

Jacek CABAN, Leszek GARDYŃSKI

PROBLEMY EKSPLOATACYJNE WĘZŁÓW ŁOŻYSKOWYCH TURBIN WODNYCH

Streszczenie

W artykule została zaprezentowana problematyka wykorzystania energii wodnej za pomocą maszyn przepływowych. Skoncentrowano się na problemach eksploatacyjnych elektrowni wodnych wykorzystywanych w regionie Lubelszczyzny. Przedstawiono rozwiązania różnych typów materiałów używanych na łożyska ślizgowe turbin wodnych. Zwrócono uwagę na mechanizmy zużycia elementów węzłów łożyskowych turbin na przykładzie turbiny Kaplana. Uszeregowano efektywność i trwałość eksploatacyjną dostępnych materiałów ślizgowych w elektrowniach wodnych.

WSTĘP

Jednym z najważniejszych sposobów ochrony środowiska jest stopniowe wprowadzanie w przemyśle energooszczędnych technologii, a w energetyce w miejsce konwencjonalnych źródeł energii – energii odnawialnych [12]. Źródłem energii wodnej jest energia słoneczna [13]. Pod wpływem ciepła słonecznego woda na kuli ziemskiej znajduje się w ciągłym ruchu; woda wyparowana z powierzchni wód, z powierzchni ziemi i z roślin dostaje się do atmosfery [13]. Najważniejsza z punktu widzenia użytkowania energii wodnej jest znajomość hydrologii rzek. Teoretyczne zasoby energii wodnej w Polsce – w zależności od przyjętej metody szacunku – ocenia się na: 23000-25000 GWh/a [8]. Urządzeniem, które przetwarza energię wody w energię elektryczną jest turbina, zainstalowana w elektrowni wodnej. Turbina jest silnikiem wodnym zamieniającym energię kinetyczną lub potencjalną wody w pracę użyteczną [12]. Określenie turbozespół wodny obejmuje całość urządzenia służącego do przemiany hydraulicznej energii wody [9].

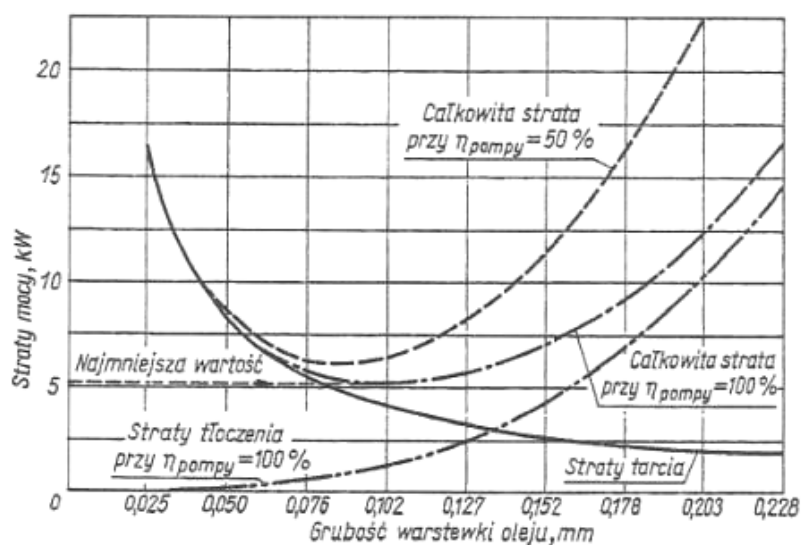
1. PROBLEMY EKSPLOATACYJNE MASZYN WIRNIKOWYCH

Jednym z ważniejszych i trudniejszych problemów konstrukcyjnych w wirnikowych maszynach przepływowych jest zredukowanie do minimum strat, wynikających z przecieku płynu przez szczeliny między częściami wirującymi i nieruchomymi. Naczelną zasadą jest taki dobór luzów oraz konstrukcji i technologii urządzeń uszczelniających, aby nie stanowiły one ograniczenia niezawodności i bezpieczeństwa pracy maszyny [4]. Zużycie elementów turbin wodnych powodowane jest narastającymi uszkodzeniami typu kawitacyjnego lub erozyjnego wskutek działania piasku i powstawania szczelin (pęknięć) [11]. Proces zużywania erozyjnego jest powodowany oddziaływaniem ciał stałych, ciekłych lub gazowych uderzających w powierzchnię rozważanego materiału [6]. Erozję powodują krople wody i uwolnione cząst-

ki stałych produktów korozji [2, 6]. Bezpośrednią przyczyną występowania zjawiska kawitacji jest stosowanie coraz większych prędkości przepływu cieczy [19]. Zniszczenie materiału spowodowane obciążeniami kawitacyjnymi nosi nazwę erozji kawitacyjnej [18]. Erozja kawitacyjna może powodować obniżenie sprawności oraz poważne awarie maszyn i urządzeń pracujących w warunkach kawitacji, a także może być przyczyną skrócenia okresów pomiędzy remontami [20].

2. ZADANIA ŁOŻYSK TURBIN WODNYCH I PRZYKŁADY KONSTRUKCJI

Łożyska turbin wodnych powinny być projektowane z dużym zapasem wytrzymałości, a systemy ich smarowania niezawodne [11]. Prawidłowo zaprojektowane łożysko powinno poprawnie pracować ponad 20 lat bez remontu [11]. Łożysko promieniowe dominujące w starszych typach turbin Francisa, jest łożyskiem prowadzącym wał turbiny możliwie blisko wirnika. Jest ono konstrukcyjnie związane z uszczelnieniem. Jego zadaniem jest nie dopuszczenie do nadmiernych przecieków wody pomiędzy obracającym się wałem, a pokrywą turbiny. Łożysko wzdłużne natomiast ma za zadanie przejmowanie sił osiowych turbozespołu spowodowanych ciężarem części wirującej i naporem hydraulicznym [9]. Jego unikalną zaletą jest to, że opory tarcia są bardzo małe także przy rozruchu nieruchomych współpracujących elementów urządzeń [5], jak wały turbiny. Na rysunku 1, przedstawiono przykłady zależności strat mocy od grubości warstwy cieczy dla łożyska turbo-prądnicy [5].



Rys. 1. Zależność strat tarcia i tłoczenia cieczy w łożysku ślizgowym wzdłużnym [5]

Pierwsze łożyska turbin wodnych były wykonane jako babbittowe poprzeczne smarowane olejem. Właściwości ślizgowe babbittów są najlepsze spośród wszystkich materiałów ślizgowych jednak zależą od grubości warstwy [1]. W niektórych rozwiązaniach zastąpiono je łożyskami z ogumionymi panewkami smarowanymi wodą. Pozwoliło to znacznie uprościć konstrukcję łożyska, zbliżyć je do wirnika i tym samym stworzyć bardziej dogodne warunki pracy turbiny [11]. Kolejną zmianą było wprowadzenie lignofolu na tuleje kierownicze. Spowodowało to mniejsze wykorzystanie brązu. W przypadku, kiedy woda zawiera zanieczyszczenia w postaci mułu i piasku, panewki łopatek kierowniczych oraz zewnętrznych układów regulacyjnych są wykonywane w dalszym ciągu z brązu [11]. W późniejszych rozwiązaniach konstrukcyjnych stosowano w łożyskach tuleje pracujące na sucho z materiałów typu PTFE (Polytetrafluoroetylen). Znane pod takimi nazwami handlowymi jak; „Fluon”, „Teflon”, „Glacier” i inne. Rozwój łożysk ślizgowych smarowanych wodą jest szczególnie intensywny w energetyce wodnej oraz okrętownictwie, czyli tam gdzie dotychczas stosowane tradycyjne

łożyska ślizgowe smarowane olejem stanowią potencjalne zagrożenie dla środowiska [14]. Tworzywa polimerowe są bardzo szeroko stosowane w budowie wszelkich środków transportu [3] i budowie maszyn. Guma jest również materiałem stosowanym do produkcji panwi łożyska. Łożysko gumowe nie może pracować bez smarowania nawet przez krótki czas, dlatego zasilanie łożyska w wodę powinno być bezwarunkowo pewne [7]. Dla zapewnienia tego warunku stosuje się niezależne smarowanie z komory i wodociągu elektrowni. Autorzy w pracy [15, 16] zaproponowali rozwiązanie ekologicznego łożyska foliowego smarowanego wodą, z wykorzystaniem folii opracowanych w Politechnice Gdańskiej. Innym rozwiązaniem jest opiniowane przez jednego z autorów [2, 3] rozwiązanie, polegające na zastosowaniu poliamidu z olejem. Tego typu materiały ślizgowe posiadają dobrą odporność na zużycie oraz stosunkowo niewielki współczynnik tarcia [1]. Więcej na temat rodzajów łożysk można znaleźć w poradniku [7].

Omawiane łożyska ślizgowe pracują w środowisku wodnym, co sprzyja korozji i wymaga od zastosowanych materiałów odpowiednich właściwości w zakresie odporności na to zjawisko. Ponadto przepływająca przez turbinę woda bierze częściowo udział w procesie smarowania jej łożysk, a w przypadku obecności zanieczyszczeń może dodatkowo intensyfikować proces zużycia. Tradycyjnym, od wielu lat stosowanym materiałem na panewki łożysk turbin wodnych było tworzywo lignofol będące wg [1, 22]: materiałem drzewnym warstwowym prasowanym na gorąco pod wysokim ciśnieniem z forniru drzewnego (buk, brzoza) o grubości 0,8 mm, 0,6 mm lub 0,5 mm i specjalnych żywic fenolowych. We wstępnej fazie produkcji arkusze fornirów nasączane są żywicą, która przenika do struktury komórkowej drewna. Następnie w fazie prasowania w wysokiej temperaturze następuje utwardzenie żywicy w strukturze drewna. Dzięki temu otrzymany materiał ma znacznie wyższe właściwości fizyczne i mechaniczne niż drewno wyjściowe. Jest to specjalne tworzywo drzewne o bardzo wyjątkowych właściwościach mechanicznych i użytkowych. Bardzo twardy i trwały, z tego względu nazywany bywa „drewnem pancernym”. Stosowany jest tam, gdzie wymagana jest odporność na trudne warunki eksploatacyjne: od kół zębatych przekładni, poprzez rolki podajników przemysłowych, białe obrabiarek do drewna, aż do tak wymagających zastosowań jak podłogi bolidów „Formuły 1”. Wyjątkowy skład lignofolu zapewnia również ochronę przed promieniowaniem, co jest wykorzystywane w niektórych zastosowaniach medycznych i wojskowych. Lignofol samosmarowy jest to tworzywo drzewne otrzymywane przez sklejenie na gorąco pod wysokim ciśnieniem fornirów z drewna bukowego o grubości 0,6 mm powlekanych emulsją składającą się z żywicy fenolowej, oleju maszynowego i grafitu. Dodanie oleju i grafitu pozwala stosować go w sytuacjach wymagających ograniczenia tarcia, na przykład na panewki wałów maszyn. Również w przypadku lignofolu samosmarownego produkowany jest w dwóch odmianach: o budowie krzyżowej i o budowie równoległej wzmocnionej. Nie jest on jednak pozbawiony wad. Głównym problemem jest jego nasiąkliwość i chłonność wody co stwarzało w przeszłości poważne problemy we właściwym funkcjonowaniu turbin.

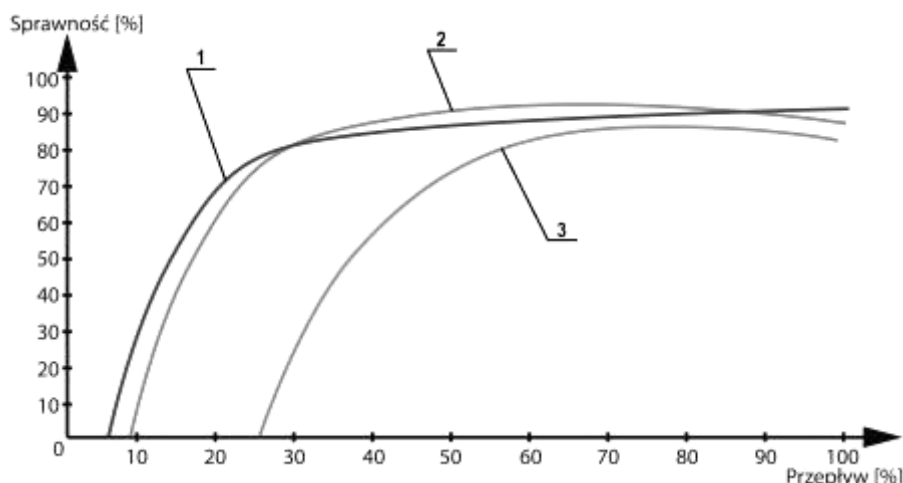
Proponowany materiał BORAMID to jeden z rodzajów poliamidu (PA 6), dodatkowo Boramid 6-G.S.O. Symbol wg ISO 1043: PA 6 G.S.O. jest odlewany z dodatkiem oleju mineralnego i ten właśnie materiał proponowany jest w omawianym projekcie do łożyskowania turbin wodnych. Do podstawowych właściwości Boramidu należą [23]:

- wysoka sztywność i twardość,
- dobra odporność na uderzenia, nawet w niskich temperaturach,
- niski współczynnik tarcia – dla odmian modyfikowanych,
- dobra skrawalność,
- dobra odporność na ścieranie,
- wysoka zdolność tłumienia drgań,
- wysoka wytrzymałość zmęczeniowa.

Typowe zastosowania Boramidu to:

- rolki transportujące i napinające,
- koła zębate, koła pasowe i łańcuchowe,
- prowadnice i krzywki,
- ślimaki i gwiazdy podziałowe,
- podkładki i dystanse,
- panewki i łożyska ślizgowe,
- ślizgi,
- płaszcze krążników.

Boramid 6-G.S.O. to pierwszy samosmarowny poliamid, w skład którego wchodzi olej mineralny. Dodatek substancji smarującej wpłynął na ponad pięciokrotne wydłużenie pracy części mechanicznych wykonanych z BORAMIDU 6-G.S.O. w porównaniu do materiału naturalnego i ok. dwudziestopięciokrotne w stosunku do brązu fosforowego. W tworzywie BORAMID 6-G.S.O. zastosowano zielony barwnik, przez co materiał jest bardzo dobrze rozpoznawalny wśród całej gamy wyrobów NYLONBORU. Istotą tego odlewu jest zawarty w całej objętości dodatek samosmarowny, który powoduje obniżenie współczynnika tarcia do 0,14. Olej wypełnia całą objętość tworzywa, nie wysycha, nie wysącza się i nie wymaga uzupełniania. Substancje smarujące umożliwiają stosowanie BORAMIDU 6-G.S.O. w elementach przekładni mechanicznych, urządzeniach ślizgowych, łożyskach, prowadnicach oraz kołach łańcuchowych.



Rys. 2. Wykres sprawności poszczególnych turbin: 1 – ślimakowej Archimedesesa, 2 – Kaplana, 3 – Francisa [21]

W małej energetyce wodnej (MEW) coraz częściej, również w Polsce buduje się elektrownie oparte o turbiny śrubowe Archimedesesa. Jest to prosta maszyna fizyczna o stałym kącie pochylenia 22° względem poziomu lustra wody. Śruba Archimedesesa korzysta z energii kinetycznej płynącej wody, zazwyczaj dostarczanej przez rzekę, a nawet mały strumień [21]. Jej prostota i niezawodność jest bezkonkurencyjna, główne elementy to ułożyskowany wirnik umieszczony w rynn timer. Wirnik połączony jest za pomocą przekładni z generatorem asynchronicznym – typowym generatorem stosowanym w MEW [21], o niskich prędkościach obrotowych $500 \div 700$ obr/min.

3. BADANIA ZUŻYTEGO WĘZŁA ŁOŻYSKOWEGO TURBINY

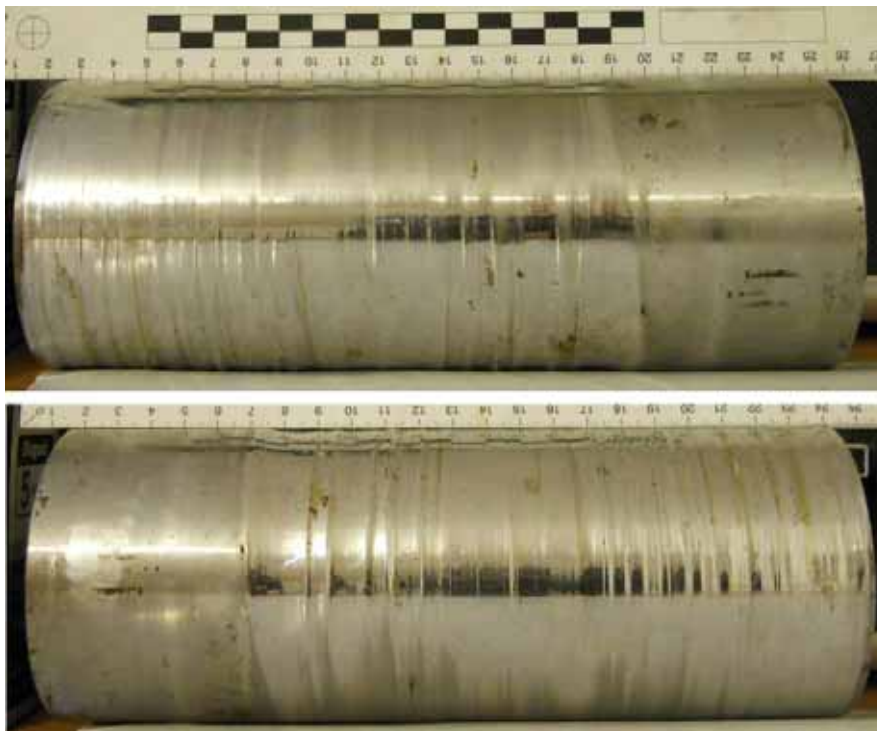
Badaniu poddano zużytą nakładkę na czop łożyskowy wału turbiny wodnej Kaplana z łożyskowaniem dolnym pod wirnikiem. Stanowi ją tuleja o średnicy zewnętrznej ok. 86,5 mm,

średnicy wewnętrznej 75 mm (grubość pierwotna ścianki ok. 5,5 mm). Długość całkowita ok. 222 mm, długość części czynnej ok. 165 mm.

Cześć robocza wytarta niesymetrycznie w postaci obwodowych wgłębień – zużycie po jednej stronie wzdłuż tworzącej praktycznie nie występuje, maksymalne po przeciwnej stronie wynosi do 0,8 mm na promieniu.

Tuleja była zastosowana jako nakładka na wał turbiny wodnej, w miejscu współpracy z gumową tuleją ślizgową. Węzeł łożyskowy smarowano wodą. Przyczyną nierównomiernego zużycia było prawdopodobnie skrzywienie lub niewyważenie wału. Należy zwrócić uwagę, że omawiana maszyna nie jest nową konstrukcją lecz jak większość tego typu urządzeń w rejonie Lubelszczyzny, są to odzyskane, regenerowane bądź częściowo remontowane maszyny z pierwszej połowy XX w. Mają za sobą kilkadziesiąt lat pracy, dlatego ich węzły łożyskowe są narażone na duże obciążenia, co w efekcie skraca znacznie ich czas eksploatacji. Łatwiej i taniej jest wymieniać częściej zespół łożyskowy niż zregenerować wał turbiny najważniejszy element konstrukcji.

Materiał tulei – stal nierdzewna, ferromagnetyczna. Twardość powierzchni zawiera się w przedziale 20÷35 HRC, co świadczy o nieprawidłowej obróbce cieplnej – niedostateczne i nierównomierne zahartowanie, być może wynikające z niewłaściwie dobranego gatunku stali. W celu ustalenia dokładnego składu chemicznego materiału tulei należy dokonać analizy staloskopowej. Następnie na tej podstawie możliwa jest ocena właściwości i warunków obróbki cieplnej, dla poprawy wytrzymałości na ścieranie tulei łożyskowej. Na rys. 3 przedstawiono różnice w stopniu zużycia powierzchni wzdłuż tworzącej po dwu stronach czopa. Jak wspomniano we wstępie trwałość węzłów łożyskowych nowo projektowanych elektrowni wodnych powinna wynosić ok 20 lat. W analizowanym przypadku łożysko pracowało przez okres 7 lat. Na rysunku 4. zaprezentowano zregenerowaną tuleję ślizgową. Po prawej stronie widoczna jest nawulkanizowana warstwa nośna z twardej gumy.



Rys. 3. Zużyta powierzchnia współpracy tulei stalowej z gumową tuleją ślizgową



Rys. 4. Zregenerowana tuleja ślizgowa.

PODSUMOWANIE

Każda elektrownia wodna jest projektowana indywidualnie ze ścisłym dopasowaniem do warunków miejscowych. Decydującymi kryteriami wyboru rozwiązania jest minimalizacja koszty budowy, krótki czas realizacji oraz możliwe jak największe wykorzystanie przepływów rzeki [17]. Na niskich spadach doskonale sprawdzają się turbiny Kaplana, śruby Archimedesesa, turbiny Banki-Michella oraz tzw. turbiny lewarowe.

Charakterystyczne właściwości turbin, sposób ułożyskowania dolnego nad lub pod wirnikiem, predysponują je do zastosowania określonego rodzaju łożysk. Takie same skojarzenie dwóch tworzyw trących może dawać zupełnie inny obraz ścierania w zależności od prędkości ruchu względnego powierzchni trących, temperatury, sposobu usuwania tworzywa sztucznego, występujących równocześnie drgań itd. [10]. Trwałość węzłów łożyskowych jest głównym czynnikiem decydującym o konieczności wykonywania remontów. Te z kolei są trudne i kosztochłonne oraz wymagają wyłączenia turbiny z pracy.

Na trwałość węzłów łożyskowych wpływa wiele czynników, takich jak zastosowane materiały, konstrukcja, sposób smarowania i jakość wykonania. Praktyka eksploatacyjna pozwala uszeregować łożyska ze względu na materiał: łożyska niskospadowe smarowane kropelkowo z uszczelnieniem bez dławicy (materiały stalowe), z twardej gumy, lignofolu oraz poliamidy i tworzywa sztuczne.

EXPLOATIONAL PROBLEMS OF KNOTS OF BEARING WATER TURBINES

Abstract

The problems of utilization for help of through machine engines the water energy in article was presented. The used in region of Lublin was concentrated on problems of exploitation water power stations. Presents the solution of various types of materials used for water turbine bearings. The attention was turned on mechanisms of waste of units knots bearing turbines on example of the Kaplan turbine. Ranked the efficiency and service life of sliding materials available in hydroelectric power stations.

BIBLIOGRAFIA

1. Czerniec M.: *Wytrzymałość stykowo-tarciowa oraz trwałość systemów tribotechnicznych ślizgowych*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
2. Gardyński L., Ignaciuk P.: *Uszkodzenia kawitacyjne tulei cylindrowych w silniku 359M*. Journal of KONES'97, Bielsko-Biała, 1997.

3. Gardyński L., Krzyżak A.: *Ocena wpływu oleju napędowego oraz paliwa roślinnego na zużycie tribologiczne wybranych tworzyw polimerowych*. Motrol tom 11C, Lublin, 2009.
4. Gundlach W., R.: *Podstawy maszyn przepływowych i ich systemów energetycznych*. WNT, Warszawa, 2008.
5. Hebda M.: *Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji PIB, Warszawa-Radom 2007.
6. Hejwowski T.: *Studium procesów zużywania erozyjnego, ściernego i zmęczenia cieplnego elementów maszyn oraz kształtowanie struktur o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych*. Wydawnictwa Uczelniane, Lublin, 2003.
7. Hoffmann M.: *Małe elektrownie wodne, poradnik*. Nebda sp. z o.o. Warszawa, 1992.
8. Iwan J.: *Studium badawczo-rozwojowe problemów turbin wodnych małej energetyki*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2006.
9. Jackowski K.: *Elektrownie wodne, turbozespoły i wyposażenie*. WNT, Warszawa 1971.
10. Kłonica M., Gardyński L.: *Ocena przebiegu samochodu osobowego na podstawie zużycia elementów wykonanych z tworzywa sztucznego*. Postęp w Technikach Wytwarzania i Konstrukcji Maszyn. LTN, Lublin, 2005.
11. Krzyżanowski W.: *Turbiny wodne konstrukcja i zasady regulacji*. WNT, Warszawa, 1971.
12. Lewandowski W.M.: *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. WNT, Warszawa, 2007.
13. Michałowski S., Plutecki J.: *Energetyka wodna*. WNT, Warszawa 1975.
14. Neuman A., Olszewski A., Wasilczuk M.: *Łożyska ślizgowe smarowane wodą*. Tribologia, 2005, nr 4.
15. Olszewski A.: *Tilting pad journal bearing with ceramic coating*. Automotive and Industrial Lubrication, 15th International Colloquium Tribology, Stuttgart/Ostfildern, Germany, January 17-19, 2006.
16. Olszewski A., Wodtke M., Hryniewicz P.: *Ekologiczne łożysko foliowe smarowane wodą – budowa i analiza wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na sztywność podparcia łożyska*. Projekt badawczy. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2008.
17. Przekwas M.: *Efekty gospodarcze elektrowni wodnych i przykłady modernizacji obiektów istniejących*. Małe Elektrownie Wodne, 1995, nr 2.
18. Rafalski K., Szala M.: *Erozja kawitacyjna wybranych materiałów konstrukcyjnych*. II Lubelski Kongres Studenckich Kół Naukowych TYGIEL 2010, pod red. J. Cabana i M. Szali, Politechnika Lubelska, Lublin, 2010.
19. Szkodo M.: *Erozja kawitacyjna materiałów konstrukcyjnych metalowych*. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2008.
20. Szkodo M.: *Ocena odporności kawitacyjnej stali obrabianych laserowo*. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2004.
21. <http://dobraenergia.info/page8.php> wrzesień 2011.
22. <http://www.kornix.com.pl/pl/sklejka/lignofol> wrzesień 2011.
23. http://www.nylonbor.pl/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=2&Itemid=37 wrzesień 2011.

Autorzy:

mgr inż. Jacek Caban – Politechnika Lubelska

dr inż. Leszek Gardyński – Politechnika Lubelska