826 HV_{0,01}, kým priemerná mikrotvrdosť boridovanej vzorky bola 3076 HV_{0,01}, s maximom 3662 HV_{0,01}. Po zistení týchto skutočností bol doporučený pre tento materiál proces boridácie.

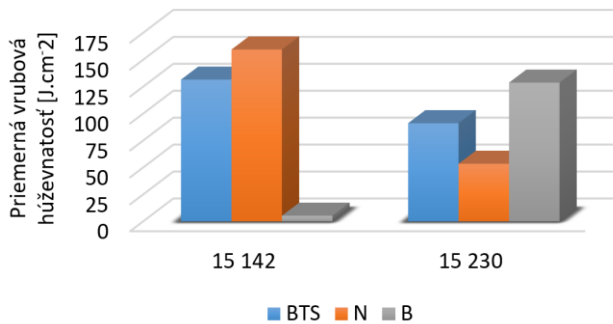
Na obr. 7 je znázornené grafické porovnanie hodnôt koeficientu trenia jednotlivých materiáloch pri všetkých variantoch TS v čase 2000 s.



Obr. 7. Porovnanie hodnôt koeficientu trenia jednotlivých materiáloch pri všetkých variantoch v čase 2000 s

Pri práškových materiáloch sa vrubová húževnosť nehodnotila, pretože tieto materiály sú všeobecne krehké a TS ovplyvnilo ich vrubovú húževnosť minimálne. Tieto materiály nie sú vhodné na rázovo zaťažované súčiastky. Naopak sú vhodné pre výrobu málo namáhaných súčiastok alebo pre výrobu súčiastok namáhaných na oter. Ich hlavnou prednosťou však je rýchla výroba tvarovo náročných súčiastok, ktorých výroba konvenčnými metódami by bola veľmi drahá a časovo náročná.

Na obr. 8 je znázornené grafické porovnanie hodnôt priemernej hodnoty vrubovej húževnatosti konvenčných ocelí pri všetkých variantoch TS.



Obr. 8. Porovnanie hodnôt koeficientu trenia jednotlivých materiálov pri všetkých variantoch v čase 2000 s

ZÁVER

Po vykonaní a vyhodnotení experimentálnych meraní bolo konštatované, že pre práškové materiály sú s ohľadom na koeficient trenia, najvýhodnejšie v oboch prípadoch postupocho povrchového kalenia. V prípade materiálu PM1 pri postupe nitridácie. Pri konvenčných oceliach boli dosiahnuté veľmi rozdielne výsledky, no vzhľadom na ostatné vlastnosti vybraných materiálov po tepelnom spracovaní, bol stanovený pre ocel' 15 142

najvýhodnejší proces nitridácie a pre ocel' 15 230 proces boridácie.

Pod'akovanie

Tento výskum bol podporený zo zdrojov APVV, číslo APVV-20-0427; KEGA, číslo KEGA 008ŽU-4/2022 a VEGA, číslo VEGA 1/0741/21 a VEGA 1/0044/22.

LITERATÚRA

- [1] GÁBRIŠOVÁ, Z. - BRUSILOVÁ, A. (2019): *Tepelné spracovanie, Návodý na cvičenia*. Bratislava: SPEKTRUM STU.
- [3] STEELNUMBER (2024): *European steel and alloy grades*. Dostupné na: https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=335.
- [4] MMSPEKTRUM (2024): *Vytváření tvrdých a otěruvzdorných povrchů pomocí boridování | MM Průmyslové spektrum* (mmspektrum.com) [online].
- [5] ENGINEERING (2024): Dostupné na: <https://www.engineering.sk/strojjarstvo-extra/16293-tribologicke-skusky-materialov>
- [6] MORAVEC, J. - KANTORÍKOVÁ, E. - FABIAN, P. (2020): *Prášková metalurgia*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, p. 130.