

Zenon A. OPIEKUN\*, Antoni W. ORŁOWICZ\*

## HYDROŚCIERNE ZUŻYCIE ŁOPATEK WIRNIKÓW POMP POGŁĘBIAREK SSĄCYCH

### THE ROTOR BLADES HYDROABRASION CONSUMPTION OF SAND PUMP DREDGES

#### Słowa kluczowe:

wysokochromowe żeliwo eutektyczne, hydrościerne zużycie, struktura geometryczna powierzchni (SGP), mikrostruktura, mikrotwardość

#### Key words:

eutectic high-chromium cast iron, hydroabrasion consumption, geometrical product specification (GPS), microstructure, microhardness

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono efekty hydrościernego używania się żeliwnych łopatek wirnika pompy ssawnej. Wirnik pompy odlany był z wysokochromowego żeliwa eutektycznego (2,4% C; 33,9% Cr; 1,7% Ni; 1,24% Si; 1,21% Cu i 0,43% Mn). W wyniku oddziaływania strugi wodnej z zawartością około 20% cząstek minerału kwarcowego nastąpiło zużycie ścierne łopatek wirnika pompy ssawnej. Zużycie ścierne przebiegało dwuetapowo, przez skrawanie miększego od ziaren kwarcu ferrytu stopowego i zmęczeniowe pękanie oraz wykruszanie się twardszych od kwarcu węglików typu  $M_7C_3$ .

---

\* Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Katedra Odlewnictwa i Spawalnictwa, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, e-mail: zopiekun@gmail.com.

## WPROWADZENIE

W pogłębiarkach do urabiania kruszywa mineralnego z dna zbiorników wodnych stosowane są pompy ssawne, tzw. refulery. Podstawowym kryterium oceny pompy pracującej na pogłębiarkach ssących jest jej trwałość w danych warunkach eksploatacji. Głównymi elementami pomp decydującymi o czasie ich pracy są wirniki, które charakteryzują się małą liczbą grubych łopatek, małymi prędkościami obrotowymi (500–800 obr./min) i szerokimi kanałami przepływowymi umożliwiającymi eksploatację złóż żwirowo-piaskowych z głębokości do kilkunastu metrów [L. 1]. Ze względu na charakter pracy wirniki pomp, a zwłaszcza ich łopatki, najszybciej ulegają zużyciu.

O czasie pracy pompy ssawnej decyduje stopień zużycia łopatek. Zmniejszenie grubości łopatek o około 10% wywołuje kilkudziesięcioprocentowy spadek (około 40–50%) wydajności pompy i konieczność wymiany wirnika [L. 1].

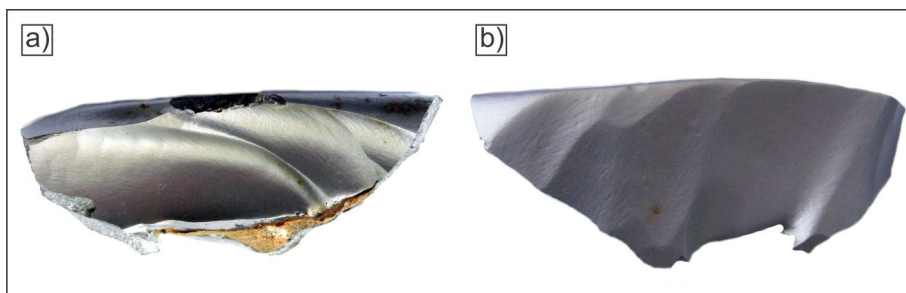
Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie przebiegu zużycia hydrościernego [L. 2, 3] łopatek żeliwnego wirnika pompy pogłębiarki ssącej podczas eksploatacji złoża żwirowo-piaskowego z dna zbiornika wodnego.

Złożem żwirowo-piaskowym był minerał kwarcowy o zróżnicowanej morfologii i średnicach ziarn od około 0,0–2,0 mm. W tym frakcja od 0,0–0,5 mm stanowiła około 80% objętości wydobytego minerału, a frakcja od 0,5–2,0 mm resztę. Udział tych frakcji minerału kwarcowego w mieszaninie z wodą wyniósł około 20%. Zużycie łopat wirnika uniemożliwiające dalszą jego eksploatację nastąpiło po wydobyciu około 120 tys. m<sup>3</sup> tego minerału.

## Badania

### *Materiał i metodyka badań*

Do badań efektów hydrościernego zużycia pobrano próbki z zużytej łopatki wirnika pogłębiarki (Rys. 1).



Rys. 1. Obrazy (makrostruktura) powierzchni zużytej łopatki wirnika pogłębiarki. Powierzchnia wewnętrzna (a), powierzchnia zewnętrzna (b)

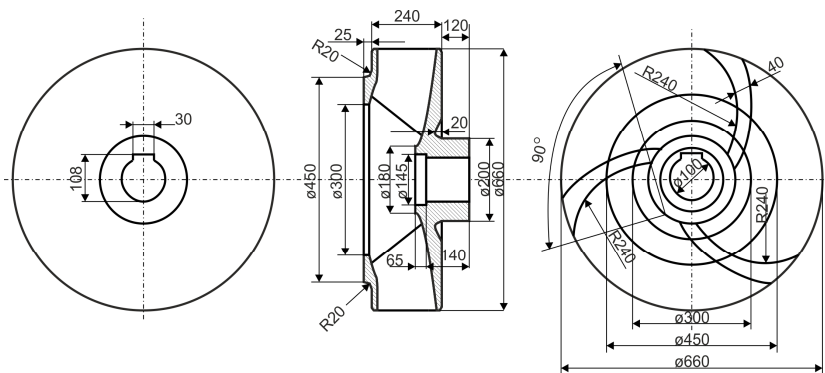
Fig. 1. Pictures (macrostructure) of surface hydroabrasion consumption of rotor blade sand pump dredger. Internal surface (a), external surface (b)

Wirnik pompy (**Rys. 2**) odlany był z wysokochromowego żeliwa o składzie chemicznym określonym widmową analizą spektralną z użyciem spektrometru Q4 Tasman 130 (Bruker)\*.

**Tabela 1. Skład chemiczny żeliwnego odlewu wirnika**

Table 1. Chemical composition rotor blades made of cast iron

Składniki stopowe,%								
C	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	Al	P	S
2,43	33,9	1,70	0,43	1,24	1,21	0,014	0,42	0,15



**Rys. 2. Wirnik pompy pogłębiarki ssącej**

Fig. 2. Rotor of sand pump dredger

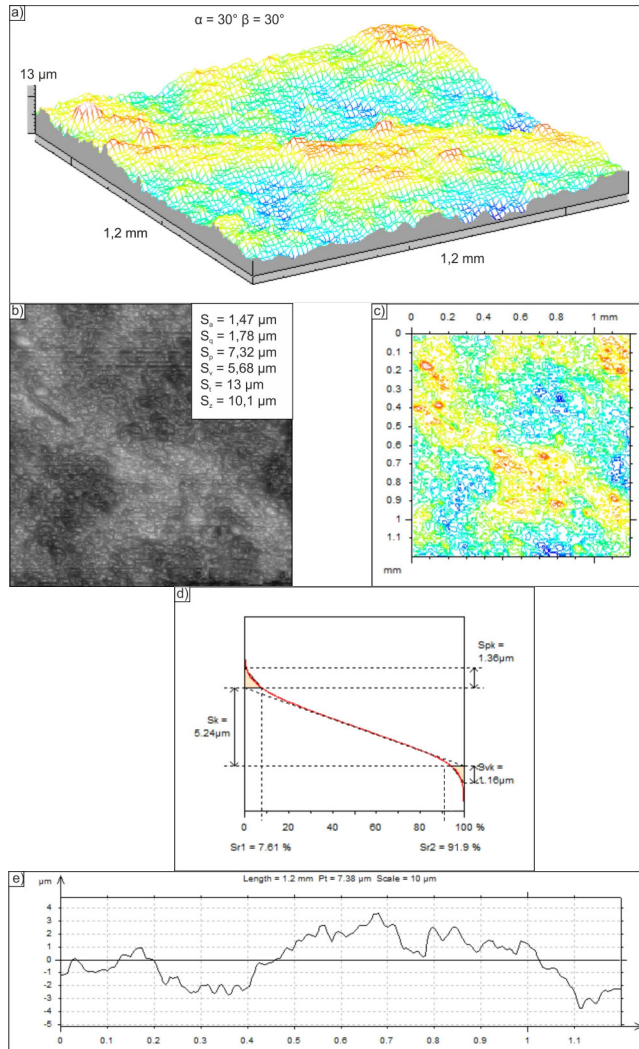
Zmiany struktury geometrycznej powierzchni (SGP) wywołane strugą wodno-ścierną analizowano z użyciem przyrządu Talyscan 150 firmy Taylor-Hobson z programem Mountains Map Universal. Analizowano sześć parametrów amplitudowych SGP:  $S_a$  – średnie arytmetyczne odchylenie w  $\mu\text{m}$ ,  $S_q$  – średnie kwadratowe odchylenie w  $\mu\text{m}$ ,  $S_p$  – maksymalna wysokość wzniesień w  $\mu\text{m}$ ,  $S_v$  – maksymalna głębokość wgłębień w  $\mu\text{m}$ ,  $S_t$  – wysokość nierówności w  $\mu\text{m}$  i  $S_z$  – wysokość nierówności wg 10 punktów w  $\mu\text{m}$ . Badania powierzchni zużytej łopatki wirnika i jej mikrostruktury prowadzono z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego z systemem mikroanalizy rentgenowskiej, Tescan Vega/XMU, EDS INCA 150 (Oxford)<sup>1</sup>. Pomiary mikrotwardości składników mikrostruktury odlewu żeliwnego wirnika wykonano z użyciem Nano-Scratch Testera (CSM Instruments)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Aparatura zakupiona w projekcie „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007–2013.

<sup>2</sup> Aparatura zakupiona w projekcie nr PO RPW. 01.03.00-18-012 z Funduszy Strukturalnych w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

### Wyniki badań

Na **Rys. 3** przedstawiono topografię powierzchni zużytej łopatki wirnika po-głębiarki ssącej.

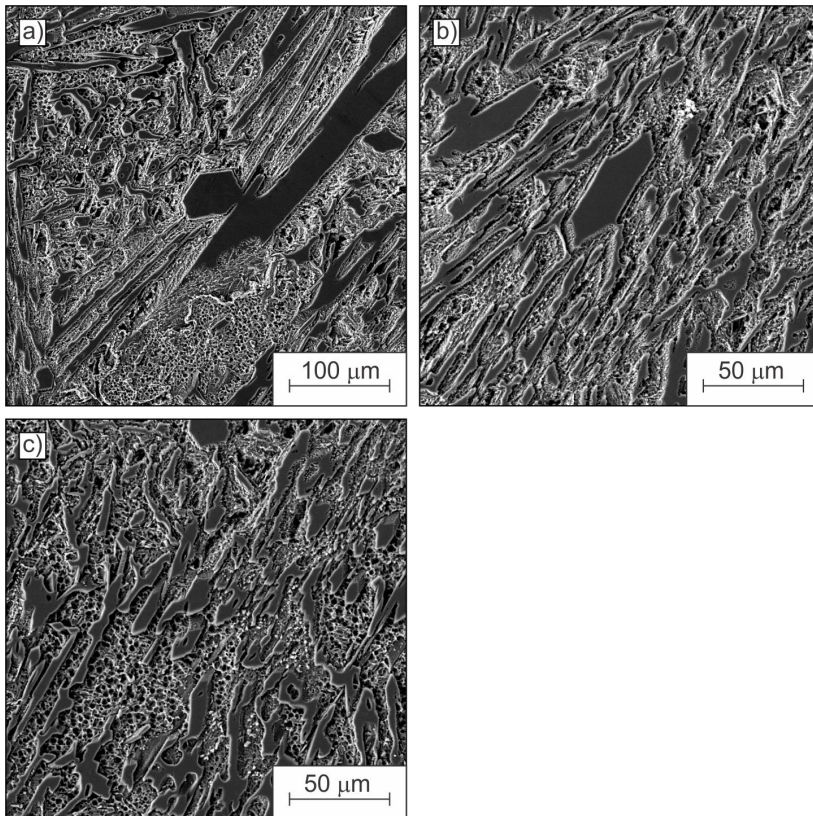


**Rys. 3.** Topografia powierzchni odlewu łopatki wirnika po eksploatacji. Widok 3D (a), powierzchnia odlewu z parametrami amplitudowymi (b), mapa warstwicowa (c), krzywa nośności z jej parametrami:  $S_k$  – wysokość chropowatości rdzenia,  $S_{pk}$  – zredukowana wysokość wzniesień,  $S_{vk}$  – zredukowana głębokość wgłębień,  $S_{r1}$  – udział wierzchołków,  $S_{r2}$  – udział nośny wgłębień (d), profil powierzchni (e)

**Fig. 3.** Topography surface blade of rotor after exploitation. 3D view (a), surface of casting with amplitude parameters (b), map of layer (c), carrying of curve with its parameters (d), profile of surface (e)

Widok powierzchni zużytej łopatkki wskazuje, że ma ona charakter losowy przejściowy między anizotropową i izotropową. Niewielka wartość parametru  $S_{pk}$  (zredukowana wysokość wzniesień – **Rys. 3d**) świadczy o dużej odporności na ścieranie powierzchni łopatek.

Na **Rys. 4** przedstawiono mikrostrukturę odlewu wirnika, a na **Rys. 5** rozmieszczenie powierzchniowe pierwiastków stopowych.

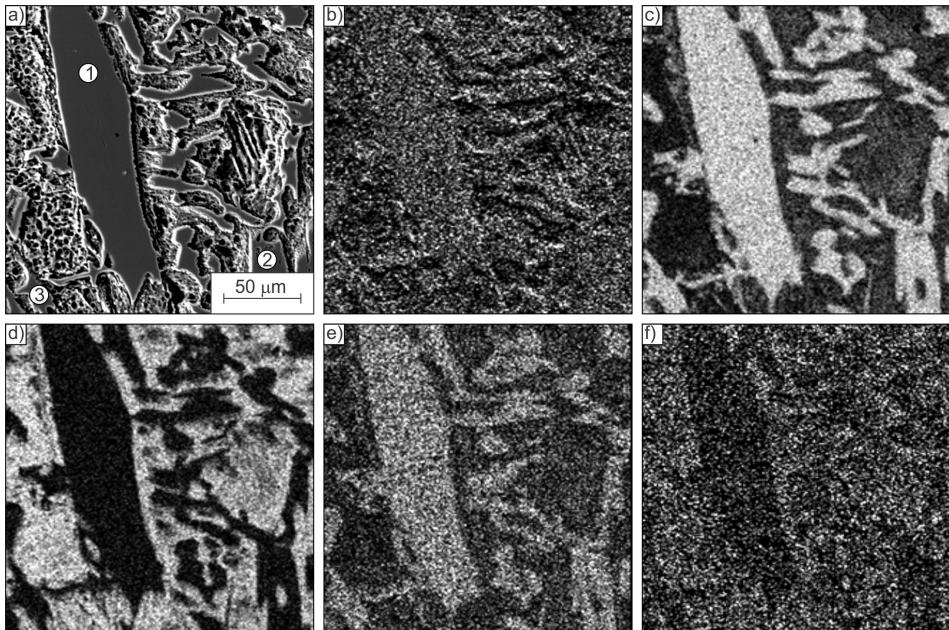


**Rys. 4. Mikrostruktura żeliwnego odlewu wirnika pogłębiarki. Nieregularna eutektyka, węgliki – ferryt stopowy. SEM. Zgląd trawiono odczynnikiem Marble'a**

**Fig. 4. Microstructure made of cast iron rotor blade sand pump dredger. Irregular eutectic, carbides – alloying ferrite. SEM. Etch. Marble'a reagent**

W **Tabeli 2** zestawiono stężenia pierwiastków chemicznych w % atomowych, w punktach 1, 2 i 3 faz z **Rys. 5a**.

Przykładowe obrazy powierzchni zużytej łopatkki wirnika przedstawiono na **Rys. 6**.



**Rys. 5.** Mikrostruktura z miejscami punktowej ilościowej analizy składu chemicznego (a), rozmieszczenie powierzchniowe węgla (b), chromu (c), żelaza (d), manganu (e), niklu (f)

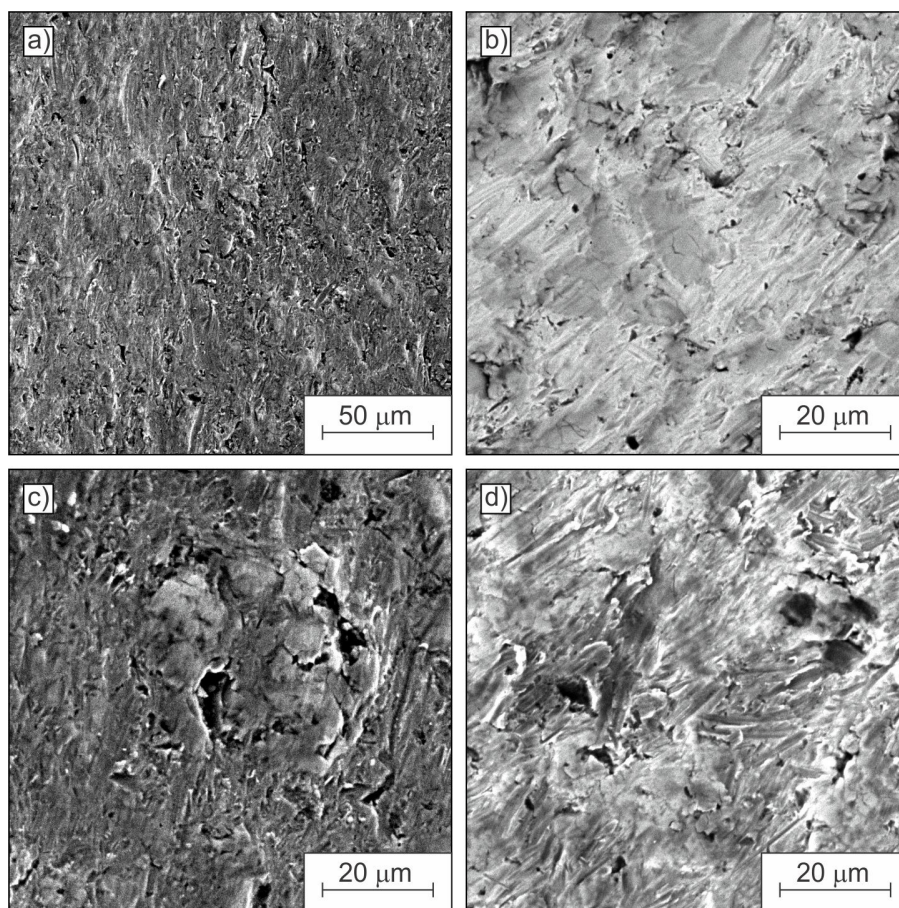
Fig. 5. Microstructure with places of point quantitative chemical analyze (a), surface distribution of carbon (b), chromium (c), iron (d), manganese (d), nickel (f)

**Tabela 2.** Stężenia pierwiastków w węglkach w obszarach 1, 2, 3 z Rys. 5a  
Table 2. Concentration of elements in carbides at 1, 2 and 3 areas from Fig. 5a

Obszar	Stężenie pierwiastka, % at.			
	C	Cr	Mn	Fe
1	32,64	54,39	0,40	12,51
2	33,44	54,06	0,36	12,16
3	34,35	53,04	0,43	12,16
średnio	33,48	53,83	0,39	12,27
odchylenie standardowe	0,86	0,70	0,03	0,20

Mikrotwardość składników mikrostruktury odlewu łopatkę wirnika (**Rys. 4**) mierzono piramidką Berkowicza (Nano-Scratch Tester<sup>\*\*</sup>) przy obciążeniu jej siłą 100 mN i 20 mN. Średnia mikrotwardość węglików bogatych w chrom i żelazo wynosiła około  $1930 \pm 35$  HV (obciążenie 100 mN), a ich moduł Youn-

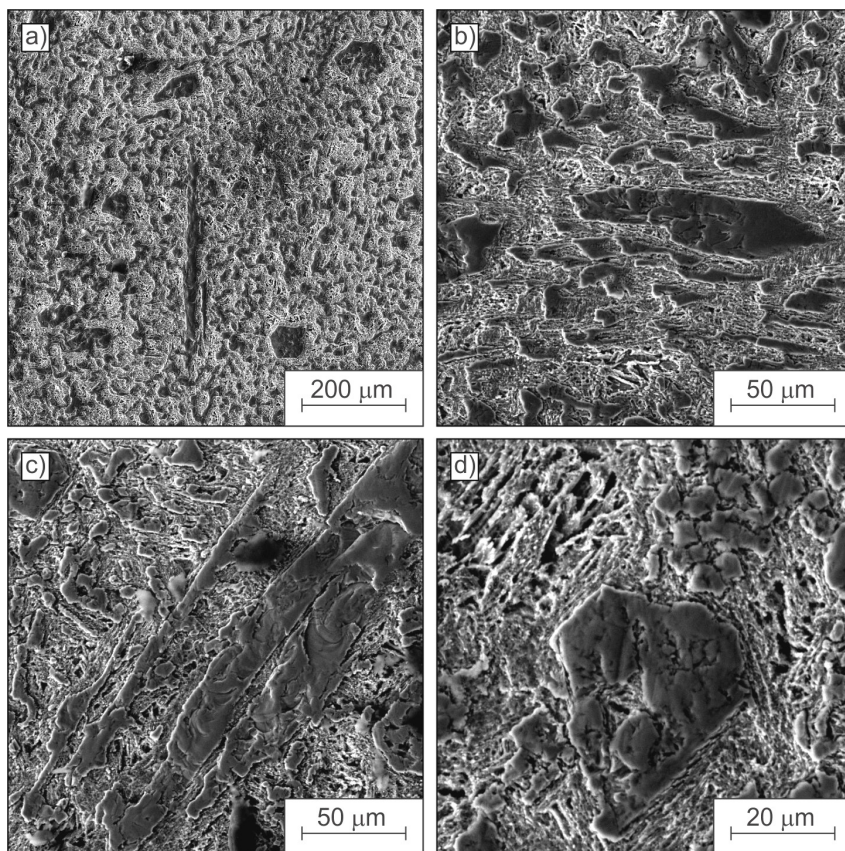
ga E był na poziomie około  $29\pm 10$  GPa. Mikrotwardość osnowy żeliwa (ferrytu niklowo-krzemowo-miedziowego) wynosiła  $550\pm 40$  HV (obciążenie 20 mN), a jej moduł E około  $250\pm 5$  GPa. Mikrostrukturę powierzchni zużytej łopatki wirnika, po jej wytrawieniu odczynnikiem Marble'a przedstawiono na **Rys. 7**.



**Rys. 6.** Przykłady pęknięć oraz wiórów na powierzchni łopatki wywołanych oddziaływaniem strugi wodnej z piaskiem kwarcowym, obrazy SE (a, c), obrazy BSE (b, d). SEM

Fig. 6. Example of cracks and shavings on the blade surface as an effect of stream water with sand quartz, pictures SE (a, c), pictures BSE (b, d). SEM

Większe pęknięcia na powierzchni łopatki występują w obszarach mikrostruktury, zlokalizowane gdzie są duże węgliki (**Rys. 6c, 7c, d**).



**Rys. 7. Obrazy powierzchni zużytej łopatki wirnika. Widoczne popękane i wykruszone węgliki. SEM. Trawiono odczynnikiem Marble'a**

**Fig. 7. Surface of pictures consumption blade of rotor sand pump dredgers. Cracks and crumble out carbides. SEM. Etch. Marble'a reagent**

## OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Powierzchnie łopatek wirników pomp pogłębiarek ssących narażone są podczas eksploatacji na oddziaływanie strumienia cząsteczek wody wraz z zawartymi w nim ziarnami kwarcowymi. Efektem tego oddziaływania jest zużycie erozyjne łopatek. Dominującymi mechanizmami erozji powierzchni łopatek, które występują z dużym nasileniem, to zużycie ściernie i zużycie zmęczeniowe. Jedną z najważniejszych cech, które charakteryzują strugę wodno-ścierną jest rozkład ciśnień występujących na jej przekroju poprzecznym. Rozkład ten decyduje o rozmieszczeniu w niej ściernych ziarn, co istotnie wpływa na erozyjność strugi [L. 4, 5].



Ponadto występowanie różnych fluktuacji strugi wodno-ścierniej sprawia, że hydrodynamiczne warunki poszczególnych ziarn piasku kwarcowego są bardzo zróżnicowane, co przejawia się występowaniem rozrzutu wartości prędkości przemieszczania ziarn w strudze.

Efektom różnej prędkości i zróżnicowanej masy cząstek piasku kwarcowego (różnej energii kinetycznej) w strudze wodno-ścierniej uderzającej w łopatki wirnika jest nierównomierne ich zużywanie się obrazujące makroskopowo faliste, głębokie ubytki materiału (**Rys. 1, Rys. 3a, b**).

Wirnik pompy ssawnej odlano z wysokochromowego żeliwa eutektycznego [**L. 6**]. Jego mikrostruktura składa się z iglastych i wielokątnych trygonalnych węglików bogatych w chrom typu  $M_7C_3$  i ferrytu stopowego (**Rys. 4, 5**). Twardość tych faz jest silnie zróżnicowana. Węgliki o składzie (po pominięciu około 0,4% at. manganu)  $(Cr_{0,82}Fe_{0,18})_7C_3$  są prawie 4 razy twardsze niż ferryt stopowy. Nieregularne ziarna minerału kwarcowego mają twardość około 1150 HV [**L. 7**]. Powierzchnie łopatek wirnika pompy ssawnej są zużywane przez liczne uderzenia cząstek ściernych kwarcowych, które przy ich przemieszczaniu w strudze wodnej usuwają przede wszystkim drobne wiórki miększego, o około 50% niż kwarc, ferrytu. Ślady skrawania pochodzące od ziarn minerału kwarcowego są regularne i mają stosunkowo gładką powierzchnię, o czym świadczą niewielkie parametry SGP ( $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_p$ ,  $S_v$ ,  $S_t$  i  $S_z$ ), a zwłaszcza parametry  $S_{pk}$  i  $S_{vk}$  (**Rys. 3b, d**). Przykłady mikrostruktury powierzchni łopatki wirnika (**Rys. 6**) ujawniają ślady skrawania ziarnami ściernymi, a także drobne pęknięcia. Na skutek dynamicznych uderzeń ziarn piasku kwarcowego o materiał łopatek wirnika następuje oprócz skrawania miększego od kwarcu ferrytu, pękanie zmęczeniowe i wykruszanie twardszych, o około 70% niż kwarc, węglików typu  $M_7C_3$ . Większe i głębsze obszary zużycia powierzchni obserwuje się w miejscach zmęczeniowego wykruszania grubych iglasto-płytkowych i wielokątnych węglików eutektycznych, usytuowanych równolegle do powierzchni łopatki (**Rys. 6c, Rys. 7c, d**).

Usunięcie przez trawienie śladów skrawania i wiórów ferrytu ujawnia pękane i wykruszone węgliki typu  $M_7C_3$  (**Rys. 7**).

## WNIOSKI

Na podstawie analizy struktury geometrycznej powierzchni, badań metalograficznych powierzchni, mikrostruktury oraz pomiarów mikrotwardości próbek pobranych z żeliwnej łopatki wirnika pompy pogłębiarki ssącej, służącej do urabiania minerału kwarcowego, można wnioskować o przebiegu procesu hydrościernego jej zużycia.

- Dominującymi mechanizmami zużywania się łopatek wirnika pompy było skrawanie miększego o około 50% niż kwarc ferrytu stopowego oraz zmęczeniowe pękanie i wykruszanie się twardszych o około 70% niż kwarc węglików bogatych w chrom typu  $M_7C_3$ .

- Większe i głębsze obszary zużycia powierzchni łopatek obserwuje się w miejscach wykruszających się grubych iglasto-płytkowych i wielokątnych eutektycznych węglików typu  $M_7C_3$  zlokalizowanych równoległe do powierzchni łopatki

## LITERATURA

1. Naziemiec Z.: Pompy w zakładach produkcji kruszyw, Surowce i Maszyny Budowlane, nr 1, 2008, s. 20–24.
2. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali, wyd. PWN-T, Warszawa 1995.
3. Borkowski P.J.: Teoretyczne i doświadczalne podstawy hydrostrumieniowej obróbki powierzchni, Wyd. Pol. Koszalińskiej, Koszalin 2004.
4. Neusen K.F., Gores T.I., Labus T.I.: Measurement of particle and drop velocities in a mixed abrasive water jet using a forward – scatter LDV system. *Jet Cutting Technology* 1992, pp. 63–73.
5. Borkowski P.: Rozkład ziaren ściernych w strudze wodno-ściernej kreowanej w tryskaczu z koncentryczną dyszą wielootworową. *Mat. XXIII Nauk. Szkoły Obr. Ściernej. Obróbka Ścierna – Podstawy i Technika*. Rzeszów, 2000, s. 504–510.
6. Rührig K., Walters D.: Legiertes Gusseisen. Band 1. Gusseisen mit Lamellengraphit und karbidisches Gusseisen. Giesserei – Verlag. Düsseldorf 1970.
7. Kosowski A., Podrzucki Cz.: Żeliwo stopowe, Wyd. AGH, Kraków 1981, s. 36.

## Podziękowania

Autorzy artykułu składają podziękowania prezesowi Przedsiębiorstwa Kruszywa i Usług Geologicznych „Kruszgeo” S.A. w Rzeszowie – panu mgr. inż. Janowi Batorowi i głównemu mechanikowi tej Firmy panu mgr. inż. Jerzemu Ziobrze za udostępnienie próbek łopatek wirnika pompy pogłębiarki ssącej i informacji dotyczącej eksploatowanego surowca mineralnego.

## Summary

**This article presents the effect made of cast iron rotor blades hydroabrasion consumptions in sand pump dredges. The rotor made of eutectic high-chromium cast iron (2.4% C; 33.9% Cr; 1.7% Ni; 1.24% Si; 1.21% Cu; 0.43% Mn). Stream and water with about 20% quartz sand produce abrasive wear of rotor blades across the surface of the blades. The abrasive wear produces shavings of alloying ferrite and fatigue cracking and crumble out  $M_7C_3$  type carbides.**