

Koszalin, dnia 06.07.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Leon Kukielka
Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny
ul. Raławicka 15/17
75-620 Koszalin

WPŁYNEŁO DNIA	
.....14.....07.....2023..... data	
nr pisma	podpis

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Tahseen Ali MANKHI**

pt.: *Badanie mikropęknięć podpowierzchniowych powodujących przedwczesne awarie łożysk przekładni turbin wiatrowych*

(Investigation of subsurface microcracks causing premature failure in wind turbine gearbox bearings)

Promotor rozprawy doktorskiej: **Prof. dr hab. inż. dr H.C. Stanisław LEGUTKO**

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej: **Dr Jasim H. AL-Bedhany**

Podstawa opracowania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej z dnia 04.05.2023 r. Pana dr hab. inż. Olaf CISZAK, prof. PP.

1. Przedmiot recenzji

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Tahseen Ali MANKHI, o łącznej objętości 184 stron, składa się z 6 rozdziałów i zawiera 97 rysunków, 7 tabel i 24 załączniki. W załącznikach przedstawiono obszerny materiał, w którym pokazano schemat kinematyczny przekładni planetarnej siłowni wiatrowej z lokalizacją typowych łożysk tocznych (A1), z podaniem typów łożysk i ich charakterystyk (A2), materiałów stosowanych na łożyska (B1), warunki badań łożysk kulkowych (C1) i wałeczkowych (C2), wyniki testów zmęczeniowych łożysk z wtrąceniami kątowym (D1) i sferycznymi (D2), skład chemiczny i właściwości wtrąceń niemetalicznych (E1) oraz 17 rodzajów uszkodzeń łożysk (F1÷F16). Ponadto, na początku rozprawy zamieszczono *Streszczenie, wykaz publikacji i konferencji, Wykaz oznaczeń i Wykaz skrótów, Spis treści, Spis rysunków i Spis tabel* a w końcowej części pracy *Spis literatury*, obejmujący aż 268 pozycji obcojęzycznych, wśród których są publikacje źródłowe, książki, monografie, rozprawy, artykuły opublikowane w czasopiśmie naukowych i naukowo-technicznych, referaty zamieszczone w materiałach konferencyjnych oraz 2 normy ISO i 5 stron internetowych. W spisie literatury, są dwie współautorskie publikacje z udziałem Doktoranta.

2. Tematyka rozprawy

Wzrastające zapotrzebowanie na energię elektryczną i związany z tym wzrost zanieczyszczenia środowiska przy zastosowaniu konwencjonalnych metod jej wytwarzania oraz wyczerpywanie

się ich zasobów powoduje, że wzrasta również zapotrzebowanie na wytwarzanie energii metodami ekologicznymi, na przykład poprzez wykorzystanie energii odnawialnej. Wśród tych metod jest również wykorzystanie energii wiatru w siłowniach wiatrowych, montowanych zarówno na lądzie jak i na morzu. Budowanie siłowni wiatrowych jest uzasadnione ekonomicznie (następuje najszybszy zwrot inwestycji), ponadto emisja CO₂ w przypadku turbin wiatrowych jest najniższa w porównaniu z innymi technologiami wytwarzania energii, np. fotowoltaiką, elektrowniami wodnymi czy siłowniami jądrowe. W ostatnich latach energetyka wiatrowa jest najszybciej rozwijającą się gałęzią energetyki. Średni roczny wzrost energii uzyskiwanej z wiatru w dekadzie 2000÷2010 w Stanach Zjednoczonych wyniósł ponad 30%, w Europie 20%. Również w Polsce obserwuje się szybki wzrost mocy zainstalowanej.

Jednym z ważnych problemów w budowie siłowni wiatrowych jest zapewnienie ich wysokiej trwałości oraz niezawodności w okresie eksploatacji. Liczne badania wskazują jednak, że rzeczywista trwałość siłowni jest znacznie mniejsza od trwałości znamionowej. Z analizy danych wynika, że mimo iż najczęściej awarii przypada na podzespoły systemu elektrycznego, to za największy czas przestojów odpowiada przekładnia planetarna. Dlatego zdiagnozowanie przyczyn awarii przekładni i ich wyeliminowanie jest jednym z najistotniejszych elementów zwiększenia dyspozycyjności turbin wiatrowych. Według Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnej (NREL) wynika, że aż 76% awarii przekładni turbin wiatrowych jest spowodowane awarią ich łożysk. Pozostałe przyczyny to awaria kół zębatych (17%) i pozostałe (7%). Przy czym rzeczywista trwałość łożysk wynosi 1÷5 lat, natomiast trwałość znamionowa łożyska wynosi aż 20 lat.

W literaturze opisywane są różne przyczyny przedwczesnego zużycia łożysk tocznych których jest wiele. Są to np. pęknięcie i łuszczenie wywołane wadami mikrostruktury (wtrącenia niemetaliczne, pustki i węgliki) lub wady powierzchni styku (wżery, wgniecenia mechaniczne i chropowatość). Mogą to być również zjawiska zachodzące pod powierzchnią kontaktu bieżni łożyska z elementami tocznymi (kulki lub rolki), których nie można obserwować. W tym przypadku również przyczyną inkubacji i propagacji mikropęknięć podpowierzchniowych jest zbyt duże obciążenie łożyska w trakcie eksploatacji wywołujące lokalny stan naprężeń w warstwie wierzchniej, który przekracza granicę wytrzymałości materiału bieżni łożyska. Mikropęknięcia są również wywoływane przez lokalne umocnienie (warstwa biała) oraz przez obce wtrącenia (np. węgliki, azotki), które są wprowadzane do osnowy łożyska już na etapie jego wytwarzania. Przedwczesne zużycie łożysk może być również spowodowane niewłaściwym jego smarowaniem. Pomimo, że istnieje już bardzo bogata literatura na temat zmęczeniowego zużycia tocznego łożysk to nadal brak jest jednoznacznego wyjaśnienia przyczyn powstawania poszczególnych rodzajów zużycia oraz przewidywanie żywotności łożysk w złożonych warunkach eksploatacyjnych siłowni wiatrowych.

Dlatego też w pracy skupiono się na badaniu metodami symulacyjnymi i eksperymentalnymi stanów naprężeń w warstwie wierzchniej, wywołanych cyklicznymi obciążeniami eksploatacyjnymi, np. nagłe obciążenia i odciążenia mogą być przyczyną poślizgów elementów tocznych, co prowadzi do nietypowych form uszkodzeń łożysk. Przekroczenie naprężeń dopuszczalnych, dla danego rodzaju materiału i jego stanu, może być jedną z głównych przyczyn inicjacji mikropęknięć podpowierzchniowych a następnie ich propagacji i łączenia się (poziom makro), docierając aż do powierzchni styku, powodując wykruszanie i złuszczenie a następnie zniszczenie łożyska.

Zatem rozprawa doktorska mgr inż. Tahseen Ali MANKHI dotyczy bardzo aktualnych zagadnień dotyczących konstrukcji siłowni wiatrowych i ich eksploatacji, w których występują złożone, o stochastycznym charakterze zjawiska zużycia łożysk występujących w przekładniach planetarnych (zwiększających obroty), a ich wyjaśnienie na drodze analizy teoretycznej,

ze względu na bardzo dużą liczbę czynników, jest obecnie niemożliwe. Konieczne jest zatem podejmowanie bardzo złożonych i kompleksowych prac badawczych eksperymentalnych i numerycznych, których efektem będzie wyjaśnienie zjawisk fizycznych występujących w procesie eksploatacji łożysk tocznych, w celu zapewnienia wymaganej trwałości łożysk, a zatem trwałości i niezawodności siłowni wiatrowych.

Według mnie, w tym aspekcie rozprawa doktorska ma charakter nowatorski. Sposób prezentacji pracy jest bardzo oryginalny i ciekawy co wynika już ze spisu treści. O ważności tematyki podjętej w rozprawie świadczą liczne najnowsze publikacje (aż 32 z okresu 2018-2022) i prace badawcze prowadzone w wielu ośrodkach naukowych w kraju i na świecie.

Uważam, że wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tahseen Ali MANKHI jest prawidłowy, a praca ma duże znaczenie poznawcze oraz aplikacyjne i jest w pełni uzasadniona.

3. Cele i zakres rozprawy

Głównym celem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tahseen Ali MANKHI jest zbadanie wpływu czynników takich jak: obciążenia eksploatacyjne, stan naprężeń oraz niejednorodność struktury metalograficznej stali łożyskowej (wtrącenia niemetaliczne, pustki i węgliki) w warstwie wierzchniej bieżni łożyska przekładni planetarnej siłowni wiatrowych na inicjację mikropęknięć zmęczeniowych w obszarze podpowierzchniowym, w aspekcie przedwczesnej awarii łożysk.

Dodatkowym celem rozprawy jest opracowanie metodyki wyboru optymalnej konstrukcji łożyska adekwatnej do rzeczywistych warunków obciążenia, która zapewni wymaganą trwałość i niezawodność turbiny wiatrowej w okresie jej eksploatacji.

Dla realizacji celów pracy opracowano również obszerny zakres rozprawy obejmujący:

1. Wyznaczenie metodami eksperymentalnymi i analizy statystycznej granicznej wartości długości mikropęknięcia podpowierzchniowego w fazie inkubacji, powyżej której następuje faza propagacji, czyli wielokierunkowe rozprzestrzenianie się pęknięć.
2. Ocena wielowskaźnikowa wpływu wtrąceń niemetalicznych (NMI) na inicjację (inkubację) mikropęknięć:
 - 2.1. Zlokalizowanie koncentracji zredukowanych naprężeń podpowierzchniowych wywołanych wtrąceniami niemetalicznymi (NMI). Analizę stanu zredukowanych naprężeń podpowierzchniowych (wartość maksymalna i rozkład) według hipotezy nieliniowej wykonano przy użyciu metody elementów skończonych (FEM).
 - 2.2. Określenie udziału procentowego mikropęknięć związanych z wtrąceniami w ogólnej liczbie zaobserwowanych pęknięć badanych próbek w celu oceny roli NMI w przedwczesnym zużyciu łożyska.
 - 2.3. Określenie wpływu współczynnika proporcji wymiarów wtrąceń niemetalicznych ($AR = \text{długość}/\text{szerokość}$) na inicjację mikropęknięć.
3. Zbadanie wpływu maksymalnego naprężenia ścinającego (τ_{\max}), siły stycznej i naprężenia zredukowanego Hubera-Misesa-Hencky'ego (H-M-H) (σ_{ZMH}) na inicjację i propagację mikropęknięć, w następujący sposób:
 - 3.1. Wpływ maksymalnego naprężenia ścinającego (τ_{\max}) w tzw. punkcie Bielajewa, przez określenie:
 - Stopnia zbieżności nachylenia pęknięć do kąta $\pm 45^\circ$,

- Rozkładu naprężenia ścinającego w funkcji głębokości na podstawie statycznej analizy kontaktowej Hertza,
 - Gęstości pęknięć (liczba pęknięć) przypadających na każde 100 μm głębokości.
- 3.2. Wpływ składowej stycznej siły obciążenia pierścienia wewnętrznego (bieżni) łożyska, przy użyciu czterech wskaźników:
- Stopnia zbieżności nachylenia pęknięć do kąta powierzchni styku (0°) w pobliżu powierzchni styku z bieżnią łożyska (pierścieniem wewnętrznym),
 - Rozkład naprężeń ścinających w funkcji głębokości (na podstawie analizy kontaktowej Hertza),
 - Rozkład naprężeń zredukowanych H-M-H (σ_{zHMH}) w funkcji głębokości dla różnych wartości siły obciążającej;
 - Rozmieszczenie mikropęknięć w głąb warstwy wierzchniej.
- 3.3. Wpływ naprężenia zredukowanego H-M-H (σ_{zHMH}), przy użyciu dwóch wskaźników:
- Rozkład naprężeń zredukowanych H-M-H w funkcji głębokości dla różnych wartości siły obciążającej,
 - Rozkład gęstość mikropęknięć na głębokości warstwy wierzchniej pierścienia.
4. Ocena wpływu białych obszarów (WEA), białych pęknięć (WEC) oraz węglików i pustek na inicjację pęknięć. W tym celu przeprowadzono analizę wyników badań mikroskopowych przy użyciu optycznego i skaningowego mikroskopu elektronowego.
5. Ocena wpływu zdarzeń operacyjnych WT na inicjację uszkodzeń poprzez analizę kąta nachylenia mikropęknięć na głębokości warstwy wierzchniej.
6. Wybór optymalnego łożyska przekładni planetarnej turbiny wiatrowej poprzez zastosowanie oprogramowania eksperckiego (Expert Choice) opartego na metodzie analitycznego procesu hierarchicznego i wielokryterialnej metodzie podejmowania decyzji.

Na podkreślenie zasługuje bardzo przejrzysta prezentacja zarówno zakresu jak i struktury rozprawy postaci schematów blokowych.

Moim zdaniem cel rozprawy został sformułowany prawidłowo, natomiast zakres rozprawy został określony i przedstawiony właściwie. Na szczególne podkreślenie zasługuje jasna pod względem metodologicznym koncepcja rozprawy, która obejmuje szeroki zakres badań przeglądowych, eksperymentalnych i symulacyjnych.

4. Merytoryczna ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa mgr. inż. Tahseen Ali MANKHI obejmuje sześć rozdziałów. Poprzedzona jest spisem treści i wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów.

Struktura podziału treści na rozdziały oraz punkty i podpunkty jest w zasadzie prawidłowa, jednak w rozdziale 2 pt. Przegląd literatury, pkt. 2.9 Ocena przewidywanej trwałości łożyska, wyróżniono tylko jeden podpunkt 2.9.1. Metoda *Lundberga i Palmgreny*, natomiast prawidłowo powinno się stosować minimum dwa lub więcej podpunktów. Zatem należało albo zwiększyć liczbę podpunktów albo zrezygnować z zastosowanego obecnie podziału.

Wykaz oznaczeń zawiera 48 najważniejszych symboli, ich określenia i wymiary. Jednak nie są one napisane w porządku alfabetycznym, co utrudnia ich wykorzystanie. Zwyczajowo

przyjmuje się, że najpierw pisze się litery łącińskie małe potem duże a następnie litery greckie małe i duże, ale w porządku alfabetycznym.

Ponadto, można dostrzec pewne nieścisłości dotyczące definicji i oznaczeń niektórych parametrów. Przykładowo przez σ_{VM} określono naprężenia von-Mises'a. Według mnie prawidłowo powinno być naprężenia zredukowane σ_{zHMH} według hipotezy Hubera, Mises'a i Hencky'ego. Hipoteza energii właściwej odkształcenia postaciowego jest to najczęściej stosowana hipoteza wytrzymałościowa dla stali i metali, sformułowana w roku 1904 przez polskiego uczonego Maksymiliana T. Hubera oraz niezależnie w 1913 r. przez Austriaka Richarda von Misesa i w 1924 Niemca Heinricha Hencky'ego, jednak priorytet Hubera nie jest kwestionowany. W literaturze znana jako hipoteza H-M-H.

Kolejny symbol $\alpha_{critical}$ - *Critical angle of attack* (degree), według mnie indeks przy symbolu jest za długi i można było zastosować krótsze oznaczenia np. α_c .

Z kolei oznaczenia σ_x , σ_y i σ_z określono jako *Kartezjańskie naprężenia kontaktowe* (*Cartesian contact stresses*) (Pa). Według mnie prawidłowo powinno być składowe tensora naprężeń kontaktowych w Kartezjańskim układzie współrzędnych (prostokątnych).

Oznaczenie z_0 zdefiniowano jako maksymalne naprężenie ścinające na głębokości z_0 (mm) (*Maximum shear stress at the depth z_0*) (mm), powinno być τ_0 - maksymalne naprężenie ścinające na głębokości z_0 (Pa) lub z_0 - głębokość maksymalnych naprężeń ścinających τ_0 (mm).

Literą N oznaczono liczbę cykli oraz prędkość obrotową. Zwyczajowo prędkość obrotowa jest oznaczana małą literą „n”, przy czym wymiar jest zapisany nieprawidłowo (min-1), a powinien być (min^{-1}).

Przy oznaczeniu ΔU - Różnica prędkości dwóch powierzchni kontaktowych (*The differential of two contact surfaces' velocities*) nie umieszczono wymiaru, według mnie wymiar dotyczy prędkości (np. $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Oznaczenie U_{av} - (*The average velocity of two contact surfaces*), uwaga identyczna jak wyżej przy ΔU .

Składową τ_{xz} opisano jako *Kartezjańskie naprężenie ścinające* (*Cartesian shear stress*) (Pa) według mnie prawidłowo powinno być naprężenie ścinające w Kartezjańskim układzie współrzędnych.

Liczby przy oznaczeniach promieni R_1 i R_2 oraz moduły Younga E_1 i E_2 powinny być zapisane jako indeksy, R_1 i R_2 oraz E_1 i E_2 .

Wykaz skrótów zawiera 76 najważniejszych akronimów i ich określenia. Jednak nie są one napisane w porządku alfabetycznym, co utrudnia ich wykorzystanie. Poza tym prawie wszystkie skróty są napisane czcionką prostą a tylko dwa *SR* i *SRR* kursywą. Można również dostrzec pewne nieścisłości dotyczące definicji niektórych skrótów, np. WEF (*White Structural Flaking*) - Białe łuszczenie strukturalne czy nie powinno być WSF?

We *Wprowadzeniu* Autor rozprawy prawidłowo przedstawia w sposób ogólny problematykę rozprawy i uzasadnia konieczność jej realizacji. Najpierw celowość badań nad siłowniami wiatrowymi prawidłowo uzasadnia szybkim rozwojem energetyki wiatrowej w porównaniu z innymi źródłami energii odnawialnej oraz względami ekonomicznymi i najmniejszym wpływem siłowni wiatrowych na emisję CO_2 . Również celowość badania przyczyn zużycia łożysk przekładni planetarnej uzasadnia prawidłowo jego nadmierną awaryjnością w porównaniu z innymi przyczynami awarii siłowni wiatrowych. Zakres pracy jest przedstawiony bardzo przejrzysto również w postaci schematu blokowego.

Rozdział 2 Przegląd literatury (*Literature review*) w zakresie tematu rozprawy obejmuje łącznie aż 37 stron co stanowi 20% objętości całej pracy. Rozdział ten został podzielony na dziewięć punktów, które obejmują bardzo ważne zagadnienia dotyczące:

- wiedzy o turbinach wiatrowych: *Historia energetyki wiatrowej* (pkt. 2.1), *Główne części turbiny wiatrowej* (pkt. 2.2) i *Krzywa mocy turbiny wiatrowej* (pkt. 2.3),
- typów i konstrukcji łożysk stosowanych w przekładni turbiny wiatrowej (pkt. 2.4), *Systemów monitoringu turbiny wiatrowej* (pkt. 2.5), *Wymagań dotyczących materiałów stalowych używanych do budowy łożysk* (pkt. 2.6), *Technologii wytwarzania i obróbki cieplnej łożysk* (pkt. 2.7), *Tocznego kontaktowego zużycia zmęczeniowego* (pkt. 2.8) (teoria uszkodzeń łożysk, teoria kontaktu Hertza i rozkład naprężeń zredukowanych w strefie kontaktu w zależności od obciążenia kontaktowego),
- metod przewidywania trwałości znamionowej łożyska (pkt. 2.9).

Ważnym elementem przeglądu literatury jest opis systemów monitorowania siłowni wiatrowych, gdyż jest to skuteczne narzędzie w przewidywaniu awarii. Analizą objęto dwa systemy monitorowania: system monitorowania stanu (CMS) oraz system kontroli nadzorczej i pozyskiwania danych (SCADA). Do podstawowych parametrów eksploatacyjnych analizowanych przez system monitorowania stanu należą: prędkość wiatru, moc wyjściowa, prędkość obrotowa turbiny, poziom drgań w układzie napędowym, jakość smaru i temperatura. Te dane, można wykorzystać do obliczenia i oceny dynamicznej niezawodności elementów turbin wiatrowych w czasie rzeczywistym. Natomiast system kontroli nadzorczej i pozyskiwania danych (SCADA) jest stosowany do uśrednionych obliczeń (co 10 minut) następujących parametrów: prędkości wiatru, prędkości wirnika i generatora oraz mocy wyjściowej generatora i przesyłanie danych z turbiny do centrum sterowania w celu monitorowania. Dane te mogą być przetwarzane w celu dostarczenia informacji diagnostycznych i przewidywania awarii.

Kolejnym ważnym zagadnieniem jest dobór odpowiedniego materiału na łożysko od którego zależy jego wytrzymałość zmęczeniowa. W stosunku do stali łożyskowych stawiane są bardzo wysokie wymagania dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej na przemienne naprężenia ścinające, odporności na zużycie, wysokiej granicy sprężystości (minimalizującej odkształcenia podczas obciążenia) oraz odpowiedniej stabilności wymiarowej podczas eksploatacyjnych obciążeń termo-mechanicznych. Dlatego też doktorant przeanalizował różne gatunki stali używanych do produkcji łożysk takie jak 100Cr6, 100CrMo7 i 100CrMn6 a także technologie ich wytwarzania oraz obróbki cieplnej w aspekcie wymiarów łożyska i kosztów produkcji. Zaleca się stosować na łożyska stale do nawęglania zawierające co najmniej 20% austenitu szcążkowego, gdyż wykazują one większą odporność na powstawanie nieregularnych białe obszary i przedwczesnych makro-wzrów. Przeanalizowano również wpływ obecności tlenków oraz węglików i węglikoazotków tytanu na uszkodzenia zmęczeniowe wywołane obciążeniem osiowym lub zginaniem obrotowym. Na tej podstawie określono wymagania dotyczące zarówno składu stali łożyskowych jak i technologii ich wytwarzania (toczenie, szlifowanie, obróbka cieplna – austenitacja, hartowanie, odpuszczanie oraz modyfikacja powierzchni (azotowanie, nawęglanie, obróbka laserowa) od których zależą właściwości mechaniczne, rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej oraz stabilność wymiarów łożysk tocznych.

Niekorzystnym zjawiskiem wpływającym na awaryjność łożyska są odkształcenia plastyczne na powierzchniach styku elementów tocznych z bieżnią łożyska. Odkształcenia te są wynikiem spiętrzenia naprężeń występujących podczas cyklicznego lokalnego obciążenia i odciążenia lub dużej zmienności obciążenia w czasie, które powodują zmęczenie stykowe. W związku z tym Autor słusznie przedstawił również analizę mechanizmów tocznego zmęczenia

stykowego i teorię kontaktu Hertza. Zmęczenie stykowe może być inkubowane na powierzchni lub w warstwach podpowierzchniowych. Do najważniejszych przyczyn uszkodzeń powierzchniowych zaliczono wady powierzchniowe (np. chropowatość, lokalne uszkodzenia, wżery). W mikro-nierównościach podczas kontaktu następuje spiętrzenie naprężeń, które inicjują pęknięcia na powierzchni, następnie propagują się w głąb warstwy wierzchniej po czym zawracają na powierzchnię i wykruszenia, tworząc lokalne wżery. Natomiast pęknięcie podpowierzchniowe jest wywoływane spiętrzeniem naprężeń ścinających lub naprężeń zredukowanych (w zależności od stanu obciążenia eksploatacyjnego łożyska). Wówczas proces zużycia łożyska rozpoczyna się od pojawienia pojedynczych mikropęknięć (inkubacja), które następnie powiększają swoje rozmiary oraz łączą się. Następuje wówczas rozprzestrzenianie się mikropęknięć w kierunku powierzchni styku w różnych kierunkach, a gdy pęknięcie dotrze do powierzchni styku to materiał może się łuszczyć lub odpryskiwać. Określono również sześć objawów zmęczenia stykowego. Duże odpryski, które dostają się między stykające się powierzchnie mogą powodować miejscowe spiętrzenie naprężeń, wibracje i obciążenia udarowe, przyczyniając się do zmniejszenia żywotności łożyska.

Do obliczenia wartości nacisków kontaktowych, kształtu i wymiarów obszaru kontaktu oraz stanu naprężeń (składowych normalnych σ_x , σ_y i σ_z oraz stycznej τ_{xz} tensora naprężenia) w warstwie wierzchniej Doktorant proponuje zastosować teorię kontaktu Hertza. Dlatego przedstawiono również wpływ stanu nacisków na rozkład składowych stanu naprężenia w głąb warstwy wierzchniej w obszarze kontaktu oraz na przemiany struktury, wydłużenie ziaren i rozmiary mikropęknięć podpowierzchniowych i objętość odprysków zdegradowanego materiału. Przedstawiono również wpływ na przyspieszone zużycie łożysk rodzaju smaru i warunków smarowania (występowanie czterech przypadków kontaktu elementów łożyska - smarowanie elastohydrodynamiczne, mieszane, zużycie ściernie i występowanie obcych cząstek (piasek, wióry, pył) na powierzchni styku) oraz wpływu poślizgu wywołanego (zmianą prędkości i przyspieszeń, zmianą momentu obrotowego, przyspieszanie lub zwalnianie układu napędowego, niewspółosiowość, przejściowe obciążenia, różnice prędkości między rolką a bieżnią) określone za pomocą współczynnika poślizgu SR (lub SRR) wyrażonych w procentach (jako stosunek różnicy prędkości między dwiema powierzchniami styku (ΔU) do ich prędkości średniej (U_{av})).

Ze względu na duże koszty ciągłego monitoringu stanu siłowni wiatrowych bardzo ważne jest przewidywanie znamionowej trwałości turbin metodami analitycznymi. W tym celu przeanalizowano również różne metody obliczania trwałości łożysk począwszy od metody Lundberga i Palmgrena (LP), która dotyczy tylko łożysk wykonanych ze stali AISI 52100 hartowanej na wskroś oraz nie uwzględnia termodynamiki obciążeń i smarowania aż do bardziej zaawansowanych, opracowanych przez Takemura i współpracowników, będących rozwinięciem metody LP poprzez uwzględnienie dodatkowych czynników wpływających na żywotność łożyska, takie jak obciążenie graniczne zmęczeniowe, warunki smarowania i zanieczyszczenia w oleju smarnym (a_c), przemieszczenie wału i sztywność oprawy, luz wewnętrzny łożyska i granica zmęczenia, za pomocą współczynnika modyfikacji trwałości a_{NSK} , który jest funkcją dwóch czynników: parametru środka smarnego (a_L) oraz współczynnika obciążenia $(P-P_u)/(C \cdot a_c)$.

Przeprowadzenie bardzo wnikliwej analizy stanu wiedzy w zakresie tematu pracy pozwoliło Doktorantowi na precyzyjne zdefiniowanie celu rozprawy oraz zakresu badań własnych. Jednak pewien niedosyt budzi brak szczegółowych danych dotyczących omówienia przypadków obciążenia badanych łożysk. Na przykład nie sprecyzowano które z badanych łożysk było obciążone tylko momentem obrotowym, a które było obciążone zarówno siłami jak i momentem. W dużej mierze zależy to od lokalizacji łożysk (co wynika z załączonego schematu kinematycznego siłowni wiatrowej – A1 i A2). Przykładowa, wał wolnoobrotowy od strony

wirnika jest najczęściej łożyskowany za pomocą dwóch łożysk stożkowych w celu kasowania luzów i przemienienia bardzo dużych sił poprzecznych i osiowych a z drugiej strony jest łożyskowany za pomocą łożyska walcowego wałeczkowego. Istotne jest zatem określenie jakie łożysko jest analizowane i jakie ma wymiary, gdyż od tego zależy schemat jego obciążenia. Doktorant wyjaśnił brak tych danych koniecznością zachowania poufności.

Ze względu na skomplikowany charakter obciążeń w strefie kontaktu tocznego, do obliczenia stanu naprężenia w strefie kontaktu, Doktorant zaproponował słusznie użycie teorii Hertza. Przyjmuje jednak duże uproszczenia zakładając przypadek ciała pół-nieskończonego osiowo-symetrycznego dla stanów płaskich, przy stacjonarnym obciążeniu jedynie siłą skupioną, która w obszarze styku rozkłada się na obciążenie półeliptyczne.

Rozdział trzeci pt. *Zmiany mikrostruktury i rodzaje uszkodzeń* obejmuje 30 stron i dotyczy bardziej szczegółowego opisu zmian mikrostruktury w stalach łożyskowych w wyniku cyklicznych obciążeń stykowych oraz rodzajów występujących uszkodzeń, ich opisu i przyczyn powstawania.

Najpierw opisano przyczyny powstawania wtrąceń niemetalicznych w materiale łożyska w procesie produkcyjnym. Zapewnienie wymaganej czystości stali w procesie produkcji łożyska jest bardzo ważne, gdyż występujące wtrącenia niemetaliczne, pomimo bardzo małego udziału objętościowego, mają istotny wpływ na trwałość łożyska w czasie eksploatacji. Wykazano to wyraźnie poprzez podanie wpływu wtrąceń niemetalicznych i ich rozkładu na głębokości WW na właściwości mechaniczne stali. Wtrącenia te mogą się również przyczynić do występowania różnego rodzaju uszkodzeń takich jak: kruche pęknięcie, pęknięcie plastyczne, zmęczenie, korozja i zużycie w kształcie motyla.

Szczegółowo opisano również wpływ wtrąceń niemetalicznych na koncentrację naprężeń oraz warunki inkubacji i rozprzestrzeniania się pęknięć w wielu kierunkach zarówno na powierzchni jak i pod powierzchnią obszaru styku bieżni wewnętrznej łożyska z elementem tocznym, co znacznie zmniejsza trwałość zmęczeniową. Stwierdzono również, że wartość zredukowanych naprężeń zależy od: kształtu, rozmiarów i lokalizacji wtrącenia oraz modułu Younga (zarówno wtrącenia jak i materiału rodzimego), a także od współczynników rozszerzalności cieplnej i właściwości mechanicznych obu ciał.

Wykazano także, że wytrzymałość zmęczeniowa zależy istotnie od lokalizacji wtrącenia oraz od jego wymiarów i twardości. Dla trzech przypadków położenia wtrącenia tj. na powierzchni, stycznie pod powierzchnią oraz pod powierzchnią opracowano zależności ilościowe do obliczenia trwałości zmęczeniowej łożyska.

Jedną z istotnych wad powierzchni są pustki, które mogą występować samodzielnie lub w połączeniu z wtrąceniami niemetalicznymi i węglkami. Wyjaśniono przyczyny powstawania pustek podczas obróbki cieplnej i procesów wytwarzania stali łożyskowej oraz ich niekorzystny wpływ na trwałość łożysk. Dalej precyzyjnie określono typy wtrąceń niemetalicznych, które podzielono na pięć grup: grupa siarczkowa, grupa glinianów, grupa krzemianowa, kulista grupa tlenkowa i pojedyncza grupa kulista oraz zdefiniowano ich geometrię, kolor, właściwości fizyczne i współczynnik kształtu (AR) (stosunek długości do szerokości). Podano także inne podstawowe sposoby klasyfikacji wtrąceń niemetalicznych w następujący sposób: na podstawie ich składu chemicznego (odtleniacze i siarczki, np. siarczek manganu); na podstawie punktu początkowego fazy krzepnięcia i procesu zgodnie z następującą klasyfikacją: wtrącenia pierwotne zestalone, wtrącenia wtórne zestalone, wtrącenia które tworzą się po rozpoczęciu krzepnięcia stali, endogenne i zewnętrzne) oraz na podstawie ich rozmiarów (inkluzyje na poziomie makro i na poziomie mikro).

W dalszej części rozprawy opisano zmiany mikrostruktury pierścienia łożyska wywołane zmęczeniowym stykiem tocznym. Przy czym, po trawieniu próbek, możliwe jest wystąpienie czterech rodzajów uszkodzeń: białych obszarów (WEA), białych pęknięć (WEC), obszarów w kształcie motyla oraz ciemnych obszarów (DER). Wyjaśniono również, że przyczyną powstawania tych rodzajów uszkodzeń są odkształcenia plastyczne, zachodzące pod wpływem cyklicznych stykowych obciążeń eksploatacyjnych oraz omówiono trzy fazy zmian mikrostrukturalnych w stali łożyskowej a także opisano szczegółowo każde z tych rodzajów uszkodzeń. Przedstawiono również klasyfikację czynników mających wpływ na zużycie i zmiany mikrostruktury łożysk tocznych oraz opisano osiem hipotez, które ilustrują prawdopodobne pierwotne przyczyny zmian mikrostrukturalnych w stali łożyskowych.

Rozdział trzeci został opracowany głównie na podstawie przeglądu dostępnej literatury. Tylko nieliczne fragmenty są wykazane jako wkład Autora, np. Rys. 3-1, 3-4 i 3-9. Zatem rozdział ten można uznać jako kontynuację analizy stanu wiedzy.

W rozdziale czwartym pt. *Badanie podpowierzchniowych mikropęknięć powodujących przedwczesne awarie łożyska przekładni turbiny wiatrowej* dokonano szczegółowego opisu wyników badań własnych różnych rodzajów mikropęknięć podpowierzchniowych pierścienia wewnętrznego łożyska oraz przyczyn ich powstawania. Według mnie ten rozdział jest najbardziej wartościowy i oceniam go najwyżej. Ze względu na konieczność zachowania poufności nie przedstawiono szczegółowych danych dotyczących łożyska, tj. lokalizacji łożyska w przekładni oraz jego wymiarów, rodzaju materiału i jego własności mechanicznych. Badania eksperymentalne (eksperyment bierny) są oparte na obserwacji przedwcześnie zużytych łożysk. Nie ma jednak szczegółowych danych dotyczących warunków ich eksploatacji.

Występujące pęknięcia zostały zaobserwowane na specjalnie przygotowanych próbkach pobranych z uszkodzonych łożysk przekładni planetarnej lądowej turbiny wiatrowej o mocy 2 MW. W pracy obszernie i precyzyjnie opisano cały proces przygotowania próbek jednak nie podano ile było próbek oraz jaka była liczność (powtarzalność) pomiarów wynikająca z losowości badanych zjawisk a także z ilu i jakich łożysk je pobrano. Na podstawie rysunku 4-19 można przypuszczać, że badaniami objęto ponad 55 próbek.

Natomiast obserwacjom poddano 1447 pęknięć, które zostały sklasyfikowane według następujących kryteriów: głębokość, zagęszczenie, kąt nachylenia oraz asocjacja wtrąceń. Dla każdej próbki określano głębokość położenia pęknięcia (odległości od powierzchni styku), kąt nachylenia pęknięcia do powierzchni styku i długości pęknięć. Jest to istotne w celu zidentyfikowania możliwej przyczyny inicjacji mikropęknięć prowadzącej do przedwczesnej awarii łożyska.

Podczas badania mikroskopowego próbek zaobserwowano różne wzorce uszkodzeń podpowierzchniowych, w postaci odseparowanych wtrąceń od osnowy za pomocą pustek oraz mikropęknięć, które nie są związane z wtrąceniami niemetalicznymi (NMI) i powstają w pobliżu węglików lub są związane z wtrąceniami niemetalicznymi (pęknięcie inkluzji, pojedyncze lub podwójne pęknięcie osnowy na końcach inkluzji). Stwierdzono również mieszany typ uszkodzeń związany z inkluzją – pęknięcie osnowy zainicjowane inkluzją, pęknięcie inkluzji oraz oddzielenie pustką inkluzji od osnowy.

Za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej stwierdzono, że małe pęknięcia mogą również powstawać bardzo blisko granic inkluzji oddzielonych od osnowy pustymi przestrzeniami. Natomiast nie zaobserwowano występowania po trawieniu próbek białych pęknięć (WEC) ani białych obszarów (WEA), co potwierdza hipotezę, że WEA i WEC są konsekwencją lokalnego pęknięcia, ale nie jego przyczyną.

Składowe tensora naprężenia w kontakcie obliczono stosując wzory bazując na teorii Hertza. Jednak przyjęte oznaczenia na schemacie rys. 4-12 w układzie współrzędnych biegunowych nie są spójne z oznaczeniami we wzorach (4-1)-(4-10). Ponadto, rozpatrzono tylko przypadek statycznego obciążenia siłą normalną dla stanów płaskich, natomiast wzór na naprężenia zredukowane (4-10) dotyczy stanów przestrzennych, w układzie współrzędnych prostokątnych. Nie podano jednak jak obliczono pozostałe składowe tensora naprężenia. Nie prowadzono również obliczeń stanu odkształceń. Obliczenia analityczne uzupełniono obliczeniami numerycznymi zgodnie z teorią Hertza z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych obliczając różne składowe naprężeń znormalizowanych, również dla przypadku występowania sił tarcia. Nie podano jednak wzorów na podstawie których dokonano normalizacji co utrudnia analizę i ocenę otrzymanych wyników. Również opis modelu numerycznego jest bardzo skromny i niewystarczający, np. nie przedstawiono jakie są możliwości symulacji opracowanej aplikacji MES.

Przeprowadzono również symulację numeryczną w programie ABAQUS wpływu wtrąceń niemetalowych na stan naprężeń. Wykazano, że koncentracja naprężeń występuje na granicy inkluzji, przy czym pomiędzy naprężeniami w różnych obszarach mikropeknięć występują znaczne różnice wynoszące nawet 250 MPa, co może być przyczyną powstawania pęknięć. Dalsze badania wykazały, że długość wtrąceń może nie wpływać znacząco na inicjację pęknięć, gdyż większość uszkodzonych wtrąceń (59%) miało współczynnik proporcji wymiarów AR w zakresie (1÷2), natomiast najmniej uszkodzeń (14%) miało współczynnik proporcji wymiarów $AR > 3 \mu\text{m}$.

Wykazano również, że rozkład gęstości pęknięć wraz z głębokością jest identyczny z rozkładem naprężeń zredukowanych H-M-H. Gęstość małych mikropeknięć podobnie jak i maksymalna wartość naprężeń zredukowanych występują w punkcie Bielajewa, co świadczy o istotnym wpływie naprężeń zredukowanych na inicjację pęknięć. Zaobserwowano również, że pęknięcia o długości mniejszej niż 15 μm mają niezmienny kierunek, natomiast dłuższe propagują się w wielu zmiennych kierunkach. Dlatego przyjęto długość 15 μm jako granicę rozróżniania dużych i małych pęknięć.

Ponieważ, naprężenie zredukowane H-M-H σ_{zHMH} jest skalarą dlatego przyjęto kąt nachylenia pęknięcia ($\pm 45^\circ$) jako wskaźnik występowania maksymalnych naprężeń ścinających. Stwierdzono, że mikropeknięcia w płytszych obszarach na głębokości (0÷100) μm są w przybliżeniu równoległe do powierzchni styku (kąty nachylenia równe zero). Wynik ten potwierdza wpływ siły stycznej na zmianę kąta inicjacji pęknięcia. Natomiast wraz ze wzrostem głębokości styku średnie kąty mikropeknięć są w przybliżeniu równe kątowi maksymalnego naprężenia ścinającego (45°). Naprężenie ścinające wzrasta aż do osiągnięcia maksymalnej wartości na głębokości (300÷400) μm , a następnie nieznacznie maleje. Zatem można wywnioskować, że maksymalne naprężenie ścinające (τ_{max}) znajduje się w przedziale głębokości około (300÷400) μm , na którym pęknięcia zwykle odpowiadają nachyleniu maksymalnego naprężenia ścinającego ($\pm 45^\circ$). Również na tej samej głębokości zaobserwowano dużą liczbę pęknięć podpowierzchniowych, co wskazuje na istotny wpływ maksymalnego naprężenia ścinającego w inicjacji uszkodzeń.

W podsumowaniu prawidłowo stwierdzono, że w zależności od rodzaju obciążenia możliwe są dwa rodzaje pęknięć, które mogą powstać w dwóch różnych płaszczyznach w stosunku do kierunku działania naprężeń głównych, a mianowicie w płaszczyźnie prostopadłej do największego naprężenia głównego σ_1 powstaje wówczas pęknięcie rozdzielcze oraz w płaszczyźnie największych naprężeń stycznych τ_{max} powstaje pęknięcie poślizgowe. Wskazano również, że w przypadku złożonego stanu naprężeń pęknięcie może być również wywołane naprężeniami zredukowanymi σ_{zHMH} . Jednak nie wyjaśniono w jakich przypadkach

eksploatacji siłowni one wystąpią. Pomimo tych drobnych nieścisłości ten rozdział oceniam wysoko, gdyż poczynione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie zmieniają wyników wnioskowania.

Dalej opisano również wyniki badań wskazujące, że węgliki, puste przestrzenie i wtrącenia niemetaliczne są przyczyną powstawania zmian strukturalnych takich jak motyle, białe obszary (WEA), białe pęknięcia (WEC) i ciemne obszary (DER). Na podstawie badań mikroskopowych wykazano, że długości i nachylenia motyli zmieniają się wraz z głębokością (od powierzchni styku) oraz, że WEC, WEA i DER mogą powstawać w wyniku rozwoju cech motyli jako białych obszarów.

Opisano również przypadek zużycia powierzchniowego bieżni łożyska wywołany koncentracją naprężeń na krawędzi rolki oraz niewspółosiowością i skośnością styku wałeczków okresie eksploatacji łożyska.

Rozdział 5 zatytułowany *Wybór optymalnego typu łożyska do przekładni planetarnej na podstawie analitycznej optymalizacji hierarchicznej (AHP)* dotyczy wyboru optymalnego łożyska do przekładni planetarnej na podstawie optymalizacji wielokryterialnej. Jest to bardzo ważny etap prac projektowych.

Na podstawie przeprowadzonej wnikliwej i pogłębionej analizy stanu wiedzy oraz badań własnych Doktorant stwierdza, że jedną z głównych przyczyn przedwczesnych uszkodzeń łożyska jest przekroczenie wartości dopuszczalnych naprężeń zredukowanych (σ_{zHMH}) lub dopuszczalnych wartości składowej stycznej (naprężeń ścinających τ_{max}) tensora naprężeń. Zmienne stany naprężeń są wynikiem zmiennego obciążenia w procesie eksploatacji siłowni (zmiana prędkości wiatru, obciążenia udarowe, przeciążenia, odwrócenie momentu obrotowego, naprężenia strukturalne, wibracje, obciążenia szczytowe, poślizg, itp.). Dlatego też Autor proponuje, aby w procesie doboru optymalnego łożyska wykorzystać metodę hierarchiczną, która jest jedną z głównych metod wielokryterialnego podejmowania decyzji. Wybór optymalnego łożyska dokonuje się za pomocą zastosowanego narzędzia programowego (Expert Choice), po wprowadzeniu jego trzech elementów strukturalnych: celu, kryteriów i opcji, przez porównanie alternatywnych łożysk otrzymanych na podstawie różnych kryteriów.

Cały proces podejmowania decyzji jest bardzo szczegółowo opisany i zilustrowany schematami blokowymi. Również wyczerpująco opisano wykorzystywane oprogramowanie ekspertowe (Expert Choice) podejmowania decyzji kompromisowej dla problemu wielokryterialnego.

Zastosowanie opisanej metody podejmowania decyzji zilustrowano na przykładzie trzech typowych łożysk: stożkowe jednorzędowe, walcowe jednorzędowe i walcowe dwurzędowe. Głównymi kryteriami w ocenie były: koszt, trwałość, niezawodność, cechy konstrukcyjne i dostępność. Kolejne etapy podejmowania decyzji zostały bardzo dobrze zilustrowane. Stwierdzono, że jednorzędowe łożysko stożkowe jest optymalnym wyborem do zastosowania w przekładni turbiny wiatrowej o około 52,1% bardziej niż pozostałe. Wynik jest zgodny z wnioskami z analizy stanu naprężeń oraz z wynikami innych badaczy.

Rozdział szósty *Kluczowe wyniki, wnioski i zalecenia do dalszych prac* stanowi podsumowanie rozprawy doktorskiej oraz zawiera obszernie wnioski wynikające z badań eksperymentalnych i symulacyjnych oraz zalecenia dotyczące przyszłych prac. Według mnie ten rozdział jest opracowany prawidłowo. Wnioski szczegółowe wynikają zarówno z przeglądu literatury jak i z przeprowadzonych obszernych własnych badań eksperymentalnych i symulacyjnych oraz optymalizacji wielokryterialnej. Zostały one przez Autora przedstawione w sposób metodyczny i wskazują, że cele pracy zostały osiągnięte, zaś zakres pracy w pełni zrealizowany.

Na podkreślenie zasługuje podpunkt 6.2 dotyczący propozycji przyszłych prac (rzadko spotykane w rozprawach doktorskich), w których zawarto również zalecenia dotyczące czystości stali łożyskowych oraz konstrukcji turbiny wiatrowej i warunków jej eksploatacji.

Dokonując merytorycznej oceny rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tahseen Ali MANKHI stwierdzam, że w rozprawie tej podjęto próbę rozwiązania ważnego i trudnego problemu naukowego mającego duże znaczenie praktyczne. Uważam, że Autor jest dobrze przygotowany do podjęcia dalszej samodzielnej pracy naukowej i badawczej. Wyrażam przekonanie, że rozprawa doktorska mgr. inż. Tahseen Ali MANKHI wnosi istotny wkład naukowy w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

5. Uwagi szczegółowe do pracy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Tahseen Ali MANKHI jest napisana w sposób jasny, zwarty i uporządkowany. Struktura i układ pracy, a także jej strona edytorska są właściwe i sprzyjają zrozumieniu przez czytelnika treści poszczególnych rozdziałów. Oceniam, że rozprawa jest napisana dobrze zarówno pod względem merytorycznym, jak i językowym. Wszystkie wykonane badania eksperymentalne są bardzo dobrze opisane a otrzymane wyniki wyczerpująco udokumentowane. Mimo to w tekście rozprawy zdarzają się – na szczęście bardzo nieliczne – drobne pomyłki edytorskie tzw. literówki oraz sformułowania wywołujące wątpliwości. Na przykład:

- 1) Niektóre rysunki mają charakter poglądowy a nie techniczny. Na przykład w rozdziale analiza stanu wiedzy wszystkie rysunki zostały skopiowane z artykułów źródłowych, bez próby poprawienia ich jakości lub ujednoczenia oznaczeń (opisów). W efekcie niektóre rysunki są nieczytelne np. rys. 2-20, a niektóre są niezrozumiałe, gdyż nie zastosowano spójnego oznaczenia na przykład na rysunku 2-14 długość kontaktu oznaczono przez $2a$ a we wzorach (2-1) i (2-4) stosowano oznaczenie L . Opis i podpis niektórych rysunków jest nieadekwatny do wykresów, np. rysunek 2-20 podpisano: Krzywe żywotności łożyska kulkowego (a) i wałeczkowego (b). Według mnie powinno być: zależność współczynnika żywotności łożyska a_{NSK} od $(P-P_u)/(C \cdot a_c)$, dla różnych wartości współczynnika lepkości smaru k . również oś pozioma jest opisana na rysunku 2-20a za pomocą wyrażenia $(P-P_u)/C \cdot 1/a_c$, a na rysunku 2-20b za pomocą wyrażenia $(P-P_u)/C/a_c$. Według mnie prawidłowo powinno być: $(P-P_u)/(C \cdot a_c)$.
- 2) W tekście na str. 59 brakuje zdania wiążącego odsyłającego do następujących wzorów (3-1)÷(3-3). Ponadto, we wzorach stosowano opisy słowne „area” i symbole, zamiast tylko symboli. Brakuje również jednostek. Trwałość zmęczeniowa powinna być wyrażona w [MPa]. Dodatkowo w opisie wzoru nie podano czy twardość według skali Vickersa dotyczy osnowy czy wtrącenia, również nie podano w jakich jednostkach jest wyrażony współczynnik długości wtrącenia.
- 3) Tablice załączone do pracy są nieczytelne, np. w tabelicy D1 str. 136 wartości potęg są nieczytelne. Ponadto, zawarte dane są niezrozumiałe. Na przykład podano, że trwałość zmęczeniowa dla cast. No 119, $H_v=579$, wynosi 563 [MPa], ale liczba cykli wynosi tylko $4,92 \times 10^4$. Czyli nie jest to trwałość zmęczeniowa, gdyż zgodnie z normą trwałość zmęczeniowa jest to graniczna wartość obciążenia przy, której liczba cykli wynosi minimum 15×10^6 . Także nie wyjaśniono co oznaczają symbole σ' i $\sigma'w$.
- 4) W całej pracy nieprecyzyjnie stosowano znaki interpunkcji. Na przykład po wyrazie „gdzie” (where) 8 razy (str. 43, 51-53, 96 i 116) brakuje dwukropka, po dwukropku dodatkowo 22 razy niepotrzebnie umieszczano punkt „-” (np. str. 51, 55, 62, 63, 65, 66, 71, 83, 115, 117,

121), natomiast po wzorach a przed wyrazem „gdzie” (where) 25 razy brakuje przecinka (np. 51-53, 59, 95, 96), brakuje również przecinków i kropek na końcu zdania, np. str. 52.

- 5) W tabeli I-1 str. 7, w przypisie 1) zastosowano wymiar mocy (w Watach) powinno być [W].
- 6) W niektórych sformułowaniach występują nieścisłości i skróty myślowe, np. 12 wg str. 41 „Accordingly, it is possible by using Hertzian theory to calculate the following parameters: maximum shear, orthogonal shear, Von-Mises stress, and octahedral shear stress based on consideration”, (W związku z tym możliwe jest, za pomocą teorii Hertza, obliczenie następujących parametrów: maksymalnego ścinania, ścinania ortogonalnego, naprężenia Von-Misesa i ośmiościennego naprężenia ścinającego na podstawie rozważań), gdyż samo występowanie naprężeń nie jest przyczyną awarii. Proces zużycia rozpoczyna się dopiero, gdy stan naprężeń zredukowanych lub maksymalne naprężenie ścinające (w zależności od schematu obciążenia) przekroczy naprężenie dopuszczalne. Odrębnym zagadnieniem jest obliczenie naprężeń dopuszczalnych, a w badanym przypadku jest to bardzo złożony problem, gdy zależy ono od stanów: odkształceń, prędkości odkształceń i temperatury oraz od ich historii w procesie eksploatacji łożyska (siłowni wiatrowej).

Warto zaznaczyć, że powyższe wątpliwości mają charakter dyskusyjny i porządkowy natomiast w żadnym stopniu nie umniejszają wysokiej wartości rozprawy. Mogą być wykorzystane przez Autora w dalszych badaniach.

6. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Po analizie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tahseen Ali MANKHI nt. *Badanie mikropeknięć podpowierzchniowych powodujących przedwczesne awarie łożysk przekładni turbin wiatrowych (Investigation of subsurface microcracks causing premature failure in wind turbine gearbox bearings)* z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa ta stanowi oryginalne i wartościowe rozwiązanie złożonego problemu naukowego, stanowiący istotny wkład w rozwój dyscypliny *Inżynieria mechaniczna*. Rozprawa ta spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie. Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tahseen Ali MANKHI do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Leon Kukielka