

Mikroskopické hodnotenie podpovrchových zmien vybraných materiálov po opotrebení

Microscopic Evaluation of Subsurface Changes of Selected Material after Wear

Ing. Marcel Kohutiar¹; Ing. Jan Holec²; Ing. Mariana Janeková¹; prof. Ing. Františka Pešlová, PhD.^{1,2}

¹ Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, Fakulta priemyselných technológií v Púchove, I. Krasku 491/30, 020 01 Púchov, Slovenská republika

² České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Práca sa zaoberá možnou odozvou mikroštruktúry vybraných materiálov po pôsobení kombinovaného opotrebenia (abrazívne, eróziálne, kavitačné). Jedná sa o materiály, ktoré sú vytypované pre lopatky vodných turbín ako náhrada za súčasne používané. Materiály boli dlhodobo vystavené kombinovanému zaťaženiu v kvapalnom prostredí simulovanou skúškou opotrebenia. Skúšobné materiály boli následne štruktúrne porovnávané spolu s konkrétnym materiálom odobratým priamo z lopatky vodnej turbíny, ktorá niekoľko rokov pracovala na vodnom toku. V práci boli skúmané dva druhy liatiny a antikoročná oceľ. Pozornosť bola zameraná na hodnotenie a porovnanie povrchovej a podpovrchovej mikroštruktúry materiálov pred a po opotrebení. V závere práce je na základe hmotnostných úbytkov a mikroskopického hodnotenia vybraný a odporúčaný ten materiál, ktorý sa z pohľadu mikroštruktúry ukázal ako najodolnejší voči pôsobeniu kombinovaného opotrebenia. V práci sa vychádzalo z teoretických poznatkov o vplyve deformácie opotrebovania na povrch kovových materiálov po ich zaťažení.

Kľúčové slová: abrazia; erózia; plastická deformácia; opotrebenie; liatina

Along with increasing global energy demands, the renewable energy technologies for primary electrical power production are the subject of increasing attention. Hydropower is supposed to be one of the most environment-friendly energy production technologies. At present, a large number of new facilities are in development or they were recently commissioned. Many existing facilities are undergoing expansion with retrofits of more efficient technologies. However, water turbines are degraded and they lose their effectiveness due to corrosion and erosion (hydro-abrasion, fluid erosion and cavitation). Factors, affecting this degradation, include the type of the hydroelectric power plant, the design of the hydro turbine (Francis, Kaplan or Pelton). Other factors are the specific operating conditions, such as the corrosive potential of the water and the size and amount of the sand, gravel debris or silt in the water. While public utilities are requested to offer higher profitability, the device has to withstand more pressure and water speed and it has to spread into the less accessible and more polluted waterways. These factors increase the effect of wear mechanism acting on the turbine components. This work was based on the theoretical knowledge about the impact of combined wear of metallic material after its surface loading. The given paper deals with the possible microstructure response of given materials after their affection by (erosive, abrasive, cavitation) combined wear. The tested materials are used in the manufacture of water turbines blades replacement of the water turbines blades, which are currently used. The materials were exposed to a long-term combined wear in a liquid medium in order to simulate wear. Material samples, namely stainless steel and two types of cast iron were subsequently structurally compared with the particular material of the water turbine blade, which worked for several years on the waterway. Experimental part makes an evaluation and comparison of the surface and subsurface microstructure of materials before and after the effect of wear. Furthermore, based on percentage weight loss and microscopic evaluation, the most suitable material is selected and recommended on the basis of the least influence by the combined wear from the viewpoint of the microstructure.

Key words: abrasion; erosion; plastic deformation; wear; cast iron

V prevádzkových podmienkach pôsobí na technický objekt celý rad procesov a vplyvov. Výsledkom sú zmeny funkčných plôch strojných súčastí, ktoré neskôr vedú k prvotným príčinám vzniku degradácie [1]. Tento degradačný proces na povrchoch funkčných plôch je v prevažnej miere spôsobený opotrebením. Opotrebenie spôsobuje nie len zmeny vlastností funkčných plôch, ale

aj zníženie životnosti, spoľahlivosti technického objektu a straty energie [2]. Na spomalenie degradačných procesov majú výrazný vplyv náklady spojené s údržbou, inováciami a opravou strojných zariadení. Opotrebeniu je možné pripísať až 80 % porúch strojov a strojných súčastí [3]. Okrem opotrebenia sa vyskytujú aj iné druhy poškodenia. Vo všeobecnosti opotrebenie zhor-

šuje funkciu strojného zariadenia, čo môže viesť až k jeho predčasnému vyradeniu z prevádzky alebo k jeho havárii [4]. Takto spôsobené škody sú príčinou ekonomických strát a sú porovnateľné so škodami vzniknutými následkom korózie. Jednou z požiadaviek modernej techniky je predlžovanie životnosti a zvyšovanie spoľahlivosti používaných materiálov [5]. Uvedené požiadavky sa uplatňujú hlavne pri technických objektoch, ktoré sú vystavené koróznemu, kavitačnému a abrazívnemu opotrebeniu. Väčšinou ide o konštrukčné prvky, pracujúce v kvapalnom médiu. Aj riešená problematika sa zaoberá materiálmi, z ktorých sa vyrábajú lopatky vodných turbín, ktoré sú vystavené kombinovaniu opotrebeniu. Výrobca navrhuje lacnejší materiál – grafitickú liatinu za súčasne používanú oceľ COR 13-4 (EN – antikorózna oceľ 1.4313). Pre voľbu zmeny materiálu boli výrobcom žiadané abrazívne skúšky.

Popis experimentu

V experimente simulujúcom kombinované opotrebenie boli skúmané materiály, ktoré sa v súčasnosti využívajú k výrobe lopatiek Kaplanovej turbíny. Boli to plechy z antikorózneho ocele COR 13-4 (EN – antikorózna oceľ 1.4313) o hrúbke 10 mm, ktoré by mali byť nahradené grafitickou liatinou. Skúmané materiály by mali špecifickým spôsobom vylepšiť už používané materiály pre výrobu lopatiek vodných turbín. Boli skúmané: liatina s guľôčkovým grafitom (tvárna liatina), v tepelne spracovanom stave – liatina ADI (odliate na Žilinskej univerzite v Žiline (ŽU)) a liatina s lupienkovým grafitom (sivá liatina) odobraná priamo z odliatej lopatky vodnej turbíny.

Skúška abrazívneho opotrebenia

Skúška abrazívneho opotrebenia bola uskutočnená na zariadení simulujúcom kombinované opotrebenie, ku ktorému dochádza u lopatiek vodných turbín (obr. 1).

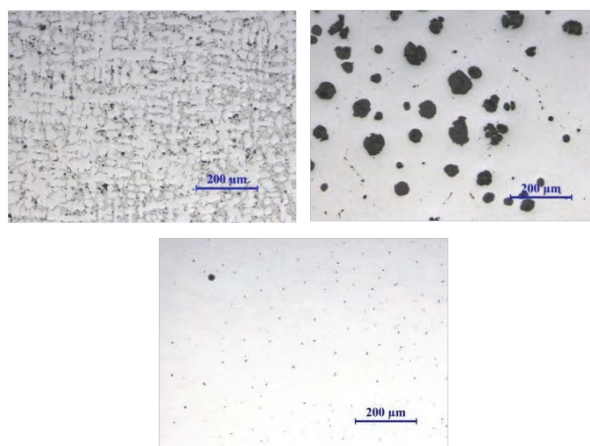


Obr. 1 Zariadenie simulujúce opotrebenie [11]
Fig. 1 Wear testing device [11]

Z jednotlivých materiálov boli vyrezané vzorky v tvare doštičiek s rozmermi (50 × 30 × 3) mm, ktoré boli pomocou upínacích prípravkov upevnené na otáčajúcich sa úchytoch rotora. Poloha upnutia vzoriek, čiže uhol natočenia voči vodorovnej ose na rotujúcom bubne skúšobného stroja bol vždy rovnaký. Otáčky bubna sa behom testovania udržiavali na hodnote cca 850 min⁻¹. Abrazívne médium tvorila suspenzia vody a kremičitého piesku o frakcii približne 1,5 mm. Všetky vzorky boli vystavené abrazívnemu pôsobeniu vo vode po dobu 15 hodín, pričom povrchová zmena štruktúry v dôsledku opotrebenia jednotlivých vzoriek bola priebežne sledovaná pomocou stereomikroskopu NIKON SZM 1500.

Mikroskopické hodnotenie

Pri hodnotení liatin a ocele je potrebné vychádzať z čistoty mikroštruktúry, kedy sa kladie dôraz na identifikovanie nežiaducich fáz, ktoré znehodnocujú materiály a môžu byť iniciátormi ďalšieho poškodenia. Z toho dôvodu bola venovaná pozornosť východiskovému materiálu ako z pohľadu jeho mikročistoty, tak aj z pohľadu morfológie a rozloženia grafitu. Toto hodnotenie sa vzťahovalo hlavne na oblasti medzi povrchovou a podpovrchovou vrstvou skúmaného materiálu. Príklad hodnoteného materiálu (liatiny s lupienkovým grafitom, grafitickej liatiny a antikorózneho ocele) pri 200násobnom zväčšení uvádza obr. 2.



Obr. 2 Mikroštruktúra liatiny s lupienkovým a s guľôčkovým grafitom (horné obr.) a antikorózneho ocele; zv. 200×

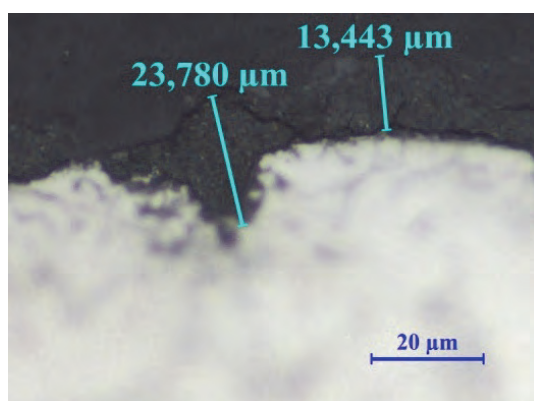
Fig. 2 Microstructure of lamellar graphite and ductile cast iron (top images) and stainless steel; zoomed 200×

Pri každom materiáli bola porovnávaná zmena povrchu materiálu pred a po abrazívnej skúške a priebežne sledovaný úbytok materiálu. Pre mikroskopické pozorovanie povrchových zmien, boli metalograficky pripravené rezy v kolmom smere na plochy po abrazívnom opotrebení a na nich boli merané oxidické vrstvy pomocou optického svetelného mikroskopu DMI 5000M.

Na povrchu grafitickej liatiny ako s lupienkovým, tak aj guľôčkovým grafitom, bol pozorovaný výskyt pomerne súvislej, nerovnomernej vrstvy oxidickej fázy. U tvárnej

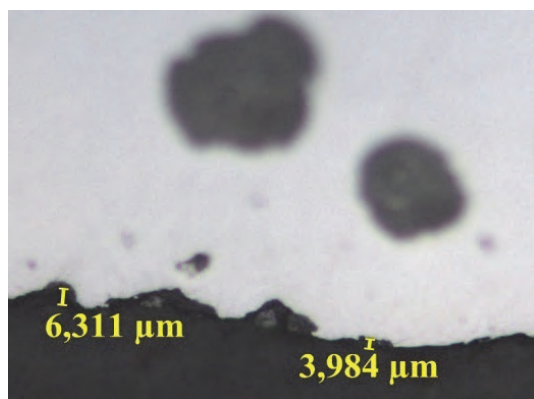
liatiny mala táto vrstva hrúbku cca 13 až 24 μm , pričom priemerná hodnota bola 16 μm (obr. 3).

Dá sa predpokladať, že táto grafitická liatina bude citlivejšia na ďalšie opotrebenie, teda bude rýchlejšie dochádzať ku zmenám povrchovej geometrie. Mikroskopické hodnotenie štruktúry ukázalo, že v dôsledku abrazívneho opotrebenia nedochádzalo ku morfológickým zmenám mikroštruktúry, pretože nebola zaznamenaná zmena grafitu alebo kovovej matrice feritu. V dôsledku tlakových síl vody a abrazívnych častíc na povrchu liatin dochádzalo ku bombírovaniu povrchov, teda ku zmene rovinnosti.



Obr. 3 Oxidické fázy na povrchu tvárnej liatiny; zv. 500×
Fig. 3 Oxide phases on the cast iron surface; zoomed 500×

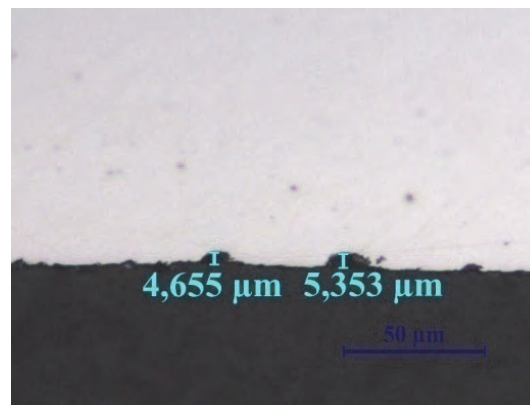
Pri liatine s guľôčkovým grafitom bolo možné pozorovať väčšiu zmenu rádiusu povrchu v mieste opotrebenia, ako u liatiny s lupienkovým grafitom, čo môže súvisieť s chemickým zložením, ktoré ovplyvňuje aj mechanické vlastnosti hodnotených liatin. Na povrchu materiálu s guľôčkovým grafitom sa vyskytovalo korózne napadnutie sprevádzané nesúvislou a nerovnomernou vrstvou oxidických fáz (obr. 4). Hrúbka narušenej oxidickej vrstvy sa pohybovala v rozmedzí cca 4 až 12 μm , s priemernou hodnotou 6 μm .



Obr. 4 Povrch liatiny s guľôčkovým grafitom ; zv. 500×
Fig. 4 Ductile cast iron surface; zoomed 500×

V objeme materiálu ADI liatiny (odliatej v ŽU) nebola pozorovaná žiadna zmena mikroštruktúry. Na povrchu

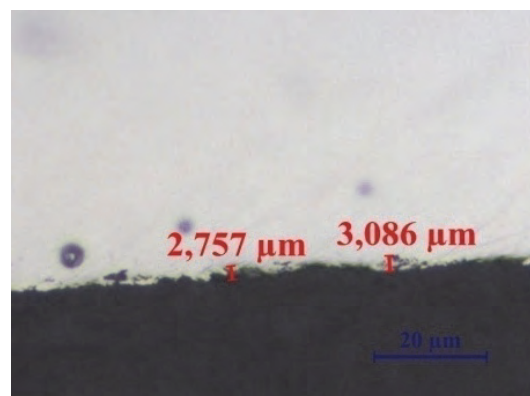
sa po abrazívnych skúškach vyskytovalo korózne napadnutie s hĺbkou cca od 4,6 do 5,4 μm (obr. 5).



Obr. 5 Povrch ADI liatiny; zv. 500×
Fig. 5 Austempered ductile cast iron; zoomed 500×

Zmena mikroštruktúry v objeme liatiny s guľôčkovým grafitom (ŽU) nebola pozorovaná. Na povrchu materiálu bol na určitých miestach výskyt jamiek s hĺbkou 6,5 μm , čo mohlo súvisieť aj s výskytom kavitačných procesov sprevádzajúcich korózne aj abrazívne opotrebenie v kvapalnom médiu.

Na záver boli skúšané a analyzované antikorózne oceli, kde v dôsledku abrazívneho (kavitačného a korózneho) opotrebenia neboli zaznamenané žiadne zmeny mikroštruktúry. Na povrchu materiálu boli merané korózne splodiny s hĺbkou 2,7 – 3,1 μm (obr. 6).



Obr. 6 Povrch antikoróznej ocele po abrazívnom opotrebení; zv. 500×
Fig. 6 Stainless steel surface after abrasive wear; zoomed 500×

Výsledky a diskusia

Porovnanie mikroštruktúrnych zmien s percentuálnymi hmotnostnými úbytkami skúmaných materiálov po 15 hodinách simulovaných skúšok, ktoré týmto hodnoteniam predchádzali, ukazuje, že liatina s guľôčkovým grafitom (dodaná priamo z používanej lopatky vodnej turbíny) sa opotrebovávala najviac na rozdiel od liatiny s guľôčkovým grafitom vyrobenej podľa požiadaviek

na ŽU. Takto vyrobená grafitická liatina sa veľkosťou hmotnostných úbytkov javí ako najodolnejšia zo skúmaných materiálov. Hmotnostné úbytky navrhutej liatiny s guľôčkovým grafitom mali v tomto prípade ešte menšie hmotnostné úbytky ako antikoročná oceľ.

Vzhľadom k tomu, že vyhodnotenie len na základe hmotnostných úbytkov nemusí byť vždy komplexné, bola v práci venovaná pozornosť aj zmenám geometrie. Na základe hodnotenia makroštruktúrnych zmien bolo možné porovnať plošné rozdiely medzi pôvodnou geometriou a geometriou po skúškach opotrebenia. Z každej vzorky, ktorá bola vystavená skúške opotrebenia, bola odobraná opotrebená a neopotrebená časť materiálu, ktoré boli navzájom meraním porovnávané. Rozdiel šírky vzoriek pred a po abrázii potvrdili namerané hodnoty hmotnostných úbytkov uvedené v tab. 1. V praxi je dôležité sledovať a hodnotiť nie len hmotnostné, ale aj geometrické rozdiely, pretože sa jedná o zmeny na funkčných súčiastkach, čo sa môže prejaviť v uložení a vzniku kmitania alebo vibrácii. Tieto zmeny môžu ďalej viesť ku vzniku následných medzných stavov, ktoré môžu vyústiť až po haváriu celého technického objektu – v tomto prípade vodnej turbíny.

Tab. 1 Porovnanie nameraných hodnôt skúmaných materiálov

Tab. 1 Comparison of the measured values of the studied materials

Materiál	Rozdiel šírky vzorky pred a po opotrebení (mm)	Percentuálny úbytok po 15h (%)
Liatina s lupienkovým grafitom	2,4	
Liatina s guľôčkovým grafitom	1,3	21,15
ADI liatina	0,5	14,84
Liatina s guľôčkovým grafitom (UŽ)	0,5	12,34
Antikoročná oceľ	0,6	13,43

Záver

Znížiť náklady spojené s opotrebením a predísť vážnejším poruchám je možné nie len zvolením vhodného materiálu, ale aj správnou kontrolou stroja, prípadnou renováciou predlžujúcou životnosť strojných súčiastí a včasnou výmenou súčiastí pred koncom ich životného cyklu.

Materiály, ktoré sú v súčasnosti používané na výrobu lopatiek vodných turbín (antikoročná oceľ COR 13-4 a liatina s guľôčkovým grafitom) vykazovali na základe hmotnostných úbytkov a geometrických zmien rozdielnu odolnosť proti abrazívnemu opotrebeniu. Liatina s guľôčkovým grafitom sa javila ako najhoršia z kovových materiálov, a to vzhľadom na to, že jej opotrebovanie dosahovalo viac ako 21 %. Antikoročná oceľ COR 13-4, ktorej veľkosť opotrebenia bola 13,4 %, dosiahla o 1/3 menšie opotrebenie ako táto liatina s guľôčkovým grafitom a približne rovnaké

opotrebenie ako novo navrhnuté liatiny odliate na Žilinskej univerzite v Žiline. Liatina s guľôčkovým grafitom (ŽU) dosiahla z materiálov najmenšie opotrebenie abráziou (12,3 %).

Dôsledným mikroskopickým štúdiom povrchových a podpovrchových mikroštruktúr (na veľkom počte vzoriek materiálov) táto práca preukázala, že nedošlo k deformačným zmenám ani na povrchu alebo pod povrchom skúmaných materiálov. Na metalograficky pripravených mikroštruktúrach v kolmých rezoch bolo potvrdené, že dochádzalo len ku vzniku väčších alebo menších oxidických fáz (prípadne korózných splođín) na povrchu materiálu vystavenému kombinovanému opotrebeniu.

Pre korektné vyjadrenie sa k odolnosti materiálov voči opotrebeniu odporúčajú autori práce namerané hmotnostné úbytky z materiálov vždy doplniť mikroskopickým hodnotením povrchových a podpovrchových mikroštruktúr.

Pod'akovanie

Autori ďakujú Slovenskej grantovej agentúre za finančnú podporu projektov KEGA 006TnUAD-4/2014, VEGA 1/0385/14 a projektu „Centrum pre testovanie kvality a diagnostiku materiálov“, ITMS kód 26210120046 Operačného programu Výskum a vývoj financovaný z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

This work was supported by the Ministry of Education, Youth and Sport of the Czech Republic, program NPU1, project No. LO1207.

Literatúra

- [1] STODOLA, J., PEŠLOVÁ, F., KRMELA, J. *Opotrebení strojních součástí*. 1. vyd. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-552-9.
- [2] BLÁŠKOVIČ, P., BALLA, J., DZIMKO, M. *Tribológia*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-050-0633-0.
- [3] PUŠKÁR, A., HAZLINGER, M. *Porušovanie a lomy súčiastí*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2000. ISBN 80-7100-654-8.
- [4] DAVID, J. R. *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. USA : ASM International, 2001. ISBN 0-87170-700-4.
- [5] STACHOWIAK, G. W., BACHELOR, A. *Engineering Tribology*. USA: Elsevier, 2005. ISBN 978-0-7506-7836-0.
- [6] VODÁREK, V. *Metody studia struktury*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2559-5.
- [7] HELEBRANT, F., HRABEC, L., BLATA, J. *Provoz, diagnostika a údržba strojů*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3028-5.
- [8] GALE, W. F., TOTEMEIER, T. C. *Smithells metals reference book*. London : Elsevier, 2004. ISBN 978-0-0805-8096-1.
- [9] MCGUIRE, M. F. *Stainless steels for design engineers*. USA : ASM International, 2008. ISBN 978-0-87170-717-8.
- [10] MORAVČÍK, R., HAZLINGER, M. a kol. *Náuka o materiáloch I*. 1. vyd. Trnava: AlumniPress, 2010. ISBN 978-80-8096-123-7.
- [11] HOLEC, J. The abrasive wear of materials for functional parts of water turbines. *Hutnícké listy*, 67 (2014) 3, 29–32. ISSN 0018-8069.