

Model niszczenia zmęczeniowego spawanego połączenia prostopadłych płyt

Fatigue damage of the weld model of perpendicular plates

Streszczenie

Występujące w konstrukcjach statków pęknięcia zmęczeniowe powstają w miejscach szczególnie wrażliwych na obciążenia zmienne, tj. miejscach koncentracji naprężeń, do których należą połączenia spawane. W przypadku zmęczeniowego pęknięcia spawanych konstrukcji złożonych, do których należą konstrukcje kadłubów statku, proces pęknięcia można podzielić na dwa stadia: propagacji pęknięcia w poprzek elementu oraz rozwoju pęknięcia na jego szerokości. Dodatkowo, niektóre z pęknięć zmęczeniowych rozwijają się w sposób niewidoczny i nie mogą być zauważone inspektora nadzoru, ze względu na warunki, w jakich odbywa się inspekcja (statek stojący w doku, świeżo wyłączony z eksploatacji, miejsca podatne na pęknięcia z reguły trudno dostępne, zanieczyszczone w zamkniętych, nieoświetlonych przestrzeniach).

W celu wyjaśnienia mechanizmu powstawania i rozwoju zmęczeniowego niszczenia w złożonych konstrukcjach spawanych przeprowadzono badania zmęczeniowe modelu spawanego połączenia prostopadłych płyt poszycia w modelu węzła konstrukcyjnego statku – decydującym o wytrzymałości kadłuba. Badany model stanowił replikę węzła obłowego (miejsca połączenia burty z dnem) statku, wykonaną w skali zbliżonej do rzeczywistej i poddany był sinusoidalnemu wahadłowemu obciążeniu zmiennemu, które odpowiadało obciążeniu występującemu w konstrukcji rzeczywistej, wywołanemu siłami bezwładności od przyspieszeń konstrukcji poddanej kołysaniu poprzecznemu.

Na podstawie analizy wyników zaproponowano dwustopniowy model niszczenia zmęczeniowego węzła obłowego statku, wg którego opracowano analityczną metodę (kombinację metod odkształceniowych i metod opartych na mechanice pęknięcia) określania trwałości zmęczeniowej złożonych węzłów konstrukcji okrętowych.

Abstract

Occurring in the ship construction fatigue cracks arise in the areas of design are particularly susceptible to changing loads such as acute stress concentration area, which includes the welded joints. For fatigue fracture of welded construction of complex structures which include the hulls of the ship, the process of cracking can be divided into two stages: propagation through the element thickness stage and the stage of crack propagation in the width direction of the element. In addition, some of the fatigue cracks are not visible in the developing process, and as such can not be seen by an observer (inspector), given the conditions in which the inspection (the ship standing in the dock, just out of service, places susceptible to cracking as a rule are hard-contaminated, in a closed, unlit spaces.)

In order to clarify the mechanism of formation and propagation of fatigue damage in the composite structures was carried out fatigue tests of weld of perpendicular plate of the hull of the ship design of node model – determines the strength of the hull on a global scale. The test model was a replica bilge node (ship's side with the bottom side joint) of the ship, made in a scale similar to the actual and subjected to a sinusoidal changing load, which corresponded to the load occurring in the actual structure induced by forces of inertia from the acceleration of the structures subjected to transverse swing.

Based on the analysis results, it is proposed two-stage model of the fatigue ship bilge node damage on which analytical method (a combination of deformation methods and the methods based on fracture mechanics) to determine the fatigue life of complex nodes in the ship structures was proposed.

Wstęp

Kadłuby statków eksploatowane są w ekstremalnie trudnych warunkach. Poddawane są zmiennym obciążeniom wynikającym z falowania morza, sekwencji za- i rozładunku, zmian temperaturowych

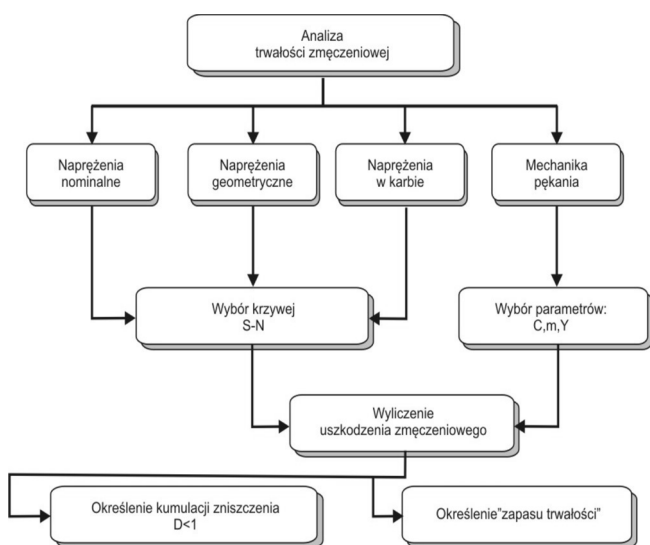
(dzień-noc, zmienne strefy klimatyczne w danym okresie pływania), drgań itp., a także oddziaływania silnie korozyjnego środowiska. Zmienne obciążenia są powodem występowania zmęczeniowego niszczenia konstrukcji statków. Zapewnienie podczas eksploatacji bezpieczeństwa: ludziom, przewożonemu ładunkowi oraz właściwego poziomu ochrony środowiska – wymaga analiz zmęczeniowych na etapie projektowania konstrukcji lub sprawdzania zapasu trwałości zmęczeniowej eksploatowanej konstrukcji w przypadku wykrycia pęknięcia zmęczeniowego określonej długości.

Omawiane pęknięcia zmęczeniowe powstają w rejonach konstrukcji szczególnie wrażliwych na ten rodzaj obciążenia, tj. miejscach koncentracji naprężeń, do których należą obszary zmian kształtu (nieciągłości geometrycznej) elementu konstrukcji, niekiedy dodatkowo spotęgowane obecnością złącza spawanego. Zniszczenie zmęczeniowe analizowanego elementu statku (podobnie jak innych elementów konstrukcji spawanych i/lub części maszyn) i odpowiadającą temu procesowi całkowitą trwałości zmęczeniową (N_C) mierzoną liczbą cykli obciążeń zmęczeniowych można podzielić na okresy: inicjacji (N_i) i okres propagacji (N_p) pęknięcia zmęczeniowego:

$$N_C = N_i + N_p \quad (1)$$

W spawanych konstrukcjach złożonych, do których zaliczamy kadłub statku, analizę ich właściwości zmęczeniowych możemy realizować, stosując (rys. 1):

- w procesach analizy – odpowiednie wykresy Wöhlera $\sigma = f(N)$; w zależności od naprężenia nominalne σ_n , naprężenia *hot spot* σ_{hs} albo naprężenia lokalne w dnie karbu σ_k ;
- możliwości, jakie stwarza zastosowanie zależności $dI/dN = (\Delta K)^m$ na podstawie *liniowej mechaniki pęknięcia* (LMP).



Rys. 1. Metodologia określania właściwości zmęczeniowych elementów konstrukcji zawierającej połączenia spawane [1]

Fig. 1. Methods of determination of the fatigue properties of structural elements with welded joints [1]

Modelowanie rozwoju pęknięcia zmęczeniowego

Wybór metody wynika z celu analizy. Pełną charakterystykę zmęczeniową elementu konstrukcji możemy przedstawić jako sumę charakterystyk cząstkowych, odpowiadających dwóm fazom procesu niszczenia zmęczeniowego, tj.:

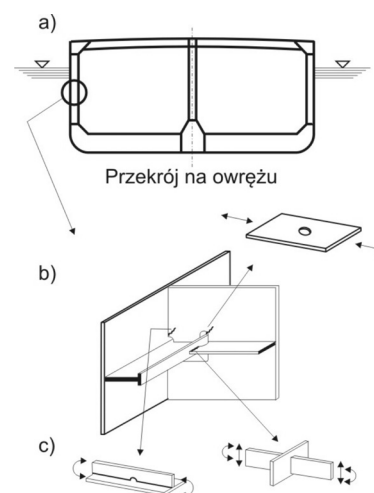
- *fazie inicjacji* – okresu do pojawienia się pęknięcia zmęczeniowego,
- *fazie propagacji* – okresu dalszego stabilnego rozwoju tego pęknięcia do momentu rozpoczęcia niestabilnego rozwoju zmęczeniowego odpowiadającego trwałości całkowitej.

Brak jednoznacznego kryterium zakończenia fazy inicjacji pęknięcia zmęczeniowego (w zależności od celów prowadzonej analizy rozróżnia się tzw. naukowe i inżynierskie kryteria zakończenia inicjacji) skutkuje arbitralnością wyboru metodologii analizy zmęczeniowej przez prowadzących, a tym samym wpływa na zróżnicowanie wyników.

W praktyce analiz zmęczeniowych, w zależności od typu i miejsca, konstrukcji okrętowych oraz skutków wynikających ze sposobu rozwoju pęknięcia zmęczeniowego, przyjęto się określenie *visible crack* (pęknięcie widoczne – rozpoznawalne) długości ok. 2 cali (50 mm) jako wielkości granicznej fazy inicjacji pęknięcia.

W zależności od celów analizy zmęczeniowej, w przypadku obliczania trwałości zmęczeniowej odpowiadającej okresowi inicjacji pęknięć zmęczeniowych wg zależności $\sigma = f(N)$, najczęściej korzysta się z wykresów Wöhlera zaleconych przez przepisy towarzystw klasyfikacyjnych i/ lub badań własnych [2], IIW [3].

Praktyczne analizy zmęczeniowe konstrukcji okrętowej wiąże się z koniecznością odwzorowywania (modelowania) analizowanego fragmentu konstrukcji

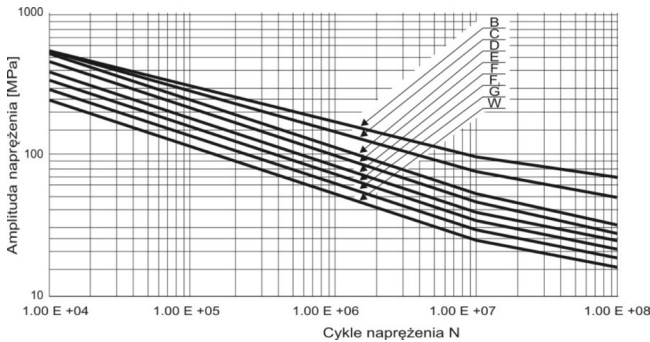


Rys. 2. Przykłady odwzorowywania rzeczywistych połączeń konstrukcji kadłuba statku za pomocą modeli złączy elementarnych na poziomie: a) globalnym, b) lokalnym, c) złączy elementarnego [4]

Fig. 2. An example of mapping the actual construction of the hull of the ship joints with elementary models of joints [4] of: a) global, b) local c) elementary joints

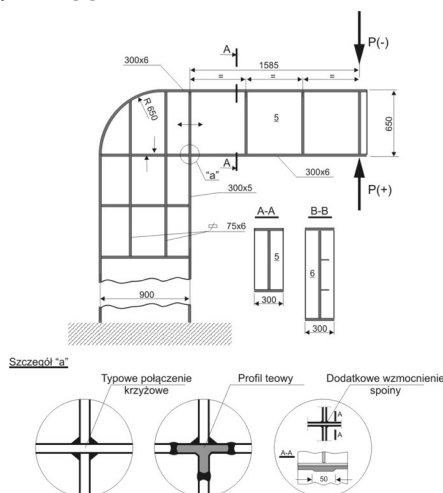
pomocą uproszczonych modeli, w stosunku do których za znane są zależności $\sigma = f(N)$, uzyskane na takich samych modelach jak analizowane i podawane np. w pracach [2, 3].

Na rysunku 2 przedstawiono proces modelowania złączy elementarnych występujących w konstrukcji okrętowej, a na rysunku 3 [4] przykład zależności $\sigma = f(N)$ zalecanych przez przepisy wspólne IACS [2].



Rys. 3. Wykresy Wöhlera dla materiału rodzimego i połączeń spawanych rekomendowane przez IACS [2]

Fig. 3. Wöhler charts for the base metal and welded joints, recommended by IACS [2]



Rys. 4. Model węzła obłowego z warunkami brzegowymi i miejscem przyłożenia obciążenia

Fig. 4. The bilge node model with boundary conditions and the place of load application

Tablica. Warianty rozwiązań konstrukcyjnych badanych modeli węzła obłowego

Table. Variants of design solutions of tested bilge node models

Model	Wariant	Wysokość spoiny	Uwagi
24	standardowy		nieprzetop 6 mm
27	z elementem walcowanym		profil walcowany brak nieprzetopu
28	z napoiną		nieprzetop 6mm napoina na dł. 50mm symetrycznie względem PS

Z wyborem metodologii określania właściwości zmęczeniowych związana jest znajomość sposobu i przebiegu zmęczeniowego niszczenia analizowanej konstrukcji. W przypadku złożonych konstrukcji spawanych nie zawsze jest to możliwe przez założenie *a priori* sposobu ich niszczenia.

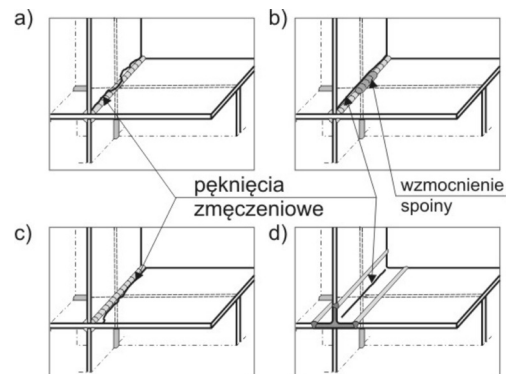
W celu wyjaśnienia mechanizmu powstawania i rozwoju zmęczeniowego niszczenia w złożonych konstrukcjach spawanych przeprowadzono badania zmęczeniowe modelu spawanego połączenia prostopadłych płyt poszycia w modelu węzła konstrukcyjnego statku – decydującym o wytrzymałości kadłuba. Badany model stanowił replikę węzła obłowego (połączenia burty z dnem) kontenerowca i był wykonany w skali zbliżonej do rzeczywistej oraz poddany sinusoidalnemu wahadłowemu obciążeniu zmiennemu, które odpowiada obciążeniu występującemu w konstrukcji rzeczywistej, wywołanemu siłami bezwładności od przyspieszeń konstrukcji poddanej kołysaniu poprzecznemu (rys. 4). Modele wykonano ze stali St 41A, stosując elektrody zasadowe.

Badaniom zmęczeniowym poddano trzy typy modeli, różniących się sposobem rozwiązania konstrukcji połączenia poszycia wewnętrznego dna i wewnętrznej burty podwójnej. W modelach standardowych (24÷26) połączenie dna z burtą zostało wykonane w postaci typowego połączenia krzyżowego ze spoinami o wysokości nieznacznie przekraczającej wysokość wymaganą przez przepisy PRS dla blach o grubości 6 mm (rys. 4, szczegół „a”). W jednym z modeli w miejscu złączy krzyżowego zastosowany został profil teowy walcowany (model 27), a w modelu 28 powiększono wymiary spoiny pachwinowej wokół środka. Warianty badanych modeli przedstawiono w tablicy.

Wyniki badań modelu konstrukcji

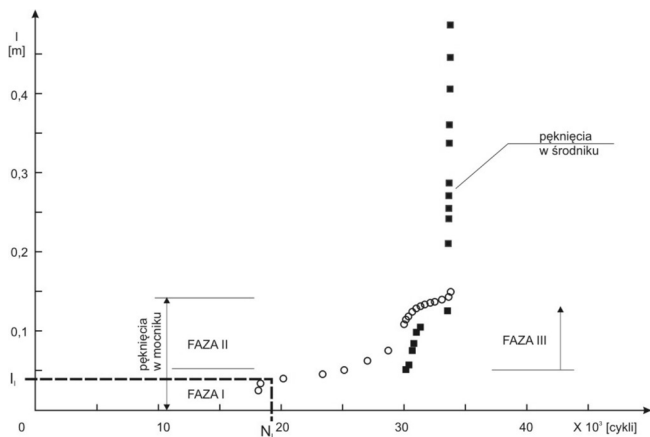
Wszystkie modele węzła obłowego obciążone były zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4.

Podczas badań obserwowano sposób niszczenia badanych modeli oraz rejestrowano rozwój powstających pęknięć zmęczeniowych (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Miejsca inicjacji i dalszy rozwój pęknięć zmęczeniowych w badanych modelach

Fig. 5. The places the initiation and propagation of fatigue cracks in the tested models



Rys. 6. Przebieg rozwoju pęknięć zmęczeniowych w modelu 25
 Fig. 6. The propagation of fatigue cracks in the model no 25

Na podstawie analizy wyników opracowano dwustopniowy (dwufazowy) model sposobu niszczenia zmęczeniowego węzła obłowego statku.

Pojawianie się pęknięć zmęczeniowych zaobserwowano w narożu utworzonym u skrzyżowanie elementu 1 z elementem 2 (rys. 4 – szczegół „a” i 5), w spoinie (2 modele) lub w obszarze spoiny (w miejscu przejścia materiału spoiny w materiał rodzimy – 2 modele), oraz w tym samym rejonie dla modelu z elementem walcowanym w miejscu połączenia spawanego naroża. Powstałe pęknięcia ujawniały się lub były zauważane po osiągnięciu przez nie długości średnio ok. 50 mm (35÷70 mm w zależności od modelu). Dalszy przebieg procesu pęknięcia polegał na ich stabilnym rozwoju w kierunku swobodnych krawędzi mocników. Obok pęknięć w mocnikach (po osiągnięciu przez nich pewnej długości) możliwa była obserwacja pęknięcia środników – po całkowitym pęknięciu mocników pęknięcie środników przybierało charakter lawinowy. Zatem o całkowitej trwałości zmęczeniowej badanych modeli węzłów obłowych konstrukcji okrętowych decydowały dwie fazy:

- faza pierwsza – do momentu pojawienia się pęknięcia interpretowana jako faza inicjacji zniszczenia zmęczeniowego modeli,
- faza druga – stabilnego rozwoju pęknięć w mocnikach, tj. faza propagacji pęknięcia.

Znając przebieg zmęczeniowego niszczenia badanych modeli, podjęto próbę opracowania modelu *a posteriori*, umożliwiającego analityczne określenie trwałości zmęczeniowej podobnych węzłów lokalnych (rys. 2b).

Ponieważ pierwsza faza niszczenia badanych modeli jest analogiczna do zmęczeniowego niszczenia typowych próbek złącza krzyżowego (złącza utworzonego przez spoiny pachwinowe nośne bez przetopu, tworzące tzw. poziom złącza elementarnego – rys. 2c), przyjmuje się, aby trwałość zmęczeniową N_f odpowiadającą okresowi inicjacji pęknięć analizowanych węzłów wyznaczać, stosując wybrane metody określania właściwości zmęczeniowych elementów konstrukcji spośród prezentowanych na rysunku 1, tj.: metodologię naprężeń nominalnych oraz mechaniki pęknięcia.

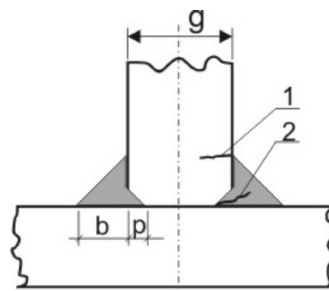
- Zastosowanie tych metod polegało na określeniu:
- wartości naprężeń nominalnych σ_n dla analizowanego złącza elementarnego krzyżowego połączenia spawanego (szerokość złącza 50 mm),
 - wybraniu odpowiednich krzywych zmęczeniowych S-N jako tzw. *krzywych referencyjnych* (rys. 1),
 - określeniu krzywej zmęczeniowej S-N analizowanego złącza przez całkowanie prawa Parisa $dI/dN = C(\Delta K)^m$.

W przypadku analizowanego węzła wartość naprężeń nominalnych σ_n dla elementarnego złącza krzyżowego wyliczono jako wartość średnią na podstawie analizy statycznego rozkładu niejednorodnego pola naprężeń w mocniku węzła określonego na podstawie pomiarów tensometrycznych.

Co do wyboru odpowiednich krzywych referencyjnych, z systematycznych badań złączy krzyżowych wynika, że decydujący wpływ na właściwości zmęczeniowe tego typu złączy ma sposób ich zmęczeniowego niszczenia [5÷8]. Zależy on przede wszystkim od charakterystyki geometrycznej złącza tj. od wartości stosunku wymiarów b/g (gdzie b to długość boku spoiny, g – grubość elementu nieciągniętego) oraz wielkości przetopu p (rys. 7).

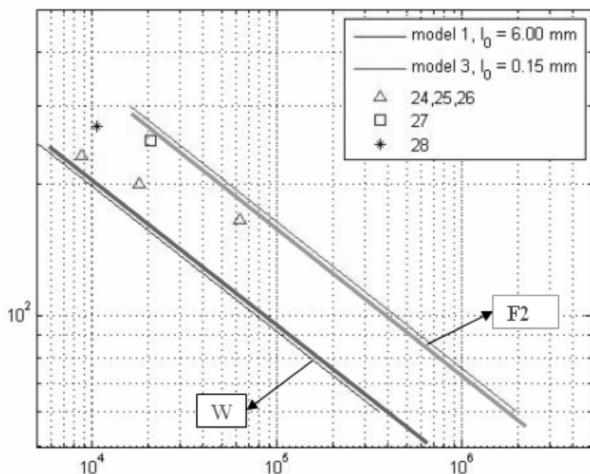
Dla danej wielkości przetopu p istnieje krytyczna wielkość stosunku b/g_{kr} , dla której prawdopodobieństwo zniszczenia zmęczeniowego złącza w wyniku pęknięcia inicjowanego na granicy wtopu spoiny i dalej rozwijającego się w elemencie nieciągniętym (pęknięcie 1) jest równe prawdopodobieństwu zniszczenia w wyniku pęknięcia inicjowanego w grani i rozwijającego się w spoinie (pęknięcie 2). W badanych modelach $b/g \approx 1$, a zatem znajdowały się one w zakresie wielkości krytycznych i tym samym można było oczekiwać, że początek niszczenia węzłów (umowna inicjacja) następować będzie w wyniku pęknięcia typu 1 lub 2, bądź też obu jednocześnie (rys. 7). Potwierdzały to uzyskane wyniki (rys. 5). A zatem trwałość zmęczeniowa rozważanych połączeń w odniesieniu do umownego okresu inicjacji powinna się znajdować w obszarze pomiędzy krzywą klasy F2 (górną granicą obszaru) a krzywą klasy W (dolną granicą obszaru).

Dla określonego typu złącza spawanego, przy jednoczesnej znajomości jego pełnej charakterystyki geometrycznej oraz możliwości przewidywania sposobu jego zmęczeniowego niszczenia, można oszacować jego trwałość zmęczeniową na bazie określenia krzywej zmęczeniowej S-N analizowanego złącza przez



Rys. 7. Charakterystyka geometryczna złącza krzyżowego
 Fig. 7. Geometrical characteristics of cruciform joints

całkowanie prawa Parisa $dI/dN = C(\Delta K)^m$. W analizowanym przypadku całkowanie przeprowadzono w granicach $l_0 = 0,15$ mm dla pęknięcia 1 (model 3, rys. 8) i $l_0 = 6$ mm, dla pęknięcia 2 (długości równej długości nieprzetopu – stopień przetopu $p = 0$, rys. 7). Długość l_{kr} wynikała z ważności funkcji korekcyjnej Y określonej wg [9] i wchodzącej do równania określającego wielkość $\Delta K = M_k Y \{\Delta\sigma(l)\}^{1/2}$. Wielkość współczynnika M_k uwzględniającego niejednorodność rozkładu naprężeń w rejonie inicjacji pęknięcia 1 (rys. 7) przyjęto wg [6], zakładając następujące wielkości: $C = 1,65 \times 10^{-11}$ oraz

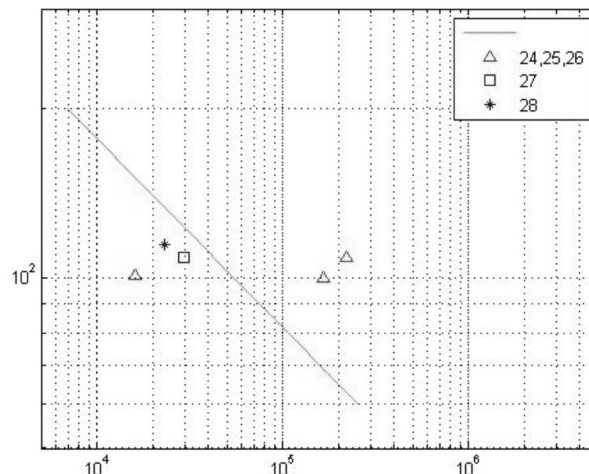


Rys. 8. Porównanie wyników eksperymentalnych z obszarem trwałości zmęczeniowej określonym analitycznie (krzywe F2 i W) oraz obliczonych wg zasad mechaniki pęknięcia

Fig. 8. Comparison of experimental results of fatigue life to the area defined analytically (curves F2 and W) and calculated on the basis of fracture mechanics

$m = 3$, rekomendowane przez BS 7910 do obliczeń projektowych dla stali Mn-C i ich połączeń spawanych.

Wyniki obliczeń wraz z wynikami otrzymanymi na podstawie badań własnych modeli oraz krzywymi odpowiadającymi złączom klas F2 i W przedstawiono na rysunku 8. Przebieg dalszego rozwoju pęknięć zmęczeniowych zamodelowano jak dla płyty ze szczeliną centralną (o długości początkowej $l_0 = 50$ mm), w której pęknięcia rozwijają się w kierunku jej swobodnej krawędzi. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Porównanie okresu propagacji pęknięć w badanych modelach z wynikami otrzymanymi eksperymentalnie

Fig. 9. Comparison of the period of crack propagation in the tested models with the results obtained experimentally

Wnioski

Właściwości (charakterystyki) zmęczeniowe złożonych, spawanych węzłów konstrukcji okrętowych, można skutecznie określać za pomocą metod analitycznych będących ich kombinacją (kombinacją metod naprężeniowych oraz opartych na mechanice pęknięcia). Warunkiem wstępnym właściwego zastosowania

określonej metody analitycznego wyznaczania charakterystyk złożonej konstrukcji jest znajomość sposobu jej zmęczeniowego niszczenia.

Uzyskano dobrą zgodność wyników eksperymentalnych z wynikami otrzymanymi metodami analitycznymi, szczególnie w zakresie początkowej fazy niszczenia.

Literatura

- [1] Materiały na „Technical Meeting” RISPECT Project – PARIS November 2009.
- [2] IACS Common Structural Rules – 2008.
- [3] Hobbacher A.F.: The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components. A comprehensive code recently updated. International Journal of Fatigue. Article in press.
- [4] SSC 369 – Reduction of S-N curve for ship structural details 1993.
- [5] Maddox S. J.: Status Review on Fatigue Performance of Fillet Welds – Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, August 2008.
- [6] Zhang You-hui, Maddox S.: Fatigue life prediction for toe welded joints – International Journal of Fatigue 31, 2009.
- [7] Gurney T.R.: Zmęczenie konstrukcji spawanych – WNT, Warszawa 1975.
- [8] Kainuma S., Mori T: A fatigue strength evaluation method for load-carrying fillet welded cruciform joints – International Journal of Fatigue 28, 2006.
- [9] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych, PW, Wyd. III, Warszawa 1997.

Podziękowania

Niniejsze opracowanie zostało oparte na wynikach prac realizowanych w ramach projektu RISPECT finansowanego przez VII PR Unii Europejskiej w ramach kontraktu SCP7-GA-2008-218499.