

INVESTIGATION OF SUBSURFACE MICROCRACKS CAUSING PREMATURE FAILURE IN WIND TURBINE GEARBOX BEARINGS

ABSTRACT

One reason behind the low rate of expansion of power production driven by wind is the premature failure of the Wind Turbine Gearbox Bearings (WTGBs). Unfortunately, the bearings fail within the first quarter of their designed life due to the unusual impacts they are subjected to in the production and operation processes. Despite the massive studies on fatigue damage in wind turbine gearbox bearings, their leading causes of failure remain unclear. The damage initiates as subsurface microcracks, then propagates to a macro scale and reaches the contact surface causing premature failure. Accordingly, by applying a set of experimental and simulation investigations, this research studies the microcracks in the early initiation stage (of lengths up to 15 μm) that significantly affect the bearing damage trigger.

The experimental investigations were performed on damaged samples referring to a failed inner race of a Double Roller Cylindrical Bearing (DRCB) taken from a planetary gearbox of a 2 MW wind turbine. The overall detected cracks (1,447) were classified based on their lengths, depths, inclinations, and whether or not they were associated with non-metallic inclusions (NMIs). To study the effect of the NMI's size on the occurrence of bearing damage, the aspect ratios of the cracked NMIs' were categorized into three levels: (1-2), (2-3), and greater than 3.

The behavior of NMIs regarding crack initiation has been studied in terms of the following indicators: subsurface stress distribution, the percentage of cracks associated with them, and the frequency of their aspect ratio. A Finite Element Analysis (FEA) was also conducted in this study to determine the stress concentration at the inclusion tips, which was found to be around 250 MPa, confirming that NMIs have a role in the bearings' damage. The statistical results showed that only about 15% of the overall investigated cracks were not associated with inclusions. As well, the most cracked inclusions were observed with low aspect ratios (1-2). The two later results underestimate the role of the NMIs and their sizes in crack initiation. The microscopic investigations showed that the bearing steel matrix was saturated with hard carbide particles, which may compress voids (as they are soft objects), especially the contiguous ones and lead to initiating microcracks. The absence of WEAs and WECs has been reported, which may suggest that the carbide dissolution follows crack initiation rather than precedes it. The following parameters: maximum shear stress (τ_{max}), Von-Mises stress (σ_{VM}), and traction force were evaluated using the profiles of cracks' inclinations and cracks' densities with increasing the depth below the contact surface. It has been observed that the subsurface small microcracks (1-15 μm) tend to have an inclination angle of 45° with the tangent to the contact surface. This indicates the impact of maximum shear stress in the crack initiation. In contrast, the observation of crack inclinations exceeding 90° may indicate the probability of torque reversal due to harsh operating conditions in their initiation. The Hertzian contact model was introduced to simulate the increase in the traction force caused by the effect of the operating conditions. The simulated coefficient of friction (μ) is assumed

to be (0.15) instead of the standard value (0.05). The results demonstrate that the maximum shear stress becomes shallower ahead of the rolling direction (RD) with increasing the traction force. The similarity between presenting the two profiles (σ_{VM} vs. depths) and (number of cracks vs. depths) also confirms the effect of Von-Mises stresses on the cracks' initiation.

The premature bearing failure may be caused by the inappropriate bearing type selection used in the wind turbine gearbox (WTG). As a result, the multiple criteria decision-making approach was applied using the Analytical Hierarchy Process (AHP) tool - Expert Choice software (EC). The main differentiation criteria are cost, durability, reliability, feature design, and availability. It has been concluded that single-row tapered roller bearing is the superior option compared to single-row and double-row cylindrical bearings in wind turbine gearboxes.

In general, the obtained results provided several specific recommendations for improving the following processes associated with WTGBs: designing, manufacturing, operation, monitoring, and maintenance.

BADANIE PODPOWIERZCHNIOWYCH MIKROPEKNIĘĆ POWODUJĄCYCH PRZEDWCZESNE AWARIE ŁOŻYSK PRZEKŁADNI TURBIN WIATROWYCH

STRESZCZENIE

Jednym z powodów niskiego tempa rozwoju produkcji energii napędzanej przez wiatr jest przedwczesna awaria łożysk przekładni turbiny wiatrowej (WTGB). Niestety, łożyska ulegają uszkodzeniu w ciągu pierwszej jednej czwartej ich projektowanej żywotności z powodu nietypowych oddziaływań, którym są poddawane w procesach produkcyjnych i eksploatacyjnych. Pomimo szeroko zakrojonych badań nad uszkodzeniami zmęczeniowymi łożysk przekładni turbin wiatrowych, główne przyczyny ich awarii pozostają niejasne. Uszkodzenie rozpoczyna się jako mikropęknięcie podpowierzchniowe, następnie rozprzestrzenia się w skali makro i dociera do powierzchni styku, powodując przedwczesne uszkodzenie. W związku z tym, stosując zestaw badań eksperymentalnych i symulacyjnych, w ramach niniejszej pracy wykonano badania mikropęknięć we wczesnej fazie inicjacji (o długości do 15 μm), które znacząco wpływają na inicjację uszkodzenia całego łożyska.

Badania eksperymentalne wykonano na wyłączonych z eksploatacji próbkach o uszkodzonej bieżni wewnętrznej łożysk walcowych podwójnych wałeczkowych (DRCB) pobranych z przekładni planetarnych turbin wiatrowych o mocy 2 MW. Łącznie wykryte pęknięcia (1447) zostały sklasyfikowane na podstawie ich długości, głębokości, nachylenia oraz tego, czy były one wzajemnie związane (NMI - Non-metalic Inclusions – wtrącenia niemetaliczne). Aby zbadać wpływ wymiarów NMI na występowanie uszkodzeń łożysk, współczynniki kształtu pęknięć z wtrąceniami niemetalicznymi NMI podzielono na trzy poziomy: (1-2), (2-3) i większe niż 3.

Zachowanie NMI w zakresie inicjacji pęknięć zbadano pod kątem następujących wskaźników: rozkładu naprężeń podpowierzchniowych, procentowego udziału pęknięć z nimi związanych oraz częstości ich wydłużenia. W ramach rozprawy wykonano również analizę metodą elementów skończonych (FEA), aby określić koncentrację naprężeń na końcach wtrąceń. Otrzymane wyniki - około 250 MPa, potwierdzają rolę NMI w uszkodzeniu łożysk. Analiza statystyczna wykazała, że tylko około 15% ogółu zbadanych pęknięć nie było związanych z wtrąceniami. Największe pęknięcia zaobserwowano przy małych współczynnikach kształtu (1-2). Dla dwóch pozostałych poziomów kształtu pęknięć rola wtrąceń niemetalicznych jest zdecydowanie mniejsza, jeżeli chodzi o inicjację pęknięć. Badania mikroskopowe wykazały, że osnowa stali łożyskowej była nasycona cząstkami twardych węglików, które mogą ścisnąć wolne przestrzenie (jako, że są to obiekty miękkie), zwłaszcza przylegające i prowadzić do inicjujących mikropęknięć. Stwierdzono brak tzw. białych obszarów po wytrawieniu i tzw. białych pęknięć po wytrawieniu, co może sugerować, że rozpuszczanie węglików następuje raczej po inicjacji pęknięcia, niż przed nią. Parametry: maksymalnego naprężenia ścinającego (τ_{max}), naprężenia Von-Misesa (σ_{VM}) oraz siły rozciągającej oceniono za pomocą profili nachylenia pęknięć i gęstości pęknięć wraz ze wzrostem głębokości pod powierzchnią styku. Zaobserwowano, że podpowierzchniowe małe mikropęknięcia (1-15 μm) mają tendencję do nachylenia pod kątem 45° do stycznej do powierzchni styku. Wskazuje to na wpływ maksymalnego naprężenia ścinającego na inicjację pęknięcia. Natomiast obserwacja nachylenia pęknięć przekraczającego 90° może wskazywać na prawdopodobieństwo odwrócenia momentu obrotowego na skutek trudnych warunków pracy w ich inicjacji. Model styku Hertza został wprowadzony w celu symulacji wzrostu siły trakcyjnej spowodowanego wpływem warunków pracy. Zakłada się, że symulowany współczynnik tarcia (μ) wynosi (0,15), zamiast wartości standardowej (0,05). Wyniki pokazują, że maksymalne naprężenie ścinające staje się płytsze przed kierunkiem toczenia (RD) wraz ze wzrostem siły pociągowej. Podobieństwo między przedstawieniem obu profili (σ_{VM} vs. głębokości) i (liczba pęknięć vs. głębokości) również potwierdza wpływ naprężeń Von-Misesa na inicjację pęknięć.

Przedwczesna awaria łożyska może być spowodowana niewłaściwym doбором typu łożyska zastosowanego w przekładni turbiny wiatrowej (WTG). W rezultacie zastosowano wielokryterialne podejście decyzyjne z wykorzystaniem narzędzia Analytical Hierarchy Process (AHP) – oprogramowania Expert Choice (EC). Główne kryteria różnicowania to koszt, trwałość, niezawodność, projekt funkcji i dostępność. Stwierdzono, że jednorzędowe łożysko stożkowe jest lepszą opcją w porównaniu z jednorzędowymi i dwurzędowymi łożyskami walcowymi w przekładniach turbin wiatrowych.

Ogólnie rzecz biorąc, uzyskane wyniki dostarczyły konkretnych zaleceń dotyczących usprawnienia następujących procesów związanych z WTGB: projektowanie, wytwarzanie, eksploatacja, monitorowanie i konserwacja.