

Bogdan LIGAJ, Grzegorz SZALA

## OCENA ZAŁOŻEŃ OBLICZEŃ ZMĘCZENIOWYCH W PROCEDURACH FITNET – WYBRANE ZAGADNIENIA

**Streszczenie.** Doskonalenie i potrzeba unifikacji metod obliczeniowych trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych spowodowała opracowanie odpowiednich procedur obliczeniowych. Procedury tego typu powstały początkowo z przeznaczeniem do zastosowań w specjalistycznych dziedzinach techniki, takich jak lotnictwo, okrętownictwo i energetyka. Próba opracowania uniwersalnej procedury jest praca zbiorowa wydana 2006 roku pod nazwą FITNET.

W pracy dokonano analizy wybranych zagadnień związanych z procedurą obliczeń zmęczeniowych. Do analizy wybrano wykładnik potęgi  $m$  stosowany w opisie wykresu zmęczeniowego oraz granicę zmęczenia. Wymienione parametry mają zasadniczy wpływ na opis wykresu zmęczeniowego stanowiącego podstawę metody obliczeń trwałości zmęczeniowej. Analizę danych literaturowych uzupełniono wynikami badań własnych w postaci wykresów zmęczeniowych wybranych gatunków stali i stopów aluminium.

**Słowa kluczowe:** trwałość zmęczeniowa, wytrzymałość materiałów, badania doświadczalne, stal, aluminium

## EVALUATION OF ASSUMPTIONS IN FITNET FATIGUE LIFE CALCULATIONS – CHOSEN PROBLEMS

**Summary.** Development and the need of unification of fatigue life calculation methods of structural elements led to elaborate proper calculation procedures. The procedures were initially developed to apply in specialist areas of technique such as: aviation, ship building industry and power engineering. The attempt of elaboration of a universal procedure was released in 2006 and called FITNET.

In the paper there was performed an analysis of chosen problems connected with the fatigue life calculation procedure. A  $m$  exponent of a power applied in a description of fatigue life calculation and the fatigue limit were chosen for the analysis. The mentioned parameters essentially influence the description of a fatigue life curve that is a base for the fatigue life calculation method. The analysis of literature data was completed with own research results in the shape of fatigue life curves of chosen grades of steel and aluminum alloys.

**Keywords:** fatigue life, strength of materials, experimental tests, steel, aluminium

## 1. WPROWADZENIE

Bogaty zbiór danych doświadczalnych z około 200-letnich badań zmęczeniowych materiałów i zmęczeniowego pęknięcia konstrukcji umożliwił podjęcie prac nad unifikacją metod obliczeniowych. Początkowo prace te dotyczyły specjalistycznych dziedzin techniki, takich jak okrętownictwo i oceanotechnika [1, 2, 3, 4], lotnictwo [5] i konstrukcje stalowe [6, 7].

Procedurami obliczeniowymi poruszającymi szeroki zakres problematyki, obejmujący poza zagadnieniami zmęczeniowymi inne rodzaje uszkodzeń elementów konstrukcyjnych, są opublikowane w 2006 roku procedury FITNET [8]. Procedury te, jak inne tego rodzaju opracowania, bazują na uśrednionych wartościach parametrów wyznaczonych na podstawie obszernych zbiorów danych dotyczących własności materiałowych i obciążeń elementów konstrukcyjnych. Użytkownik tych procedur nie jest w stanie ocenić stopnia przybliżenia tych danych, a zatem nie jest w stanie ocenić różnic pomiędzy wynikami obliczeń a eksploatacyjną trwałością analizowanego elementu konstrukcyjnego.

W tej pracy wybrano do analizy dwa parametry opisujące wykres zmęczeniowy Wöhlera, który ma podstawowy wpływ na obliczaną trwałość zmęczeniową. Tymi parametrami są: wykładnik potęgi  $m$  i granica zmęczenia  $S_{f(-1)}$ .

## 2. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA PROCEDUR FITNET

European Fitness – for servise Network (FITNET) to obszerne opracowanie o objętości 359 stron, uzupełnione dodatkami o objętości 524 stron. Procedury obliczeniowe obejmują cztery podstawowe moduły: zmęczenie, mechanikę pęknięcia, pełzanie i korozję. Temat artykułu jest związany z wybranymi zagadnieniami modułu dotyczącego zmęczenia, który obejmuje zbiór ścieżek obliczeń trwałości zmęczeniowej. Ścieżki 1, 2 i 3 są oparte na kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych w krytycznych obszarach, w których inicjują się pęknięcia zmęczeniowe. Ścieżki 4 i 5 mają zastosowanie, w przypadkach gdy w elementach występują wady.

Wymienione ścieżki 1 i 2 obejmują po dwa przypadki (a i b) elementów konstrukcyjnych: wykonywanych z zastosowaniem technologii spawania oraz kształtowanych innymi technologiami o jednorodnej strukturze w zakresie cech materiałowych. Wymieniony drugi przypadek odpowiada elementom maszyn.

Zagadnienia wybrane do analizy w niniejszej pracy dotyczą ścieżki 2b procedur FITNET, której poszczególne kroki, w nieznacznie zmienionej postaci, obejmują następujące czynności:

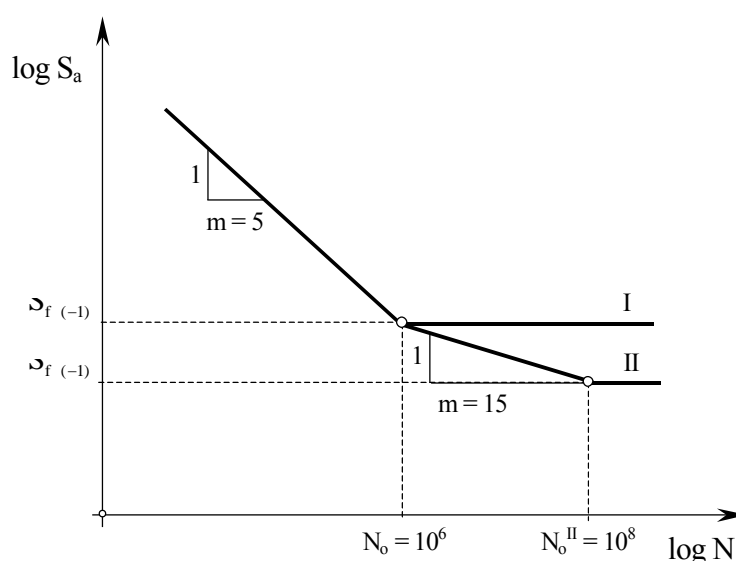
- krok 1: przeprowadzenie nieniszczących badań w celu wykluczenia ewentualnych wad,
- krok 2: określenie zakresu nominalnych naprężeń eksploatacyjnych  $\Delta S$ ; sprawdzenie warunku  $\Delta S < 2 R_e$  (gdzie  $R_e$  jest granicą plastyczności) dla asymetrii cyklu  $R = S_{\min}/S_{\max} = -1$  lub warunku  $S_{\max} < R_e$  dla przypadku  $R \neq -1$ ; wyznaczenie widm obciążeń (zmiennoodprężeniowych),
- krok 3: sprawdzenie warunków eksploatacji związanych z temperaturą i oddziaływaniem środowiska,
- krok 4: wyznaczenie wykresu zmęczeniowego S-N, uwzględnienie wpływu karbu, wymiarów elementów, chropowatości powierzchni i wpływu naprężeń średnich,
- krok 5: obliczenia trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrana-Minera.

Podstawowym problemem w zastosowaniu procedur obliczeniowych FITNET według ścieżki 2b jest krok 4, a w nim wyznaczenie wykresu zmęczeniowego S-N. Model wykresu zmęczeniowego S-N według procedur FITNET dla naprężeń normalnych S jest przedstawiony na rysunku 1 (ze zmienionymi oznaczeniami).

Wykres, według modelu pokazanego na rysunku 1, wyznaczają dwa parametry: wartość wykładnika potęgi  $m = 5$  we wzorze opisującym gałąź ograniczonej trwałości oraz wartość granicy zmęczenia  $S_{f(-1)}$  i liczba cykli  $N_o$ , określająca punkt przegięcia wykresu

$$S_a^m \cdot N = S_{f(-1)}^m \cdot N_o = C \quad (1)$$

Wykres według linii I po przekroczeniu punktu przegięcia stosuje się dla stali i staliw, z wyłączeniem stali austenitycznych, natomiast wykres według linii II ma zastosowanie dla stali austenitycznych, stopów aluminium i innych metali.



Rys. 1. Model wykresu zmęczeniowego S-N opracowany na podstawie procedur FITNET

Fig. 1. The S-N diagram model processed on basis of procedures FITNET

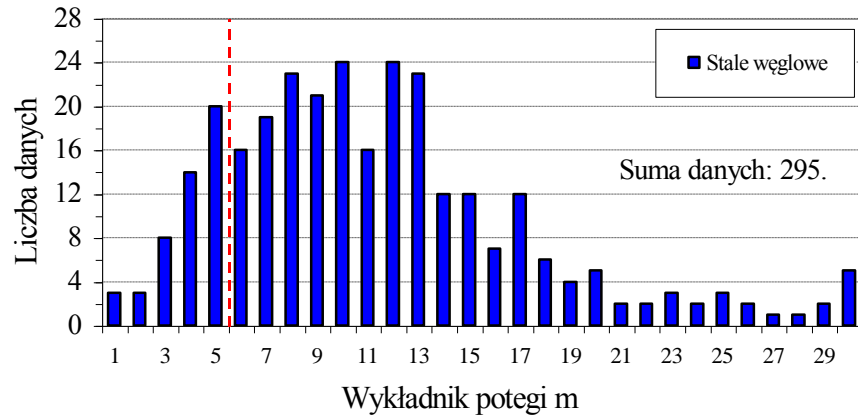
### 3. ANALIZA DANYCH LITERATUROWYCH DOTYCZĄCYCH PARAMETRÓW $m$ i $S_{f(-1)}$

W punkcie tym zostaną przedstawione wyniki badań doświadczalnych umożliwiających wyznaczenie rozkładów wartości  $m$  i zestawienie statystycznych zależności dotyczących wartości  $S_{f(-1)}$ . Wyniki te pochodzą z różnych źródeł literaturowych, katalogów i licznych badań własnych. Na rysunku 2 przedstawiono rozkład wartości wykładnika potęgi  $m$  (występującego we wzorze (1)) dla stali węglowych opracowanego na podstawie 295 danych. Średnia wartość wykładnika potęgi  $m = 12,15$ , natomiast wykładnik potęgi dla prawdopodobieństwa mniejszego od 5% to  $m = 7,70$ .

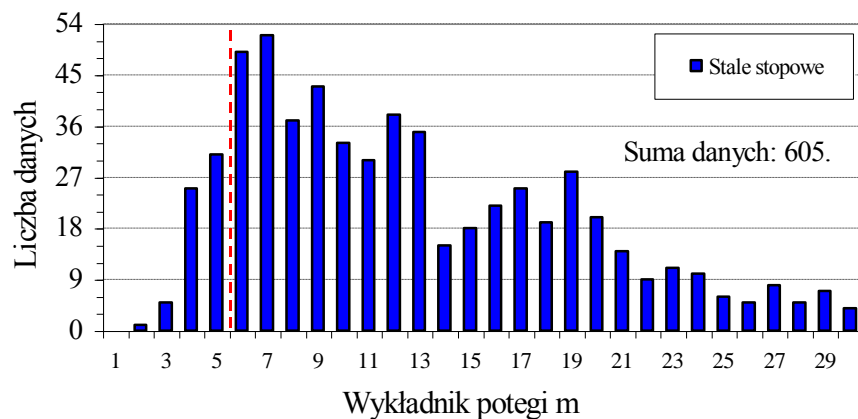
Podobny rozkład wykładnika potęgi  $m$  dla stali stopowych przedstawiono na rysunku 3, z którego wynika, że dla 605 danych średnia wartość wykładnika potęgi  $m = 12,27$ , a dla prawdopodobieństwa 5% –  $m = 5,50$ .

Dane dotyczące rozkładu wykładnika potęgi  $m$  dla stopów aluminium zestawiono na rysunku 4. Z 145 danych średnia wartość wykładnika potęgi wynosi  $m = 10,36$ , a wartość dla prawdopodobieństwa mniejszego od 5% wynosi  $m = 5,8$ .

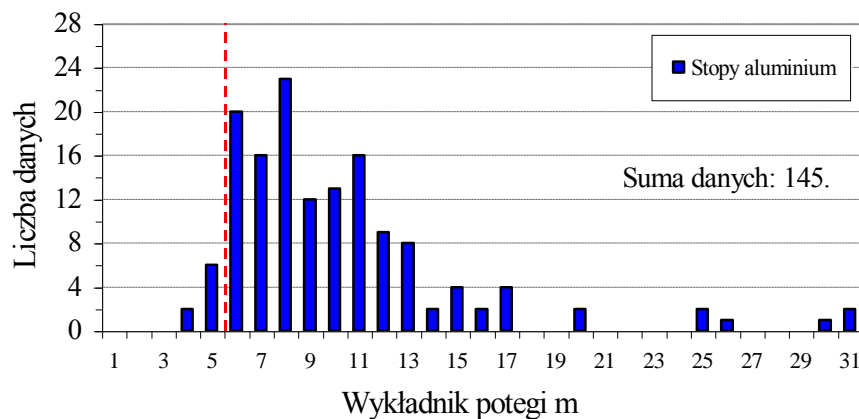
Dane do obliczeń granicy zmęczenia  $S_{f(R)}$  na podstawie literatury i badań własnych zestawiono w tabeli 1. Obejmuje ona dane wartości granicy zmęczenia  $S_{f(R)}$  dla obciążenia wahadłowego ( $R = -1$ ) i odzerowo-tętniącego ( $R = 0$ ).



Rys. 2. Histogram rozkładu wartości wykładnika potęgi  $m$  dla stali węglowych  
Fig. 2. The histogram distribution values the exponent  $m$  for carbon steels



Rys. 3. Histogram rozkładu wartości wykładnika potęgi  $m$  dla stali stopowych  
Fig. 3. The histogram distribution values the exponent  $m$  for alloy steels



Rys. 4. Histogram rozkładu wartości wykładnika potęgi  $m$  dla stopów aluminium  
Fig. 4. The histogram distribution values the exponent  $m$  for aluminum alloys

Tablica 1

Dane do obliczeń wartości granicy zmęczenia  $S_{f(R)}$  na podstawie literatury i badań własnych

Lp.	Materiał	Obciążenia zmienne					
		Rozciąganie – ściskanie		Zginanie		Skrećanie	
		$S_{f(-1)}/R_m$	$S_{f(0)}/R_m$	$S_{f(-1)}/R_m$	$S_{f(0)}/R_m$	$S_{f(-1)}/R_m$	$S_{f(0)}/R_m$
1	Stale: węglowe, stopowe, normalizowane, ulepszone cieplnie	0,33	0,55÷0,63	0,45	0,7	0,25	0,45÷0,5
2	Żeliwo szare do $R_m = 400$ MPa	0,25		0,4		0,35	
3	Staliwo	0,34		0,4		0,58	
4	Stopy aluminium, miedzi i niklu	0,3		0,35		0,58	
5	Tytan	0,5÷0,75		0,55÷0,8			
6	Stopy tytanu	0,4÷0,6		0,4÷0,6			

Z przedstawionych na rysunkach 2, 3 i 4 rozkładów wartości wykładnika  $m$  wynika, że przyjęta w procedurach FITNET wartość  $m = 5$  leży w dolnym obszarze rozkładu wartości doświadczalnych.

W celu wykazania wrażliwości metody obliczeń trwałości zmęczeniowej opartej na zastosowaniu liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych, którą przyjęto w analizowanej procedurze, wykonano odpowiedni test symulacyjny.

#### 4. WPLYW WARTOŚCI WYKŁADNIKA POTĘGI $m$ NA OBLICZENIOWĄ TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ

##### 4.1. Przykład dla stali C45

Założenia do obliczeń:

- granica zmęczenia  $S_{f(-1)} = 223$  MPa,
- bazowa liczba cykli  $N_0 = 10^6$  cykli,
- wartości wykładnika potęgi  $m$  (przyjęto wartości:  $m = 5$ ,  $m = 7$ ,  $m = 9$ ,  $m = 11$ ,  $m = 13$ ,  $m = 15$ ,  $m = 17$ ),
- widmo obciążeń: 10-stopniowe o równym przyroście amplitudy naprężenia  $\Delta S_a = 0,1 \cdot S_{a \max}$ ,  $S_{a \max} = 410$  MPa.

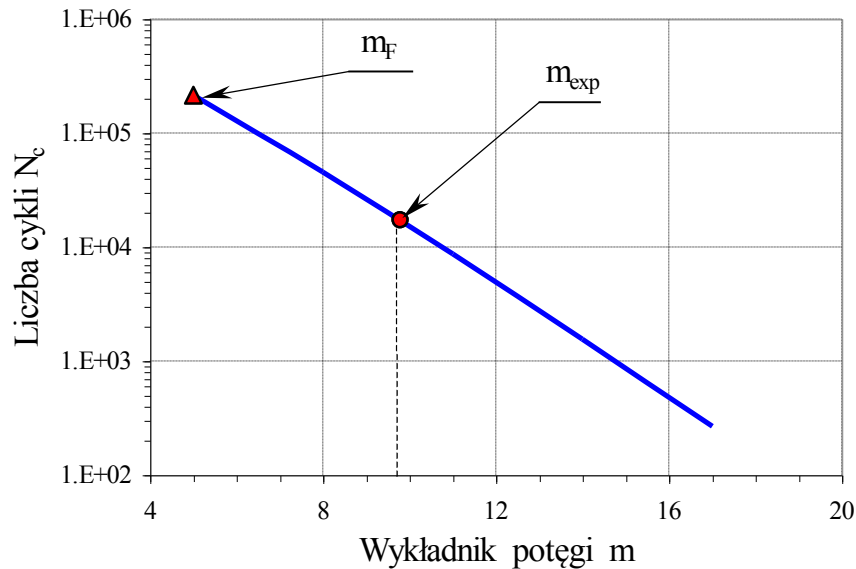
Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 5.

##### 4.2. Przykład dla stali austenitycznej 1.4301 (X5Crni18-10)

Założenia do obliczeń:

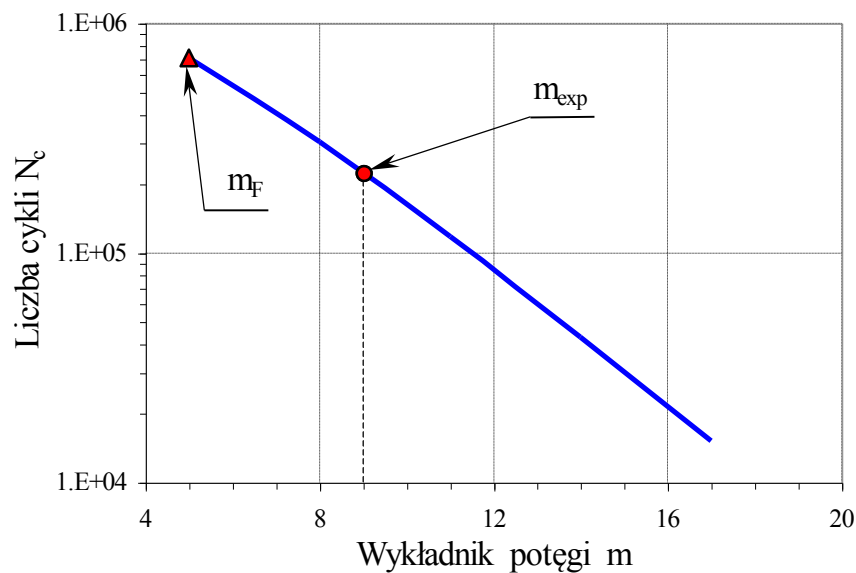
- granica zmęczenia  $S_{f(-1)} = 200$  MPa,
- bazowa liczba cykli  $N_0 = 10^6$  cykli,
- wartości wykładnika potęgi  $m$  (przyjęto wartości:  $m = 5$ ,  $m = 7$ ,  $m = 9$ ,  $m = 11$ ,  $m = 13$ ,  $m = 15$ ,  $m = 17$ ),

- widmo obciążeń: 10-stopniowe o równym przyroście amplitudy naprężenia  
 $\Delta S_a = 0,1 \cdot S_{a \max}$ ,  $S_{a \max} = 290$  MPa.  
 Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Zależność obliczeniowej trwałości zmęczeniowej od wartości współczynnika potęgi  $m$  dla stali C45,  $m_F = 5$  – wartość wykładnika potęgi według FITNET

Fig. 5. Dependence of fatigue life calculation from value the exponent  $m$  for C45 steel,  $m_F = 5$  – the value of the exponent by FITNET



Rys. 6. Zależność obliczeniowej trwałości zmęczeniowej od wartości współczynnika potęgi  $m$  dla stali X5CrNi18-10,  $m_F = 5$  – wartość wykładnika potęgi według FITNET

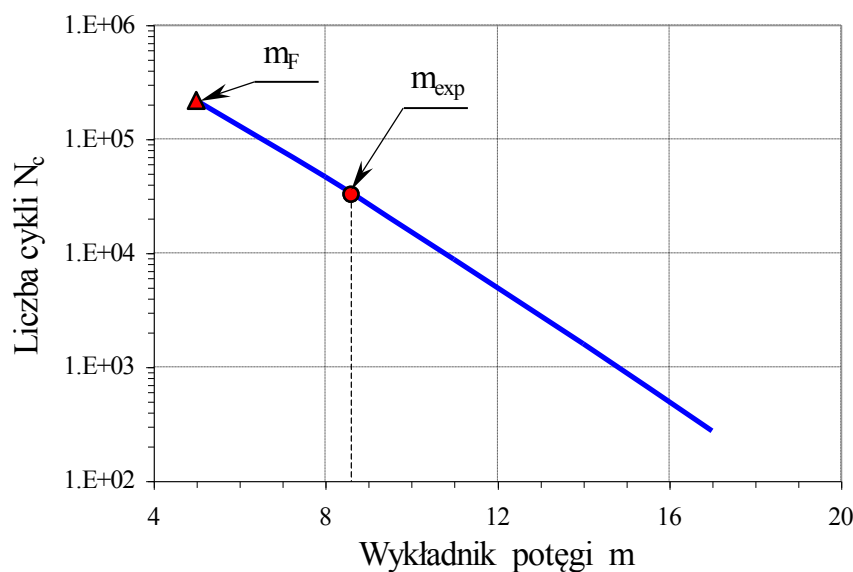
Fig. 6. Dependence of fatigue life calculation from value the exponent  $m$  for X5CrNi18-10 steel,  $m_F = 5$  – the value of the exponent by FITNET

### 4.3. Przykład dla stopu aluminium AW-2017A

Założenia do obliczeń:

- granica zmęczenia  $S_{f(-1)} = 158$  MPa,
- bazowa liczba cykli  $N_0 = 10^6$  cykli,
- wartości wykładnika potęgi  $m$  (przyjęto wartości:  $m = 5, m = 7, m = 9, m = 11, m = 13, m = 15, m = 17$ ),
- widmo obciążeń: 10-stopniowe o równym przyroście amplitudy naprężenia  $\Delta S_a = 0,1 \cdot S_{a \max}, S_{a \max} = 290$  MPa.

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Zależność obliczeniowej trwałości zmęczeniowej od wartości współczynnika potęgi  $m$  dla stopu aluminium AW-2017A,  $m_F = 5$  – wartość wykładnika potęgi według FITNET

Fig. 7. Dependence of fatigue life calculation from value the exponent  $m$  for aluminum alloy AW-2017A,  $m_F = 5$  – the value of the exponent by FITNET

Dane do obliczeń dotyczące własności cyklicznych materiałów przyjęto na podstawie wyników badań uzyskanych w ramach realizacji projektu badawczego własnego nr 2221/B/T02/2010/39 pt. „Hybrydowa metoda obliczeń trwałości zmęczeniowej i jej doświadczalna weryfikacja na przykładzie wyników badań zmęczeniowych stopów aluminium i stali”, finansowanego przez MNiSW oraz NCN. Dla porównania na wykresach z rysunków 5, 6 i 7 naniesiono poziom doświadczalnej wartości  $m_{exp}$ .

## 5. PODSUMOWANIE

Z przytoczonych w punkcie 2 danych wynika, że w analizowanych grupach stopów metali rozrzut wartości współczynnika  $m$  we wzorze opisującym wykres zmęczeniowy jest znaczny i zawiera się w przedziale od 4 do 30. Średnie wartości przekraczają wartość 10, co znacznie (ponad 2-krotnie) przekracza wartość postulowaną w procedurach FITNET.

Badania symulacyjne opisane w punkcie 3 wykazują, że dla wszystkich stopów metali przyjętych do analizy wpływ wartości współczynnika potęgi  $m$  na obliczeniową trwałość zmęczeniową jest istotny. Im większa jest wartość wykładnika  $m$ , tym mniejsza jest wartość obliczanej trwałości, co można zakwalifikować jako przesunięcie wyników obliczeń w zakres bezpiecznej trwałości ( $N_{c\text{obl}} < N_{c\text{exp}}$ ). Przyjęcie zatem wartości wykładnika potęgi  $m = 5$  z dolnego zakresu wartości eksperymentalnych stwarza zagrożenie przemieszczenia się z wynikami obliczeń w obszar niebezpiecznych ocen.

*Praca naukowa sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków na naukę w ramach projektu badawczego własnego nr 2221/B/T02/2010/39.*

## **Bibliografia**

1. API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. API RP 2A, 18<sup>th</sup> ed., American Petroleum Institute, Washington, September 1, 1989.
2. Det Norske Veritas: Fatigue Analysis of H SEC Proposal for Classification Note Oslo 1998.
3. Offshore Installations: Guidance on Design and Construction, UK Department of Energy, HM Stationery Office, London, 3<sup>rd</sup> ed., 1984.
4. Polski Rejestr Statków, Analiza wytrzymałości zmęczeniowej stalowego kadłuba statku, Publikacja Nr 45/P, 1998.
5. Kobayaski, Skinobu: Optimum Aircraft Structural Design and Verification for Users. Proc. of the 18<sup>th</sup> Symposium of the International Committee on Aeronautical Fatigue, Melbourne, Australia 1995.
6. Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures, BS 7608: 1993, BSI, London.
7. Structural Welding Code – Steel, 13<sup>th</sup> ed., ANSI/AWSD 1.1-92, AWS, Miami, 1992.
8. Praca zbiorowa pod redakcją: M. Kocak, S. Webster, J.J. Janosch, R.A. Ainsworth, R. Koers, 2006. FITNET Fitness – for – Service Produce – Final Draft MK7.