

## EUROPEJSKIE PROCEDURY FITNET PRZYKŁADEM TRANSFORMACJI WIEDZY W BUDOWIE I EKSPLOATACJI MASZYN

Streszczenie

*W pracy przedstawiono podstawowe problemy nauki o zmęczeniu materiałów i konstrukcji, transfer osiągnięć nauki do praktyki oraz perspektywy rozwoju nauki o zmęczeniu. Opóźnienia w zastosowaniach osiągnięć nauki w praktyce wymagają intensyfikacji wysiłków w opracowaniach aktów normatywnych do projektowania złożonych obiektów technicznych. Przykładem takiego opracowania są procedury FITNET opracowane z inicjatywy Unii Europejskiej.*

### 1. Wprowadzenie

Intensywny rozwój techniki w okresie tzw. rewolucji przemysłowej, która w istocie była rewolucją maszynową, stawiał przed jej twórcami nowe zadania w obszarze badań stosowanych. W tym okresie pojawia się nowa dziedzina badań badania zmęczenia, co znamienne, najpierw elementów konstrukcyjnych i elementów maszyn (praca W.A.J. Alberta w 1829 r. poświęcona wytrzymałości łańcuchów stosowanych w kopalniach węgla kamiennego i badania W.J.M. Rankine'a w 1843 r. poświęcona badaniom osi wagonowych), a następnie badań materiałów. Pierwsze kryteria wytrzymałości zmęczeniowej elementów maszyn wykonanych z żeliwa i nitowanych elementów konstrukcyjnych ze stali sformułował Fairbairn w 1864 r. Rozległe i systematyczne badania wytrzymałości zmęczeniowej materiałów stosowanych w budowie maszyn prowadził w Niemczech w latach 1858 do 1870 inżynier w zakładach kolejowych we Frankfurcie nad Odrą A. Wöhler. W dziesięć lat później C. Bach wydał słynną książkę pt.: „Elementy maszyn” wydaną 12-krotnie, w której rozdział o zmęczeniu zawiera pierwsze szerokie zestawienie naprężeń dopuszczalnych dla podstawowych metali. Od tego czasu problematyka zmęczenia na trwałe związana jest z nauką o konstruowaniu maszyn. W Polsce są to m.in. podręczniki: W. Mozyńskiego [15, 16], praca zbiorowa pod redakcją J. Dietrycha [7], seria podręczników z podstaw konstrukcji maszyn pod redakcją: A. Dziamy, A. Jankowskiej, W. Kaniewskiego, Z. Osińskiego, M. Warszńskiego i J. Wróbla, w której zmęczeniu poświęcona jest książka [13] i podręcznik pod redakcją M. Dietricha [6], które w całości lub w obszernych rozdziałach zawierają opis metod obliczeniowych i metod badań zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych.

Wysoki stopień trudności problematyki zmęczeniowej polega na tym, że do tej pory brak zwięzłej teorii zmęczenia materiałów, jest to zatem nauka eksperymentalna, która wykorzystuje w opisach elementy teorii sprężystości i plastyczności oraz związku z nauką o materiałach.

Zmęczeniem można nazwać złożony splot zjawisk zachodzących w materiale wywołany zmiennymi w czasie obciążeniami, zależny od tych obciążeń i czasu ich trwania. Zjawiska te powodują określone zmiany zmęczeniowe, które sumują się aż do pęknięcia zmęczeniowego elementu [12].

Zmęczenie jest w związku z tym w początkowej fazie, problemem lokalnym dotyczącym mikroobjętości materiału, w końcowej fazie jest problemem „globalnym” związanym z całkowitym zniszczeniem często złożonych, wielkogabarytowych struktur.

Celem podstawowym nauki o zmęczeniu materiałów i konstrukcji jest rozpoznanie i opis procesu zmęczenia, stanowiące podstawę budowy bezpiecznych maszyn i urządzeń. Podstawowym problemem, jest ocena trwałości zmęczeniowej

elementów konstrukcyjnych w złożonych warunkach eksploatacji.

Trwałość zmęczeniowa, podobnie jak niezawodność, bezpieczeństwo, itd., jest cechą eksploatacyjną obiektu, która jednakże kształtowana jest w procesie projektowo-konstrukcyjnym, a zatem problematyka zmęczenia jest problematyką interdyscyplinarną obejmującą wszystkie fazy istnienia obiektu od projektowania, poprzez konstrukcję, procesy wytwarzania i eksploatację do likwidacji.

Ze względu na probabilistyczny charakter własności zmęczeniowych obiektu (własności materiału, losowy rozkład cech geometrycznych i dynamicznych) oraz probabilistyczny charakter warunków eksploatacji (obciążenia, oddziaływania środowiska korozja, promieniowanie itp.) proces zmęczenia jest złożonym procesem stochastycznym.

Wskazana złożoność sprawia, że mimo ogromnych nakładów na badania, licznych laboratoriów badawczych na całym świecie, progresywnie rosnącej liczby programów badawczych, proces zmęczenia nie został dotąd zadowalająco opisany, a osiągnięcia naukowe w tym zakresie w małym stopniu zostały wdrożone do praktyki przemysłowej.

Poważne katastrofy lotnicze, statków morskich, platform wydobywczych ropy naftowej, mostów stalowych, pojazdów drogowych oraz maszyn roboczych w tym rolniczych, wskazują na aspekty humanitarne i ekonomiczne problematyki zmęczeniowej. Pomijając oczywiste, często trudne do obiektywnej oceny, skutki katastrof, w których giną setki osób czy podlega skażeniu środowisko naturalne na znacznych obszarach, interesująca jest ocena strat ekonomicznych spowodowanych pęknięciami zmęczeniowymi. W badaniach uszkodzeń dużej liczby pojazdów stwierdzono, że 60% katastrof drogowych spowodowanych było pęknięciami zmęczeniowymi [18]. Ogólny efekt pęknięć zmęczeniowych w USA zamykał się stratami 99 mld dolarów rocznie. W ocenie specjalistów zastosowanie wiedzy z zakresu zmęczenia mogłoby zredukować te straty do poziomu 29 mld dolarów [9]. Japońskie linie lotnicze wykazały, że koszt napraw (w tym pęknięć zmęczeniowych) i obsługi swoich Boeing'ów 747 były porównywalne z ich ceną, głównie napraw uszkodzeń powstałych z przyczyn projektowych [11].

### 2. Podstawowe problemy nauki o zmęczeniu materiałów i konstrukcji

Jak wskazano w rozdz. 1 problematyka zmęczenia materiałów i konstrukcji jest interdyscyplinarna.

Analiza tematyki referatów wygłoszonych na konferencjach naukowych umożliwia sformułowanie podstawowych problemów, z których ważniejsze to: mikrostrukturalne zmęczenie, inicjacja i rozwój krótkich pęknięć, projektowanie mikrostruktur ze względu na odporność zmęczeniową,

zmęczenie biomateriałów, zmęczenie w wysokich temperaturach, zmęczenie w warunkach obciążenia wieloosiowego, analiza stanu naprężenia i odkształcenia w lokalnych obszarach spiętrzenia naprężeń (efekt działania karbu) w warunkach obciążenia cyklicznego, własności zmęczeniowe kompozytów z matrycami metalowymi i polimerowymi, zmęczenie materiałów ceramicznych i kompozytów z matrycą ceramiczną, zmęczenie materiałów warstw ślizgowych łożysk, zmęczenie przy wysokich częstotliwościach, czynniki rozwoju pęknięć zmęczeniowych wartości progowe i krytyczne, hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w ujęciu naprężeniowym, odkształceniowym i energetycznym, numeryczna analiza zmęczeniowa (zastosowanie MES i MEB), makropęknięcia i konstruowanie ze względu na dopuszczalne uszkodzenia zmęczeniowe, pęknięcia powierzchniowe (zużycie zmęczeniowe) w warunkach zmiennych nacisków powierzchniowych i w warunkach smarowania elastohydrodynamicznego, korozja zmęczeniowa, analiza eksploatacyjnych obciążeń zmęczeniowych, stochastyczne hipotezy zmęczeniowe i probabilistyczne metody obliczeń trwałości, metody doświadczalne wyznaczania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, zmęczenie konstrukcji lotniczych, okrętowych, oceanotechnicznych, energetycznych w tym energetyki jądrowej (wpływ promieniowania na własności zmęczeniowe materiałów), elementów pojazdów mechanicznych, maszyn roboczych ciężkich, maszyn górniczych, hutniczych, rolniczych itd., techniki doświadczalne i instrumentaria badawcze, zmęczeniowe bazy danych.

Szeroka lista problemów zmęczeniowych nie wyczerpuje w pełni nawet tych z grupy istotnych dla dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn np. związków nauki o zmęczeniu z nauką o niezawodności maszyn i urządzeń, bezpieczeństwie, diagnostyce, z problematyką technologiczną w tym inżynierią powierzchni itd.

### 3. Transfer osiągnięć nauki do praktyki konstruktorskiej

Związki nauki z praktyką (techniką) są historycznie bardzo dawne, różnorodne i podlegają analizom w różnych aspektach, łącznie z polityką państwa w tym zakresie. Wiele wątków w tej problematyce znaleźć można w monografii [14]. W tym punkcie zamieszczone będą jedynie krótkie uwagi na ten temat głównie związane z czasem zastosowań osiągnięć nauki w praktyce i przykładem procedur obliczeniowych FITNET.

Najkrótszą drogą transferu są programy współpracy instytucji naukowych z przemysłem, w ramach których określone badania stosowane i prace projektowo-badawcze, realizowane są przez instytucje naukowe (w których znaczny udział stanowią ośrodki akademickie w Polsce, dominujący).

Podobnie wysoką sprawność w zastosowaniach osiągnięć nauki w praktyce posiadają jednostki badawczo-rozwojowe, prowadzące oprócz badań stosowanych także badania podstawowe.

Czas transformacji istotnie się wydłuża w przypadku samodzielnego stosowania osiągnięć nauki w tzw. zapleczu badawczym przemysłu, w praktyce biur projektowo-konstrukcyjnych i technologicznych.

Niepokojąco długi czas przejmowania osiągnięć nauki o zmęczeniu materiałów i konstrukcji obserwuje się w tworzeniu przepisów normatywnych: norm państwowych i branżowych, przepisów towarzystw klasyfikacyjnych, dozoru technicznego itd., które to instytucje w formie przepisów określają warunki projektowania złożonych obiektów technicznych. Przykładem w tym zakresie mogą być przepisy towarzystw klasyfikacyjnych w okrętownictwie. W roku 1998 Polski Rejestr Statków, wzorem innych dominujących towarzystw

zagranicznych, wprowadził przepisy [19] określające wymogi projektowania kadłubów statków, obejmujące zmęczeniowe pękanie tych struktur. Problem pęknięć zmęczeniowych kadłubów statków (niektóre zakończone katastrofami morskimi) znany był od dawna, nasilał się w okresie budowy wielkich masowców, tankowców i promów (statki o długości ponad 200 m). Drogą przeciwdziałania zmęczeniowemu pękaniu było przyjmowanie wysokich współczynników bezpieczeństwa, co prowadziło do obniżania poziomu naprężeń nominalnych, zaniedbując lokalne stany spiętrzenia naprężeń i w ogólności było metodą nieskuteczną. Wymieniony sposób był ujęciem wytrzymałościowym w sytuacji, gdy problem zmęczeniowego pęknięcia jest problem trwałościowym.

Poważną przeszkodą w zastosowaniu metod obliczeniowych na zmęczenie elementów konstrukcyjnych, szczególnie wykonanych spawaniem, jest brak danych dotyczących własności zmęczeniowych materiałów i różnego rodzaju złączy spawanych. Lukę w tym zakresie wypełniają tzw. wykresy projektowe [20] opracowane przez różne instytucje m.in. International Institute of Welding (IIW) [20], American Petroleum Institute (API) [1], American Welding Society (AWS) [21], UK Department of Energy (DOE) [17], British Standard Code of Practice (BS76080) [4], Det Norske Veritas (DNV) [5].

Poważnym krokiem w kierunku praktycznych zastosowań wyników badań naukowych w projektowaniu maszyn i elementów konstrukcyjnych są procedury FITNET, opracowane pod auspicjami Unii Europejskiej. Procedury te mają ogólny charakter i mogą być stosowane w różnych dziedzinach przemysłu m.in. w przemyśle maszyn rolniczych, pojazdów mechanicznych i maszyn roboczych ciężkich. Ze względu na uniwersalny charakter procedur FITNET, w następnych punktach zostaną one scharakteryzowane, a metody obliczeń zilustrowane będą opisem ścieżek dotyczących obliczeń na zmęczeniowe pękanie elementów konstrukcyjnych.

## 4. Procedury FITNET

### 4.1. Ogólna charakterystyka procedur FITNET

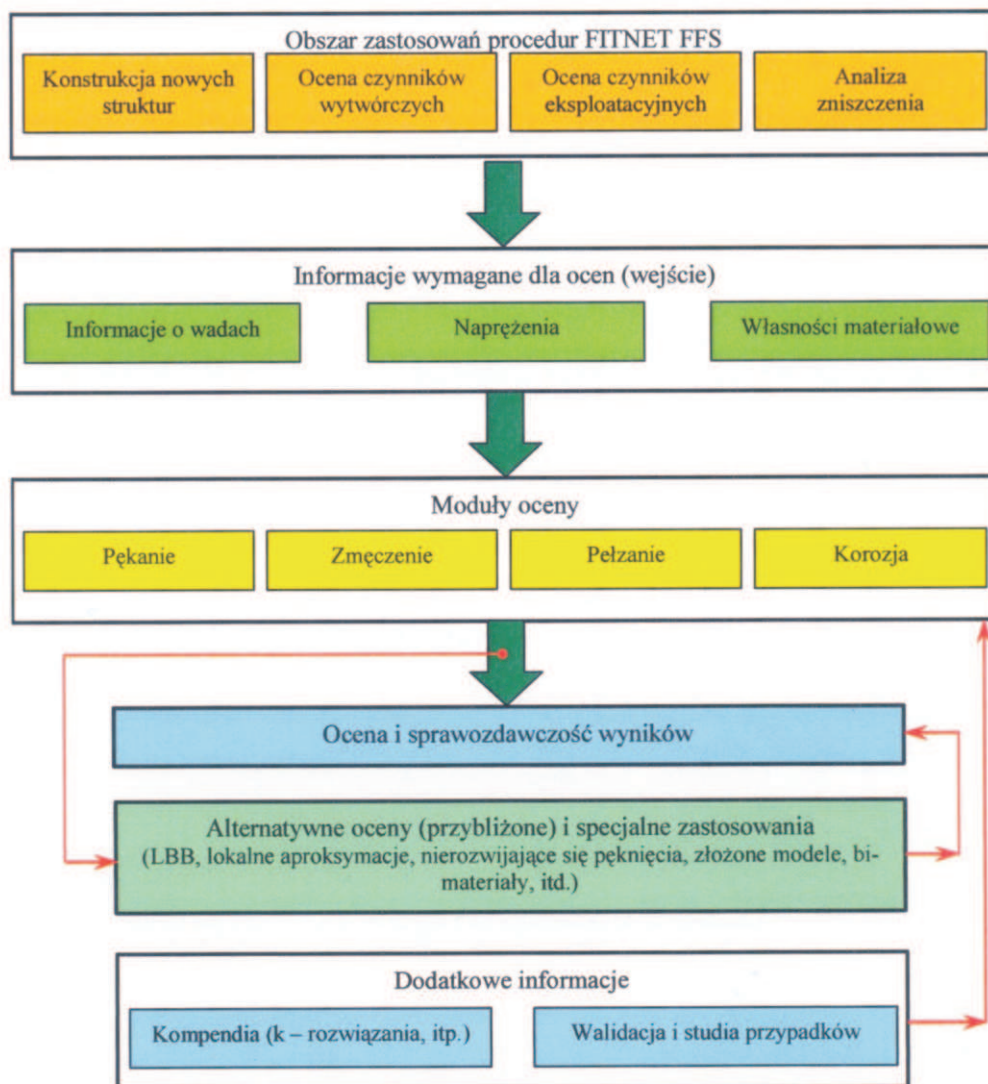
European Fitness-for-service Network (FITNET) opracowane przez European Fitness-for-service Thematic Network, to obszerne opracowanie (359 stron) procedur obliczeniowych ujętych w czterech podstawowych modułach: mechanika pęknięcia (Fracture Module), zmęczenie (Fatigue Module), pełzanie (Creep Module) i Korozja (Corrosion Damage Module).

Poza wymienionymi podstawowymi modułami opracowanie zawiera na wstępie, spis literatury, pojęcia podstawowe i definicje oraz wykaz symboli. Podstawowe moduły poprzedzone są obszernym rozdziałem (42 str.) zawierającym podstawowe informacje dotyczące: naprężeń, obciążeń, metody elementów skończonych, własności materiałowych oraz podstawowych zależności stosowanych w obliczeniach elementów maszyn i konstrukcji.

Po omówieniu podstawowych modułów zamieszczono trzy rozdziały poświęcone wybranym problemom: oceny i opracowania wyników, alternatywnych i specyficznych obliczeń na pękanie oraz dodatkowych informacji dla obliczeń w zakresie mechaniki pęknięcia.

Integralną częścią procedur są obszerne dodatki (524 str.) obejmujące następujące zagadnienia:

- metody wyznaczania współczynników intensywności naprężeń (WIN) dla różnej klasy elementów konstrukcyjnych (wały, złącza spawane, rury, cylindry i płyty),



Rys. 1. Zakres zastosowań procedur FITNET FFS [20]  
 Fig. 1. Application areas of FITNET FFS [20]

- metody wyznaczania granicznych obciążeń,
- dane dotyczące naprężeń własnych w złączach spawanych i kručach zbiorników,
- metody wykrywania wad i zakresów ich zastosowań w tym dla pęknięć zmęczeniowych,
- modelowanie wad i interakcje wielu wad,
- klasy FAT do wyznaczania projektowych wykresów zmęczeniowych,
- założenia do ocen prawdopodobieństwa uszkodzeń i niezawodności, opis filozofii: bezpiecznej trwałości, bezpiecznego uszkodzenia i tolerancji uszkodzenia,
- wpływ niewspółosiowości w złączy spawanym.

Schemat blokowy obszarów zastosowań procedur FITNET FFS pokazano na rys. 1.

Z przedstawionej charakterystyki procedur FITNET wynika szeroki zakres problematyki, który przekracza ramy artykułu. Z tego powodu istnieje konieczność ograniczenia problematyki do wybranych zagadnień. W tym opracowaniu omówieniu podlegają wybrane zagadnienia z modułu „zmęczenie”, jako przykładu reprezentatywnego dla wszystkich modułów.

#### 4.2. Moduł „zmęczenie”

Moduł „zmęczenie” obejmuje zbiór ścieżek obliczeń dla oceny zmęczeniowych uszkodzeń, zależnych od zmiennych

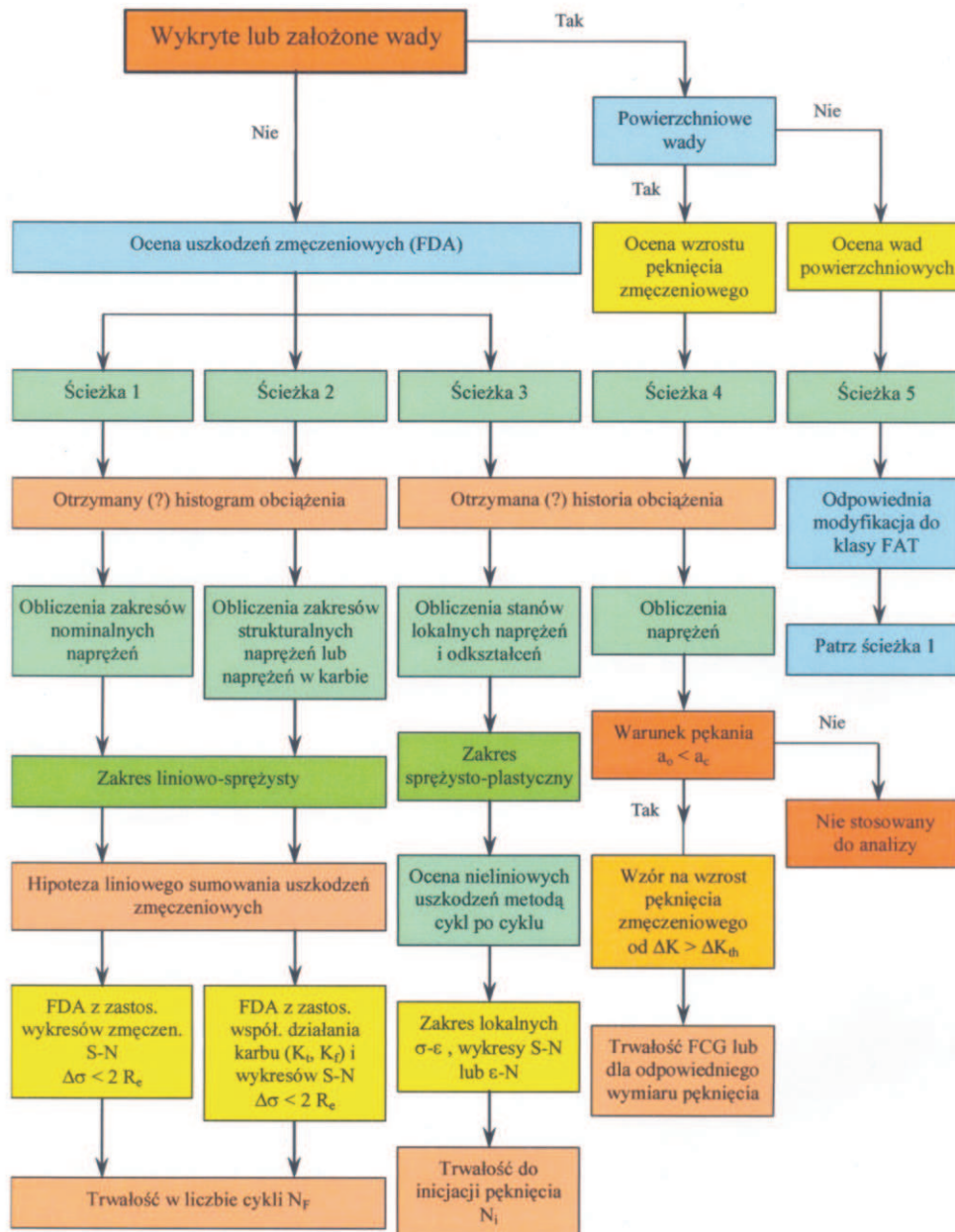
obciążeń. Rozpatrywane są dwa podstawowe scenariusze:

- kumulacja uszkodzeń w krytycznych obszarach, w których inicjują się pęknięcia (ścieżka 1, 2 i 3),
- ocena trwałości zmęczeniowej w elementach z wadami rzeczywistymi lub założonymi (ścieżka 4 i 5).

Schemat podstawowych kroków w ścieżkach oceny zmęczenia w procedurach FITNET przedstawiono na rys. 2.

Poniżej omówione zostaną poszczególne ścieżki ze wskazaniem literatury, w której czytelnik znajdzie szersze omówienie poszczególnych zagadnień oraz doświadczalne podstawy opisywanych metod obliczeń.

Ścieżka 1 obejmuje procedury obliczeń elementów spawanych i niespawanych z zastosowaniem nominalnych naprężeń obliczanych według znanych zależności w zakresie liniowo-sprężystym. W ścieżce tej zakłada się, że w obliczanych elementach nie występują wady (1 stopień analizy). W 2. stopniu analizy, na podstawie warunków eksploatacji, wyznacza się zakresy zmian nominalnych naprężeń  $\Delta s_n$ , które powinny spełniać warunek  $\Delta s_n < 2 R_c$ . W 3. stopniu ocenie podlegają warunki eksploatacji ze względu na korozję i wysoką temperaturę. W przypadku stwierdzenia istotnego wpływu wymienionych czynników, dalsze obliczenia prowadzi się według modułów „pełzanie” lub „korozja”-procedur FITNET.



Rys. 2. Podstawowe stopnie analizy zmęczeniowej w ścieżkach FITNET [20]  
 Fig. 2. Basic steps in FITNET fatigue assessment routes [20]

W 4. stopniu następuje sprawdzenie warunku granicy zmęczenia. Jeśli zakres zmian naprężeń jest mniejszy od granicy zmęczenia obliczeń zmęczeniowych się nie prowadzi, przyjmując nieograniczoną trwałość zmęczeniową analizowanego elementu.

Istotne znaczenie w analizie ma 5. stopień w którym z odpowiedniej tabeli zamieszczonej, w publikacji FITNET dobieramy odpowiednią klasę elementu konstrukcyjnego, odpowiadającą elementowi analizowanemu i ze zbioru wykresów zmęczeniowych, przyjmujemy do obliczeń odpowiedni.

Kolejne stopnie 6 i 7 zawierają odpowiednio ocenę wpływu współczynnika asymetrii cyklu R oraz wpływ grubości ścianek elementów spawanych.

Stopień 8. dotyczy obliczeń trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem: wyznaczonego w stopniu 2. rozkładu zakresów zmienności naprężeń  $\Delta S_n$  (histogram obciążeń), przyjętego wykresu zmęczeniowego S-N w stopniu 5. oraz z zastosowaniem liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń. Szerokie omówienie doświadczalnej weryfikacji tej hipotezy i zakresu

jej stosowania znaleźć można w pracy [22]. Rezultatem końcowym obliczeń jest ocena trwałości zmęczeniowej analizowanego elementu konstrukcyjnego spawanego.

Podobny przebieg posiada analiza elementów maszyn lub konstrukcji bez spoin. Różnica w procedurze obliczeń polega na tym, że wykresy zmęczeniowe dla poszczególnych przypadków konstruuje się indywidualnie według zaleceń FITNET, oraz w obliczeniach uwzględnia się efekt działania karbu (współczynniki  $K_t$  i  $K_f$ ), współczynnik wielkości przedmiotu ( $K_s$ ), współczynnik stanu powierzchni ( $K_s$ ) oraz naprężenia średnie  $\sigma_m$ .

W ścieżce 2. analiza trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych spawanych i bez spoin, niezawierających wad, jest podobna do analizy opisanej w ścieżce 1. Najistotniejsza różnica pomiędzy wymienionymi ścieżkami polega na tym, że w ścieżce 2. podstawą analizy są naprężenia konstrukcyjne (hot spot i efektywne naprężenia w karbie).

W przypadku obciążeń losowych i obciążeń ze zmienną amplitudą wyznacza się odpowiednie histogramy zakresów

zmian naprężeń konstrukcyjnych i naprężeń w karbie. Dla ścieżki 2. obowiązuje także warunek  $\Delta S < 2 R_s$ , a wynikiem analizy jest trwałość zmęczeniowa elementu konstrukcyjnego.

W ścieżce 3. analiza zmęczeniowa dotyczy także elementów konstrukcyjnych nie posiadających wad i oparta jest na podejściu lokalnym. Podejście to polega na tym, że do obliczeń trwałości zmęczeniowej do inicjacji pęknięcia, przyjmujemy przebieg obciążenia eksploatacyjnego zachowując historię obciążenia, odniesioną do strefy potencjalnej inicjacji pęknięcia (lokalne wartości naprężenia i odkształcenia). Ścieżkę 3. stosuje się zatem do sprężysto-plastycznego stanu materiału elementu konstrukcyjnego w strefie pęknięcia.

Analiza ścieżki 3. obejmuje 6 stopni:

- 1) ocenę braku wad w elemencie konstrukcyjnym,
- 2) przedstawienie eksploatacyjnych obciążeń w postaci naprężeniowo-odkształceniowych zakresów,
- 3) ocena wpływu środowiska (temperatura, korozja),
- 4) ocena granicy zmęczenia,
- 5) wyznaczenie wykresów zmęczeniowych w zakresie sprężysto-plastycznym,
- 6) obliczenia trwałości zmęczeniowej elementu konstrukcyjnego z zastosowaniem liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń i wykresu Mansona-Coffina ( $\epsilon-N$ ).

Analizę w stopniach: 1, 3, 4 i 6 przeprowadza się podobnie jak w ścieżkach 1 i 2. z uwzględnieniem odpowiednich warunków.

Obliczenia według procedur opisanych w ścieżce 3. prowadzi się metodą „cykl po cyklu”, a ściślej metodą „półcykl po półcyklu”. Zwykle z pomiarów obciążenia eksploatacyjnego otrzymuje się przebieg nominalnych naprężeń w funkcji czasu. Przebieg ten należy przetransformować na przebieg lokalnych odkształceń w strefie potencjalnego pęknięcia. Do tego celu można zastosować metody obliczeniowe analityczne i numeryczne (MES) lub metody

doświadczalne. Szeroki przegląd tych metod przedstawiono w pracy [3]. W procedurach FITNET proponuje się metodę Neubera, analitycznego obliczenia lokalnych naprężeń i odkształceń, jest to metoda najbardziej konserwatywna ze znanych metod wyznaczania lokalnych naprężeń i odkształceń.

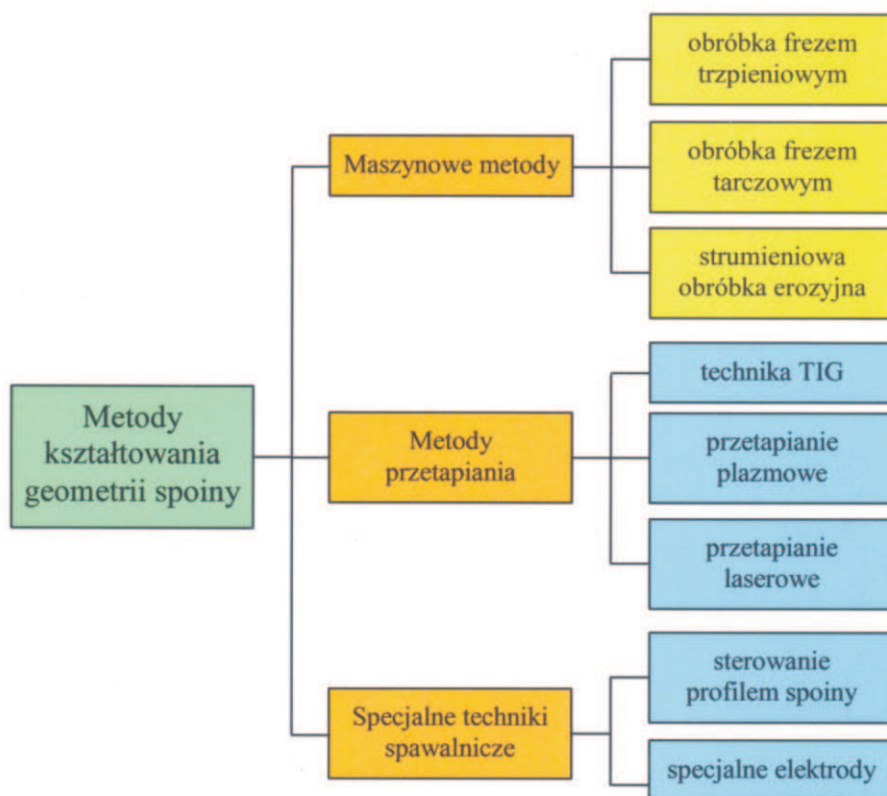
Ścieżka 4. stosowana jest w przypadku, gdy element konstrukcyjny posiada powierzchniowe wady, od których rozwija się pęknięcie zmęczeniowe. Celem analizy z zastosowaniem ścieżki 4. jest wyznaczenie trwałości w fazie wzrostu pęknięcia zmęczeniowego do wymiaru granicznego (dopuszczalnego). Charakterystyka wad powierzchniowych zawarta jest w dodatkach D i E do procedur FITNET i ich określenie stanowi 1. stopień analizy.

W 2. stopniu analizy należy ustalić warunki eksploatacji, szczególnie historię obciążenia oraz ustalić przypadek pęknięcia (I, II czy III).

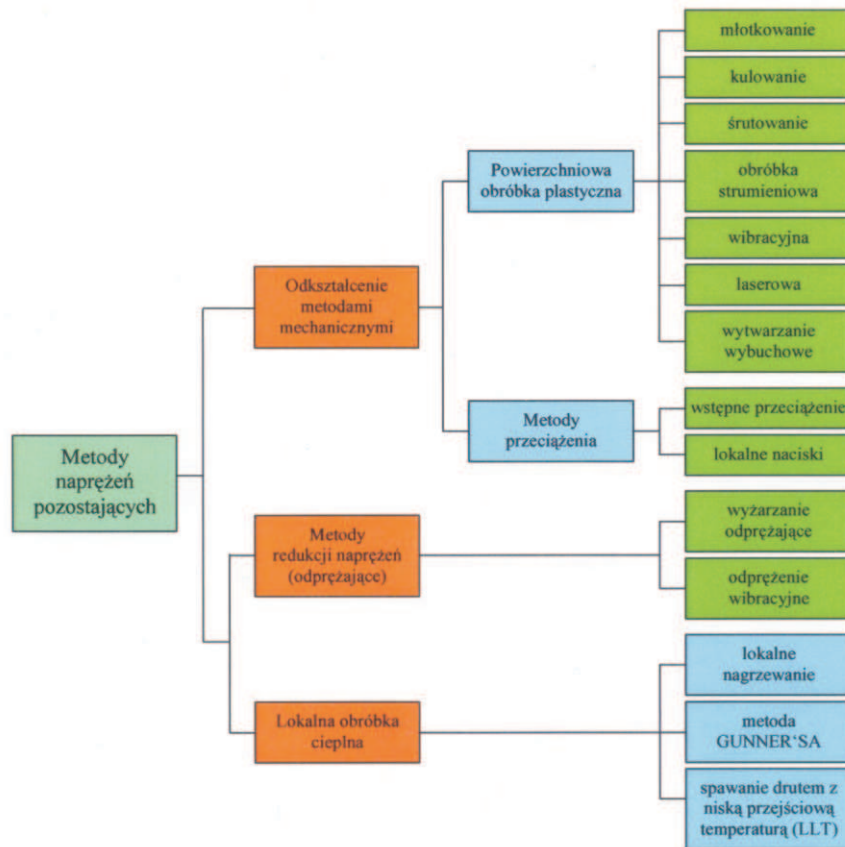
Podobnie jak w poprzednich ścieżkach, analizie podlegają czynniki środowiskowe. W stopniu 4. gromadzi się dane materiałowe potrzebne do obliczeń i przeprowadza się analizę naprężeń. Trwałość zmęczeniową oblicza się przez całkowanie wzorów na prędkość rozwoju pęknięcia wg Parisa lub Formana-Mettu (stopień 6), po sprawdzeniu warunku, że współczynnik intensywności naprężeń ( $\Delta K_{max}$ ) mieści się w przedziale pomiędzy progową wartością ( $\Delta K_{th}$ ) i odpornością na pęknięcie ( $\Delta K_{ic}$ ) stopień 5.

Dane o wadach i sposobach ich wykrywania metodami nieniszczącymi zawarte są w dodatku D, natomiast rozwiązania dla współczynnika intensywności naprężeń ( $\Delta K$ ) zamieszczono w dodatku A do procedur FITNET.

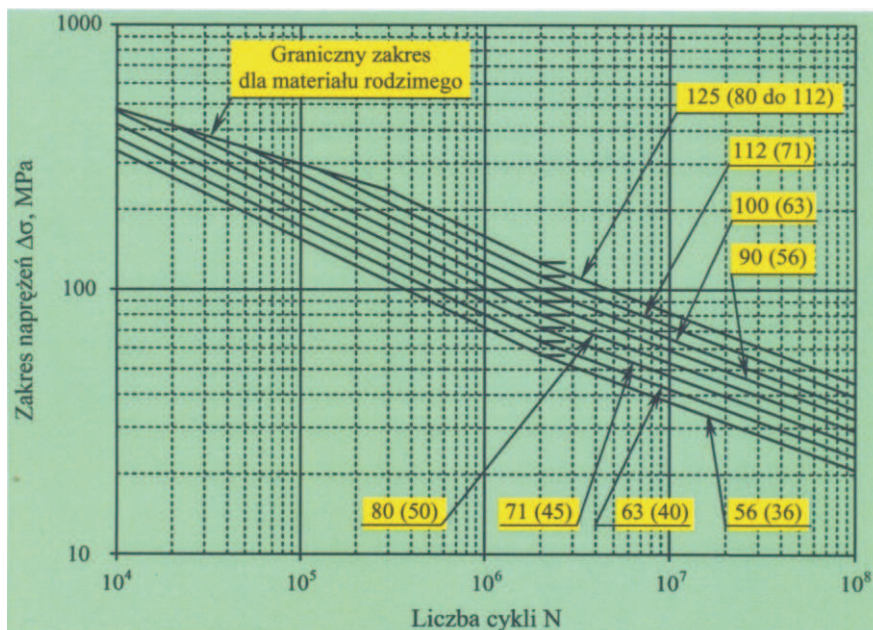
Bardziej skomplikowanym przypadkiem jest ocena trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z wadami podpowierzchniowymi (ścieżka 5). W zależności od ich postaci, wymiarów oraz usytuowania w elemencie konstrukcyjnym, analizę prowadzi się według ścieżki 4 lub ścieżek 1 i 2 przyjmując odpowiednie projektowe wykresy zmęczeniowe (FAT).



Rys. 3. Techniki redukcji wartości współczynnika koncentracji naprężeń [20]  
Fig. 3. Techniques for reduction of stress concentration factors [20]



Rys. 4. Techniki modyfikacji naprężeń własnych [20]  
 Fig. 4. Techniques for modification of residual stress [20]



Rys. 5. Zmęczeniowe wykresy projektowe dla stalowych złączy spawanych umocnionych młotkowaniem [20]  
 Fig. 5. Design curve for hammer peened welds in steel structures [20]

#### 4.3. Zagadnienia zwiększenia trwałości przez zabiegi technologiczne

Zagadnienia podwyższania trwałości zmęczeniowej opisane w procedurach FITNET dotyczą wzrostu dopuszczalnych naprężeń zmęczeniowych w nowych konstrukcjach oraz w odpowiedniej technologii napraw i udoskonalania istniejących konstrukcji spawanych. Proponowane metody mają zastosowanie jedynie do 1. i częściowo 2. ścieżki analizy zmęczeniowej, opisanej w rozdz. 4.2. W ścieżce 2

ograniczone są do strukturalnych naprężeń hot spot, natomiast nie mają zastosowania do metody analizy opartej na efektywnych naprężeniach w karbie. Opis dotyczy dwóch grup technik: technik redukcji współczynnika koncentracji naprężeń oraz technik modyfikacji naprężeń spawalniczych. Techniki pierwszej grupy przedstawiono na rys. 3, natomiast techniki drugiej grupy na rys. 4. Wymienione na rys. 4 techniki są znane, natomiast nie znane są dane o własnościach zmęczeniowych modyfikowanych elementów konstrukcyjnych.

Ważnym elementem procedur FITNET jest zastosowanie

wykresów projektowych dla wymienionych grup technik zwiększenia trwałości stosowanych bezpośrednio w obliczeniach trwałości konstrukcji spawanych. Przykład zestawienia wykresów projektowych dla młotkowanych spoin w stalowych elementach konstrukcyjnych, pokazano na rys. 5. Numery wykresów FAT podane w nawiasach, wskazują rodzaj elementu przed obróbką. Z porównania wartości podanych na wykresach i zamieszczonych w nawiasach wynika znaczny wzrost wytrzymałości zmęczeniowej elementów po obróbce sięgający 1,6 raza.

Liczby podane na wykresach (bez nawiasów) oznaczają wytrzymałość zmęczeniową odpowiedniego połączenia spawanego dla  $N=2 \cdot 10^6$  cykli. Rodzaje połączeń odpowiadające poszczególnym wykresom projektowym zestawione są w tabelach w dodatku G (34 strony tabel).

## 5. Podsumowanie

Omówione w dużym skrócie opracowanie FITNET nie jest opracowaniem naukowym, jest zbiorem procedur do praktycznego zastosowania. Nie zawiera zatem objaśnień i szerszego uzasadnienia przyjętych metod. Czytelnik chcący pogłębić wiedzę na temat doświadczalnych podstaw poszczególnych zagadnień, powinien sięgnąć do literatury specjalistycznej z zakresu zmęczenia. Szerokie ujęcie monograficzne większości zagadnień występujących w procedurach FITNET w polskiej literaturze można znaleźć w pracy [13]. Problematyka hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych zawarta jest w monografii [22]. Zagadnienia diagnostyki konstrukcji ze względu na zmęczeniowe pękanie omówiono w pracy [23], natomiast metody opracowania eksploatacyjnych obciążeń przedstawiono w pracach [24] i [25]. Z literatury anglojęzycznej zagadnieniom naprężeń „hot spot” polecić można pracę Haibacha [10].

Prezentowana praca, ze względu na skrócone omówienie bardzo obszernego opracowania FITNET, może spełniać jedynie rolę przewodnika, w którym wskazano możliwości opisanych procedur. Praktyczne ich zastosowanie wymaga odwołania się do oryginalnego, pełnego opracowania, zawierającego dane umożliwiające ocenę zmęczeniowego zachowania się konstrukcji w fazie projektowania. Bogaty zbiór danych stanowi nieocenioną wartość procedur FITNET. Wymienione w p. 2 podstawowe problemy nauki o zmęczeniu materiałów i zmęczeniowym pękaniu konstrukcji, wskazują na zakres i głębokość uproszczeń przyjętych w procedurach FITNET po to, by miały praktyczny sens. Analiza tych uproszczeń jest dobrą ilustracją problemu transformacji wiedzy w celu jej transferu do praktyki.

## 6. Literatura

- [1] API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. API RP 2A, 18th ed., American Petroleum Institute, Washington, September 1, 1989.
- [2] Bach C.: Die Maschinen Elemente, Verlag der J.G. Cotta-Schen Buchhandlung, Stuttgart, 1870.

- [3] Boroński D.: Metody badań odkształceń i naprężeń w zmęczeniu materiałów i konstrukcji, ITE-PIB, Radom, 2007 r.
- [4] Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures, BS 7608: 1993, BSI, London.
- [5] Det Norske Veritas: Fatigue Analysis of H SEC Proposal for Classification Note Oslo 1998.
- [6] Dietrich M. (red.): Podstawy konstrukcji maszyn, tom I, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
- [7] Dietrich J. (red.): Podstawy konstrukcji maszyn, tom I, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1974.
- [8] Dijkstra O.D., de Back J., 1980. Fatigue strength of welded tubular T- and X-joints. Proceedings of 12th Offshore Technology Conference, OTC Paper No. 3639, Houston.
- [9] Duga J.J., et.al.: The Economic Effects of Fracture in the United States, Part 2 - A Report to NBS by Columbus Laboratories, 1983.
- [10] Haibach E., 1968. Die schwingfestigkeit vor schweissverbindunge aus der sicht einer örlichen Beanspruchungsmessung. LBF-bericht no. FB-77, Lab. F. Betriebsfestigkt. Darmstadt.
- [11] Kobayaski, Skinobu: Optimum Aircraft Strukturar Design and Verification for Users, in Proc. of the 18th Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, Melbourne, Australia, 1995.
- [12] Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie matali, WNT, W-wa, 1985.
- [12a] Kocańda S., Fatigue Failure of Metals, Sijthoff and Noorthoff International Publishers, 1978.
- [13] Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 1997.
- [14] Mazurkiewicz A.: Modelowanie transformacji wiedzy do praktyki w budowie i ksploatacji maszyn, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom - Poznań, 1999.
- [15] Moszyński W.: Wytrzymałość zmęczeniowa części maszynowych, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa, 1954.
- [16] Moszyński W.: Wykład elementów maszyn, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa, 1955
- [17] Offshore Installations: Guidance on Design and Construction, UK Department of Energy, HM Stationery Office, London, 3rd ed., 1984.
- [18] Ohchuda H.: Analysis of Service Failure of Hitachi Products (1970 - 1975), 1979.
- [19] Polski Rejestr Statków, Analiza wytrzymałości zmęczeniowej stalowego kadłuba statku, Publikacja Nr 45/P, 1998.
- [20] Praca zbiorowa pod redakcją M. Koçak, S. Webster, J.J. Janosch, R.A. Ainsworth, R. Koers, 2006. FITNET Fitness-for-Service Procedure - Final Draft MK7.
- [21] Structural Welding Code - Steel, 13th ed., ANSI/AWSD 1.1-92, AWS, Miami, 1992.
- [22] Szala J.: Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno - Rolniczej, Bydgoszcz, 1998.
- [23] Szala J.: Ocena stanu obiektu poddanego eksploatacyjnym obciążeniom na podstawie hipotezy linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych, Diagnostyka, Vol. 34, 2005 r., ss. 71-78.
- [24] Szala J., Ligaj B.: Analiza obciążeń eksploatacyjnych w badaniach zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych za pomocą tablic korelacyjnych, Materiały XVIII Sympozjum nt.: "Zmęczenie i Mechanika Pękania", Bydgoszcz-Pieczyska, 2000 r., ss. 465-473.
- [25] Szala J. Ligaj B.: Analiza obciążeń eksploatacyjnych elementów konstrukcyjnych w badaniach zmęczeniowych, Materiały IX Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Radom-Krynica, 2001 r., ss. 231-220.

## THE EUROPEAN FITNET PROCEDURES AS THE EXAMPLE OF THE TRANSFORMATION OF THE KNOWLEDGE IN MECHANICAL ENGINEERING

### Summary

*In the paper the essential problems of fatigue of materials and structures, the transfer of the achievements of science into practice were presented. The delay in applications of achievements of science into practice requires intensification in standardisation process for fatigue design of complex structures. The European FITNES procedures are the example of this kind of documents.*