

Piotr Bielawski*

Akademia Morska w Szczecinie

Potencjał eksploatacyjny połączeń wciiskowych maszyn okrętowych

Wear margin of ship machine units with press fits

ABSTRACT

To inseparable connection of two machine elements is used, among others, press fit connections. The elements of the press fit connection undergo a specific wear during use which may lead to the loss of the wear margin of the connection. Particularly important press fit connections of ship machinery are the connection of the propeller - shaft and connection of the shell - connecting rod big end. The model of the press fit connection and the results of the experiment consisting in the comparison of the calculated and measured torque required to break the connection are presented. It was indicated that fretting corrosion is a characteristic type of wear at the nonstationary load of the press fit connection. The values influencing the course of the fretting corrosion of the press fit connection were listed. The effects of fretting corrosion of the propeller-shaft connection are described. The structure of the connection of the shell-connecting rod big end was characterized and the causes of fretting corrosion were indicated. It was found that acoustic emission may be a symptom of the wear margin of an press fit connection. In the case of a shell - connecting rod big end connection, an additional symptom may be the rotation slip of the shell in big end of connecting rod or the axial displacement of the shell in the big end of connecting rod.

Keywords: ship machine, wear margin, press fit connection, fretting corrosion, symptoms of the wear margin

STRESZCZENIE

Celem nierozłącznego połączenia dwóch elementów maszyn stosuje się między innymi połączenia wciiskowe. Elementy maszyn połączone wciiskowo ulegają podczas użytkowania specyficznemu zużyciu co może doprowadzić do utraty potencjału eksploatacyjnego połączenia. Szczególnie ważnymi połączeniami wciiskowymi maszyn okrętowych są połączenia wał śrubowy - śruba i panewka - korbówód. Przedstawiono model połączenia wciiskowego i wyniki eksperymentu polegającego na porównaniu obliczonego i zmierzonego momentu skręcającego potrzebnego do rozrwania połączenia. Wskazano, że charakterystycznym rodzajem zużycia przy niestacjonarnym obciążeniu połączenia wciiskowego jest korozja cierna. Wymieniono wielkości wpływające na przebieg korozji czarnej połączenia wciiskowego. Opisano skutki korozji czarnej połączenia śruba-wał śrubowy. Scharakteryzowano konstrukcję połączenia panewka-stopa korbowodu i wskazano na przyczyny korozji czarnej. Stwierdzono, że symptomem potencjału eksploatacyjnego połączenia wciiskowego może być emisja akustyczna. W przypadku połączenia panewka-stopa korbowodu dodatkowym symptomem może być obrót panewki w stopie lub osiowe przesunięcie panewki w stopie korbowodu.

Słowa kluczowe: maszyny okrętowe, potencjał eksploatacyjny, połączenie wciiskowe, korozja cierna, symptomy potencjału

1. Wstęp

Maszyny, w tym maszyny okrętowe mają wiele elementów połączonych z sobą w sposób „nierozłączny” za pomocą tzw. połączeń wciiskowych. W wielu przypadkach „nierozłączny” oznacza połączenie na całe życie maszyny, w innych przypadkach „nierozłączny” należy rozumieć wyłącznie jako takie połączenie, w którym dwa połączone elementy zachowują się podczas pracy maszyny jak jeden element. W wielu przypadkach podczas pracy maszyny może dojść do zerwania połączenia wciiskowego i uszkodzenia maszyny. Konieczne jest znalezienie miar i symptomów potencjału eksploatacyjnego ważnych połączeń wciiskowych istotnych maszyn. Istotnymi maszynami okrętowymi są linie wałów i silniki okrętowe, a ważnymi połączeniami wciiskowymi są połączenia śruba-wał śrubowy i panewka - stopa korbowodu.

2. Potencjał eksploatacyjny połączeń wciiskowych

Wyróżnia się czyste połączenia wciiskowe i połączenia kształtowo-wciiskowe. Najbardziej znanym modelem połączenia wciiskowego jest model typu „pierścień w pierścieniu”. Do połączeń wciiskowo-kształtowych mogą być przypisane połączenia wciiskowo-wpustowe i wciiskowe poligonowe.

Czyste połączenie wciiskowe może dotyczyć elementów o kształcie walcowym i stożkowym.

Potencjał eksploatacyjny czystego połączenia wciiskowego zostanie wyczerpany w momencie, kiedy momenty i siły tarcia między połączonymi „nierozłącznie” elementami będą mniejsze od momentów i sił rozdzielających te elementy. Siła tarcia jest iloczynem nacisków promieniowych i współczynnika tarcia. Naciski promieniowe w modelu „pierścień w pierścieniu” są powiązane z naprężeniami w obydwu pierścieniach, te z kolei zależą od „wciisku”, czyli różnicy średnic pierścieni przed montażem i właściwości materiałów [1]. Współczynnik tarcia zależy głównie od rodzaju materiałów i rodzaju powierzchni tarcia. Naciski promieniowe i współczynnik tarcia zależą również od sposobu realizacji połączenia:

- w włączanych połączeniach walcowych, w szczególności przy dużych wciiskach, może dochodzić do niszczenia powierzchni lub niewspółosiowego ustawienia obydwu pierścieni. Skutkiem jest inny wciśk i inny współczynnik tarcia. Metodą kontroli procesu włączania jest pomiar siły włączania w funkcji drogi włączania, a metody kontroli jakości złącza to pomiar naprężeń w pierścieniach oraz pomiary geometrii połączenia;

*Autor korespondencyjny. E-mail: p.bielawski@am.szczecin.pl

- w skurczowych połączeniach walcowych i stożkowych należy uwzględnić wpływ temperatury na materiały: możliwe są przemiany fazowe i niszczenie powłok ochronnych. Metody kontroli procesu to pomiary temperatur łączonych elementów, a metody kontroli jakości połączenia to pomiary naprężeń w materiałach oraz pomiary geometrii połączenia;
- w włączanych połączeniach stożkowych możliwe jest zastosowanie „hydraulicznego rozszerzania” pierścienia zewnętrznego, co znacząco ogranicza niszczenie powierzchni materiałów i ułatwia montaż i demontaż. Metody kontroli procesu to pomiar drogi włączania (kontrola wcisku), a metody kontroli jakości złącza to pomiar naprężeń w pierścieniach oraz pomiary geometrii połączenia.

Połączenia wciskowe mogą być modelowo rozrywane momentami skręcającymi lub siłami poosiowymi. W [2] obliczono moment skręcający potrzebny do zerwania połączenia wciskowego, a następnie na zbudowanym stanowisku dokonano pomiaru momentu potrzebnego do zerwania połączenia. Generalnie, zmierzony moment skręcający, przy którym dochodziło do zerwania połączenia był niższy od momentu wyliczonego z modelu. Dla włączanych połączeń wciskowych różnica między momentem wyliczonym i zmierzonym mieściła się w zakresie od 5,91 do 16,1% wartości momentu wyliczonego. Potwierdzono, że jednorazowe zerwanie połączenia, demontaż i ponowny montaż skutkuje znaczącym, średnio 25% spadkiem momentu potrzebnego do zerwania połączenia.

Połączenia wciskowe w maszynach nie są obciążane wyłącznie stałą siłą poosiową lub stałym momentem obrotowym. Moment skręcający jest z reguły momentem zmiennym, ponadto może występować również zmienne obciążenie gnące. Niestacjonarne obciążenie połączenia wciskowego jest najczęstszą przyczyną cyklicznych ruchów poślizgowych w obszarze nacisków promieniowych połączenia. Następstwem takiego obciążenia tribologicznego jest plastyczna deformacja i ścinanie wierzchołków nierówności (chropowatości) lub mikropęknięcia [3]:

- ścinanie wierzchołków nierówności powoduje powstawanie cząstek zużycia, które w większości przypadków reagują z tlenem z otaczającego medium. Powstaje typowy obraz tzw. korozji czarnej, a z połączenia wydostawać się może „rdza połączenia wciskowego”, co często nazywane jest „krwawieniem połączenia”;
- jeżeli mikropęknięcie jest ukierunkowane niekorzystnie, to może się rozwijać i w końcu doprowadzić do czarnej pęknięcia zmęczeniowego. Powstawanie i rozkład mikropęknięć zależne jest między innymi od chropowatości powierzchni, co znacząco utrudnia deterministyczne prognozowanie pęknięcia. Do rozwoju pęknięcia potrzebny jest odpowiedni stan naprężeń.

Wpływ na korozję czarną i tym samym potencjał eksploatacyjny ma również rodzaj ruchu względnego, temperatura i cząstki zużycia [3]. Niskie temperatury przyspieszają korozję w szczególności stali, podczas gdy wysokie temperatury mają działanie stabilizujące. Działanie temperatury wyjaśnia się zależnym od temperatury wpływem wilgotności

powietrza na korozję chemiczną. Wpływ chropowatości powierzchni na korozję czarną skutkującą pęknięciami nie jest jednoznacznie opisany. Ruch względny jest zależnym od obciążenia ruchem oscylacyjnym o pewnej częstotliwości i amplitudzie:

- wpływ częstotliwości: spadek częstotliwości ruchu oscylacyjnego skutkuje wzrostem korozji czarnej i spadkiem wytrzymałości na ruchy oscylacyjne. Efekt ten wyjaśnia się dwojako. Z jednej strony związane jest to ze wzrostem współczynnika tarcia wraz ze spadkiem prędkości ruchu względnego, co skutkuje ścinaniem większej ilości wierzchołków nierówności. Z drugiej strony niższa częstotliwość powoduje wydłużenie czasu tworzenia się tlenków na powierzchni tarcia;
- wpływ amplitudy: w zakresie małych amplitud nie przekraczających odkształceń sprężystych, utrzymuje się kontakt między wierzchołkami i nie można ocenić zużycia, a liczba cykli do zmęczenia pozostaje wysoka;
- wpływ amplitudy: od pewnej wartości amplitudy ruchu zużycie rośnie powoli, a liczba cykli spada bardzo szybko aż do pewnego minimum, gdzie istnieje niebezpieczeństwo przelomu;
- wpływ amplitudy: przy jeszcze większych amplitudach szybkość zużycia rośnie bardzo szybko i od pewnej wartości amplitudy stabilizuje się. Przy dużej szybkości zużycia następuje likwidacja mikropęknięć: wzrost szybkości zużycia działa pozytywnie na liczbę obciążeń do przelomu;
- wpływ utlenionych cząstek zużycia na przebieg zużycia: cząstki zużycia poprzez ruch względny mogą być same wprowadzone w ruch. Tak działający proces transportowy odbywa się bardzo wolno, tak, że mówi się o dryfowaniu. Jeżeli cząstki nie mogą opuścić powierzchni styku, w niektórych miejscach może dochodzić do ich gromadzenia się. Powstaje w ten sposób tzw. układ trybologiczny z cieczą rozdzielającą w postaci proszku: trójtlenek żelaza Fe_2O_3 ma mniejszą gęstość i tym samym większą objętość, powoduje lokalne rozdzielanie współpracujących elementów. Skutkuje to lokalną koncentracją naprężeń i może, w zależności od grubości warstwy cząstek, zwiększać albo zmniejszać zużycie.

3. Korozja czarna połączenia śruba-wał śrubowy i panewka – stopa korbowodu

Połączenia śruba-wał śrubowy i panewka – stopa korbowodu to przykłady dwóch odmiennych konstrukcji połączenia.

Połączenie śruba – wał śrubowy jest wpustowym lub bezwpustowym, wciskowym połączeniem stożkowym realizowanym z hydraulicznym rozszerzaniem piasty. Istnieje niewiele opisów korozji czarnej tego połączenia. Ze względu na zmienne obciążenie skręcające i gnące działające na połączenie korozja czarna może doprowadzić do mikropęknięć, które mogą rozwinąć się w pęknięcie zmęczeniowe wału. Przepisy Towarzystw Klasyfikacyjnych nakazują podczas przeglądów, po demontażu śruby, badania nieniszczące

celem wykrycia mikropęknięć w szczególności na przedniej części stożka wału śrubowego [4].

Połączenie panewka-stopa korbowodu jest połączeniem wciskowym dzielonym w płaszczyźnie przechodzącej przez oś łożyska ślizgowego. Realizowane jest przez połączenie śrubami dzielonego pierścienia zewnętrznego i odpowiednie napięcie wstępne śrub. Model połączenia przedstawiono w [5] na podstawie [6]. Obciążenie działające na złącze jest następstwem sił masowych i gazowych działających na korbówód oraz momentów tarcia między czopem i panewką. W tego rodzaju połączeniach utrata potencjału eksploatacyjnego może być skutkiem albo korozji ciernej w samym połączeniu, albo uszkodzeń innych elementów silnika. Badania własne wskazują, że korozji ciernej może towarzyszyć obrót panewki w obudowie łącznie z niszczeniem wszelkich elementów ustalających położenie panewki w obudowie (stopie korbowodu) oraz że możliwe jest jednoczesne poosiowe przesuwanie panewki w obudowie. W oparciu o przeprowadzone analizy przypadków uszkodzeń można wykazać, że do przesunięcia poosiowego potrzebna zawsze była dodatkowa przyczyna, która spowodowała pojawienie się w łożysku korbowym dodatkowej siły gnącej.

4. Zakończenie

Utrata potencjału eksploatacyjnego połączenia wciskowego następuje najczęściej na skutek korozji ciernej. Korozja może powodować ubytki materiału z powierzchni wspólnej

połączenia i/lub powodować powstawanie mikropęknięć. Mikropęknięcia w obecności zmiennych obciążeń gnących mogą rozwinąć się w przełomy zmęczeniowe. Ubytki materiału mogą doprowadzić do zerwania połączenia, obrotu lub rozłączenia połączenia. Powstanie mikroruchów o amplitudzie umożliwiającej ścinanie wierzchołków nierówności generuje emisję akustyczną oraz wyzwala energię cieplną. Symptodem potencjału eksploatacyjnego połączeń wciskowych wszystkich rodzajów jest emisja akustyczna i wzrost temperatury, a w panewkach symptomem dodatkowym może być obrót lub wysunięcie panewki.

5. Literatura/References

- [1] L. Flöpper: Drang und Zwang. Bd. III, R. Oldenburg, München 1947
- [2] Szymkiewicz Ł.: Budowa stanowiska do pomiaru momentu tarcia w połączeniach wciskowych. Praca dyplomowa, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2007
- [3] Jules B. Njinku: Verschleiß und Ermüdung reibkorrosionsgefährdeter Pressverbindungen bei Umlauf- und Wechselbiegung. Diss. Technische Universität Berlin, Berlin 2009
- [4] PRS Przepisy. Publikacja nr 111/P: Przeglądy okresowe wałów śrubowych. Gdańsk 2017
- [5] Bielawski P. Raunmiagi Z.: Wear margin of functional units with press fits. Advances in Technical Diagnostics-2018, Springer International Publishing, 57-67
- [6] Roemer W.: Die Berechnung des Preßsitzes von Gleitlagerschalen. MTZ 22(1961)2 i 4 Sonderdruck

- 1) dr hab. inż. Maciej Roskosz, prof. nadzw. AGH w Krakowie
- 2) prof. dr hab. inż. Piotr Bielawski, AM w Szczecinie
- 3) dr hab. inż. Jacek Szelażek, prof. nadzw. PAN
- 4) mgr inż. Jędrzej Hlebowicz, Pro Novum Sp. z o.o.
- 5) prof. dr inż. Ryszard Sikora, emerytowany prof. ZUT w Szczecinie
- 6) dr hab. inż. Jarosław Chmiel, prof. nadzw. AM w Szczecinie
- 7) dr hab. inż. Bernard Wichtowski, emerytowany pracownik ZUT w Szczecinie
- 8) dr hab. inż. Jacek Słania, prof. nadzw. IS w Gliwicach
- 9) dr inż. Grzegorz Jezierski, Politechnika Opolska
- 10) dr inż. Michał Kawiak, ZUT w Szczecinie
- 11) dr inż. Adam Sajek, ZUT w Szczecinie
- 12) mgr inż. Marek Lipnicki, Koli Sp. z o.o.
- 13) prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn, PŚL w Gliwicach
- 14) dr hab. inż. Jaromir Mysłowski, ZUT w Szczecinie
- 15) dr inż. Grzegorz Jezierski, Politechnika Opolska