

Grzegorz SZALA, Bogdan LIGAJ

MODELE WYKRESÓW ZMĘCZENIOWYCH W OBLICZENIACH TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW MASZYN – PRZYKŁADY BADAŃ

Streszczenie. W pracy podjęto próbę analizy modeli wykresów zmęczeniowych możliwych do zastosowania w obliczeniach trwałości zmęczeniowej elementów maszyn. Analizę ograniczono do wykresów zmęczeniowych w ujęciu naprężeniowym, uwzględniając cykliczne obciążenia z zakresu niskocyklowego zmęczenia (NCZ), wysokocyklowego zmęczenia (WCZ), granicy zmęczenia (GZ) oraz zakresu gigacyklowego zmęczenia (GCZ), występujących w widmie obciążeń jednocześnie. Wybrane modele analizowanych wykresów zmęczeniowych zilustrowane zostaną wynikami badań stali i stopów aluminium.

Słowa kluczowe: trwałość zmęczeniowa, wytrzymałość materiałów, stal, aluminium, mechanika

MODELS OF FATIGUE LIFE CURVES IN FATIGUE LIFE CALCULATIONS OF MACHINE ELEMENTS – EXAMPLES OF RESEARCH

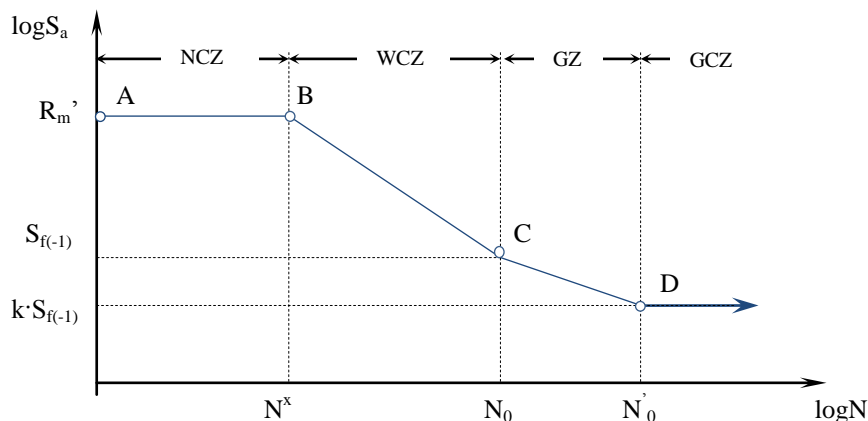
Summary. In the paper there was attempted to analyse models of fatigue life curves possible to apply in calculations of fatigue life of machine elements. The analysis was limited to fatigue life curves in stress approach enabling cyclic stresses from the range of low cycle fatigue (LCF), high cycle fatigue (HCF), fatigue limit (FL) and giga cycle fatigue (GCF) appearing in the loading spectrum at the same time. Chosen models of the analysed fatigue live curves will be illustrated with test results of steel and aluminium alloys.

Keywords: fatigue life, strength of materials, steel, aluminium, mechanics

1. WPROWADZENIE

Obciążenia eksploatacyjne elementów konstrukcyjnych mają w ogólności charakter losowy w dużym zakresie zmienności. Widma obciążeń opracowane na podstawie obciążeń eksploatacyjnych, według odpowiednich metod zliczania cykli, stanowią zbiór cykli sinusoidalnych o zmiennych parametrach w szerokich granicach [1]. Parametry te lokują poszczególne cykle w różnych zakresach zmęczenia. Obciążenia powodujące znaczne odkształcenia plastyczne odpowiadają zakresowi niskocyklowego zmęczenia (NCZ), obciążenia wywołujące dominujące odkształcenia sprężyste odpowiadają zakresowi wysokocyklowego zmęczenia (WCZ), obciążenia wywołujące naprężenia na poziomie granicy zmęczenia odpowiadają zakresowi granicy zmęczenia (GZ), a obciążenia wywołujące

naprężenia poniżej granicy zmęczenia odpowiadają zakresowi gigacyklowego zmęczenia (GCZ). Wymienione zakresy w sposób schematyczny pokazano na rys. 1 [2].



Rys. 1. Schematyczne ujęcie zakresów zmęczenia: niskocyklowego zmęczenia (NCZ), wysokocyklowego zmęczenia (WCZ), granicy zmęczenia (GZ) oraz zakresu gigacyklowego zmęczenia (GCZ)

Fig. 1. Schematic picture of fatigue ranges: low cycle fatigue (LCF), high cycle fatigue (HCF), fatigue limit (FL) and giga cycle fatigue (GCF)

Powszechnie przyjmuje się, że w zakresie NCZ obliczenia zmęczeniowe prowadzi się w ujęciu odkształceniowym, które wymaga opracowania widma obciążenia jako zbioru cykli sinusoidalnych odniesionych do odkształceń, oraz wykresu zmęczeniowego Mansona-Coffina, którym opisuje się zależność amplitudy odkształcenia całkowitego od liczby nawrotów. W zakresie WCZ obliczenia zmęczeniowe prowadzi się w ujęciu naprężeniowym, czyli widmo obciążenia i wykres zmęczeniowy wyrażone są przez cykle naprężenia. Podobnie postępuje się w zakresach GZ i GCZ. Jak już wspomniano, obciążenia eksploatacyjne mieszczą się we wszystkich wymienionych zakresach, a zatem przyjęcie któregoś z wymienionych podejść jest uproszczeniem wymagającym odpowiedniej analizy.

Analizę tego rodzaju przeprowadzono w pracy [3], wyodrębniając trzy ścieżki obliczeń:

- 1 – w ujęciu naprężeniowym z zastosowaniem kompletnego wykresu zmęczeniowego Wöhlera o charakterze pokazanym na rys. 1,
- 2 – w ujęciu odkształceniowym z zastosowaniem wykresu Mansona-Coffina dla zakresów NCZ i WCZ,
- 3 – w ujęciu hybrydowym, w którym dla zakresu NCZ stosowane są ujęcie odkształceniowe wykres Mansona-Coffina, natomiast dla zakresów WCZ, GZ i GCZ stosowane są ujęcie naprężeniowe i wykres Wöhlera.

Analiza przeprowadzona w pracy [3] dla stali C45 wykazała, że różnice w wynikach obliczeń według ścieżek 1 i 3 były relatywnie małe (mając na względzie rozrzut wyników badań zmęczeniowych).

W związku z powyższym, w niniejszej pracy rozważane będą modele tzw. kompletnych wykresów zmęczeniowych w ujęciu naprężeniowym i analiza ich przydatności do obliczeń odpowiednich stopów metali. Analiza ta uzupełniona zostanie przykładami badań zmęczeniowych wybranych stali i stopów aluminium.

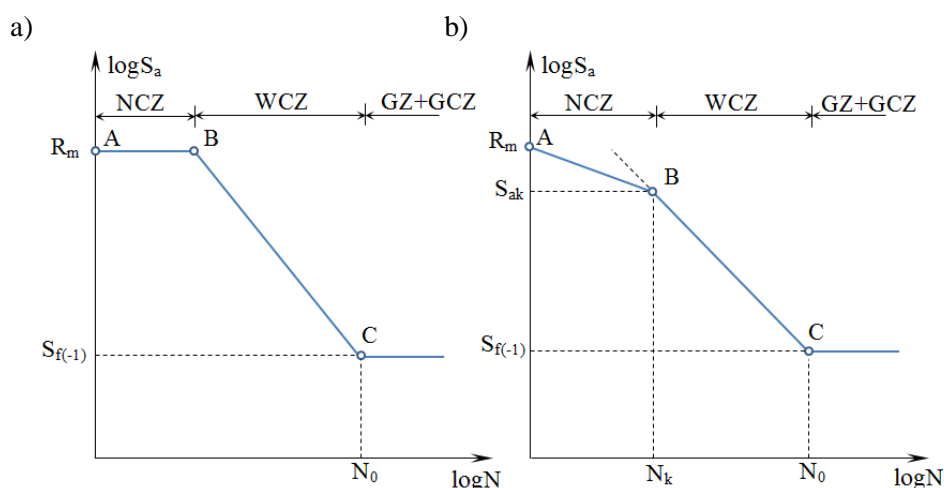
2. MODELE KOMPLETNYCH WYKRESÓW ZMĘCZENIOWYCH

Z analizy danych literaturowych wynikają różnego rodzaju propozycje uzupełnienia lub modyfikacji wykresów zmęczeniowych w wymienionych obszarach przejścia z NCZ→WCZ oraz z WCZ→GZ→GCZ.

Pierwszy przypadek zilustrowano na rys. 2. Ma on zastosowanie dla stali sprężystych charakteryzujących się małą wartością stosunku $R_m/R_e \leq 1,2$ (rys. 2a), natomiast dla stali sprężysto-plastycznych o $R_m/R_e > 1,2$ lepszą aproksymację daje przebieg wykresu według rys. 2b. Wartość współczynnika kierunkowego prostej na odcinku AB (rys. 2b) może być obliczona ze wzoru:

$$e = -\frac{\log\left(\frac{R_m}{S_{ak}}\right)}{\log(N_k)} \quad (1)$$

Wartość S_{ak} , w zależności od przyjętego kryterium, może w szczególnych przypadkach przyjmować wartości: $S_{ak} = R_e$, $S_{ak} = R_e'$ lub może być obliczona z wzoru Mansona-Coffina dla przypadku $\epsilon_{ac} = \epsilon_{apl}$.



Rys. 2. Schematyczne ujęcie wykresów zmęczeniowych dla materiałów: a) sprężystych, b) sprężysto-plastycznych

Fig. 2. Schematic picture of fatigue life curves for materials: a) elastic, b) elastic-plastic

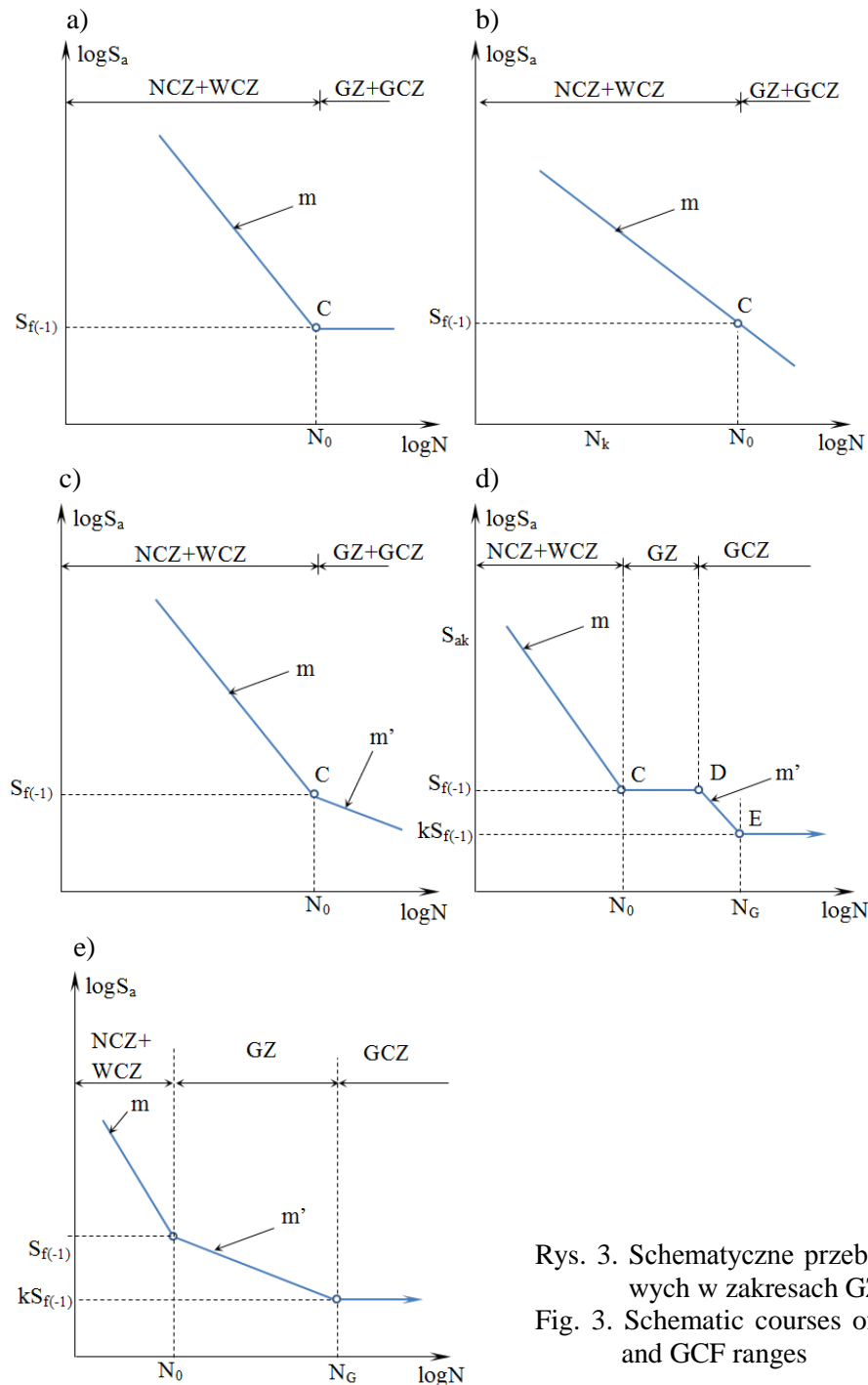
Przejście z zakresu WCZ w zakresy GZ i GCZ pokazano schematycznie na rys. 3. Przedstawione przypadki odpowiadają:

- stali o wyraźnej granicy zmęczenia $S_{f(-1)}$, np. stale konstrukcyjne (rys. 3a),
- wyżej wymienionym stalom z uwzględnieniem wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia na trwałość zmęczeniową (przypadek widm obciążeń o zmiennych amplitudach) (rys. 3b),
- np. stalom austenitycznym i stopom aluminium, którym odpowiada postać wykresu na rys. 3c, a wartość wykładnika potęgi m' według Haibacha [4] oblicza się ze wzoru:

$$m' = 2m - 1, \quad (2)$$

natomiast według procedur FITNET – $m' = 15$.

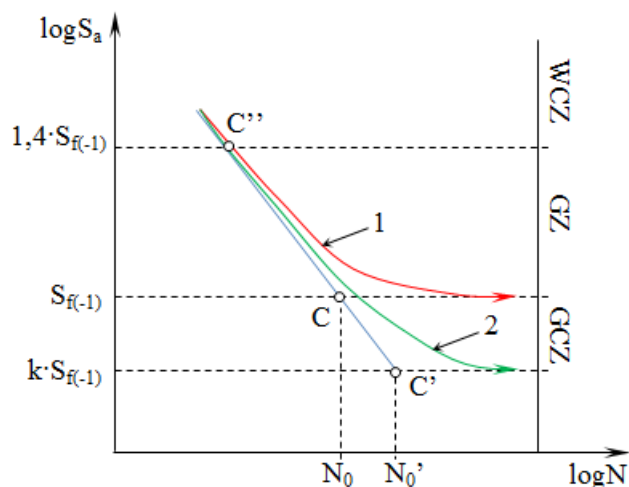
Na schematach (rys. 3d i 3e) pokazano przebieg wykresów zmęczeniowych w zakresach GZ i GCZ proponowanych w pracach [5], [6] i [7]. Na wykresach tych przyjęto, że w kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych biorą udział cykle o amplitudach mniejszych od granicy zmęczenia do wartości $k \cdot S_{f(-1)}$. Według badań zjawisk zmęczeniowych w metalach szeroko opisanych w monografii S. Kocańdy [8], wartość współczynnika k wynosi około 0,4.



Rys. 3. Schematyczne przebiegi wykresów zmęczeniowych w zakresach GZ i GCZ
 Fig. 3. Schematic courses of fatigue life curves in FL and GCF ranges

W monografii [9] wykazano, że w obliczeniach trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych poddanych obciążeniom o zmiennej amplitudzie, odpowiedni opis wykresów zmęczeniowych w zakresie granicy zmęczenia ma istotny wpływ. Na podstawie wyników badań zaproponowano odpowiednie wzory na opis wykresu zmęczeniowego w tym

zakresie, ilustrację graficzną tych wzorów pokazano na rys. 4. Wymienione wzory zweryfikowano doświadczalnie.



Rys. 4. Graficzne przedstawienie przebiegu wykresów zmęzeniowych dla przejścia z zakresu WCZ do zakresów GZ i GCZ: 1 – dla metali z wyraźną granicą zmęczenia $S_{f(-1)}$, 2 – dla metali niewykazujących wyraźnej granicy zmęczenia $S_{f(-1)}$ [9]

Fig. 4. Graphic illustration of fatigue life curves for the transition from HCF ranges to the range FL and GCF: 1 – for metals with a definite fatigue life limit $S_{f(-1)}$, 2 – for metals do not characterized by a definite fatigue life limit $S_{f(-1)}$

W analizowanych modelach wykresy w obszarach przejścia z WCZ do NCZ oraz z WCZ do GZ i GCZ opisane są parametrami m i $S_{f(-1)}$, wyznaczanymi dla zakresu WCZ. Znaczny losowy rozrzut wyników badań wpływa na wartości wymienionych parametrów, które należy traktować w sensie probabilistycznym.

3. PRZYKŁADY WYNIKÓW BADAŃ

Na rys. 5 zamieszczono wykres zmęzeniowy z naniesionymi punktami z badań dla stali C45. Stal ta charakteryzuje się następującymi własnościami statycznymi: $R_e = 422$ MPa, $R_m = 682$ MPa, $E = 215000$ MPa.

Wykres opisany jest równaniem dla obciążenia wahadłowego ($R = -1$):

$$\log S_a = -\frac{1}{9,80} \log N + 2,9611, \quad (3)$$

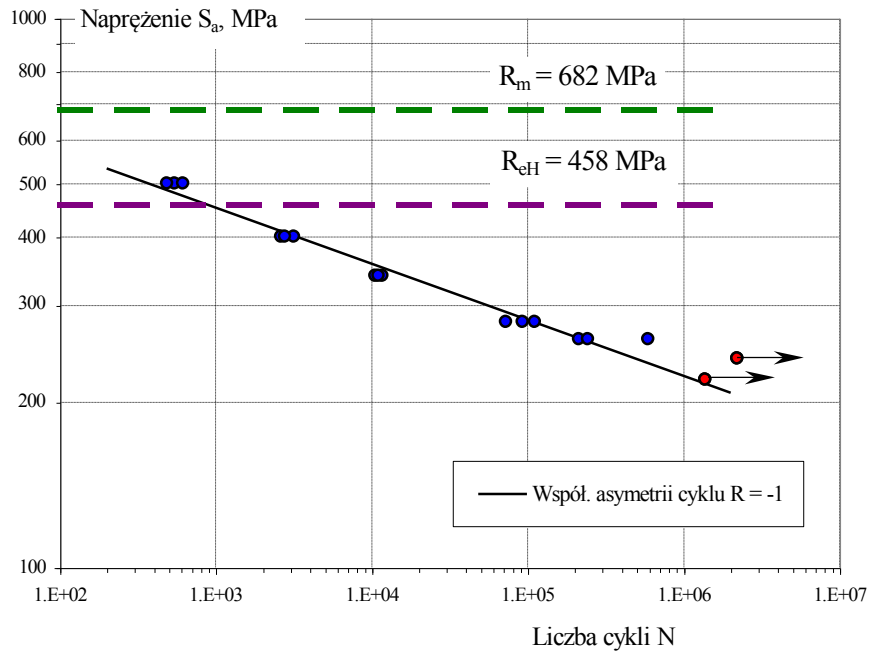
a współczynnik korelacji $R^2 = 0,9737$.

Na wykresie naniesiono poziomy R_m i R_e . Z przebiegu linii wykresowej wynika, że wykres jest linią prostą po przekroczeniu wartości R_e , która w przybliżeniu określa granicę przejścia z zakresu NCZ w WCZ. Fakt ten świadczy o tym, że do obliczeń stali C45 można przyjąć model wykresu opisany w punkcie 2 – rys. 3a.

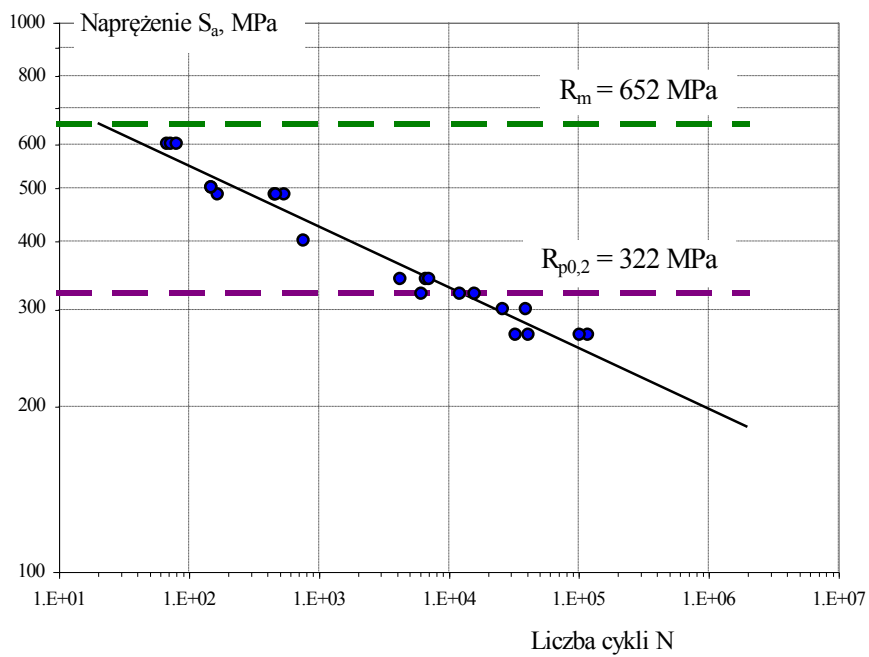
Kolejny przykład dotyczy stali austenitycznej X5CrNi18-10, której własności statyczne są następujące: $R_{0,2} = 322$ MPa, $R_m = 652$ MPa, $E = 166632$ MPa. Wykres zmęzeniowy (rys. 6) opisany jest równaniem regresji o postaci:

$$\log S_a = -\frac{1}{9,05} \log N + 2,9606 \quad (4)$$

i współczynnika regresji $R^2 = 0,9618$.



Rys. 5. Wykres trwałości zmęczeniowej Wöhlera ($S_a - N$) dla stali C45
Fig. 5. Wöhler ($S_a - N$) fatigue life curve for C45 steel



Rys. 6. Wykres trwałości zmęczeniowej Wöhlera ($S_a - N$) dla stali X5CrNi18-10
Fig. 6. Wöhler ($S_a - N$) fatigue life curve for X5CrNi18-10 steel

Podobnie jak to miało miejsce dla stali C45, prosta regresji przebiega ponad poziomem granicy plastyczności, a zatem nie zmienia swego przebiegu w zakresach NCZ i WCZ. Można założyć, że odpowiednim modelem wykresu zmęczenia jest model wykresu z rys. 3a.

Ostatni z przykładów dotyczy stopu aluminium AW-2017A o następujących własnościach wytrzymałościowych: $R_e = 320$ MPa, $R_m = 470$ MPa, $E = 73077$ MPa. Wykres zmęzeniowy wyznaczony na podstawie wyników badań (rys. 7) ma złożoną postać, różną w zakresie NCZ i w zakresie WCZ. Proste regresji dla wymienionych zakresów opisano równaniami:

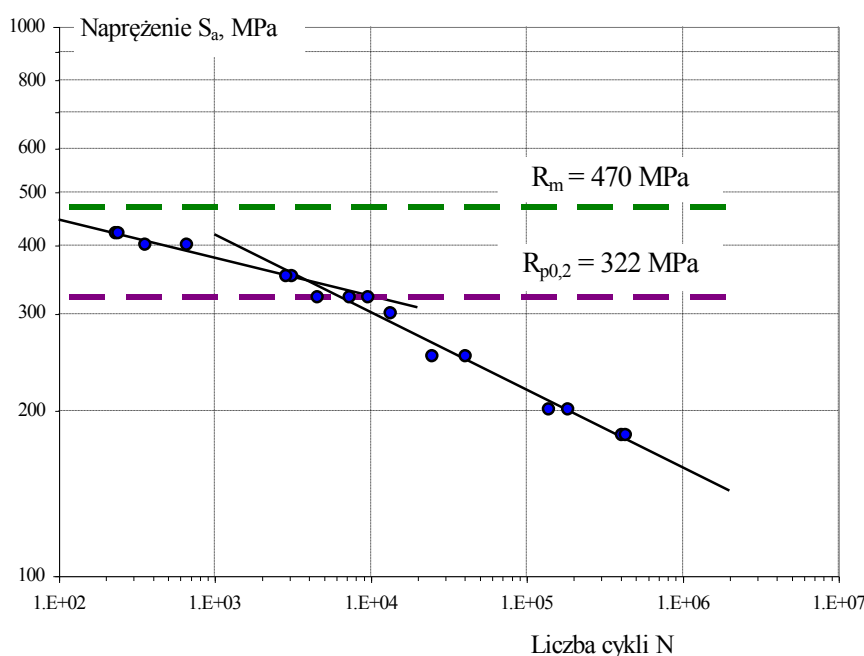
- dla zakresu NCZ:

$$\log S_a = -0,0698 \log N + 2,7898 \quad (5)$$

- dla zakresu WCZ:

$$\log S_a = -0,1412 \log N + 3,0453 \quad (6)$$

Dla przedstawionego przypadku stopu aluminium odpowiednim modelem jest model z rys. 3b.



Rys. 7. Wykres trwałości zmęzeniowej Wöhlera (S_a - N) dla stopu AW-2017A

Fig. 7. Wöhler ($S_a - N$) fatigue life curve for AW-2017A alloy

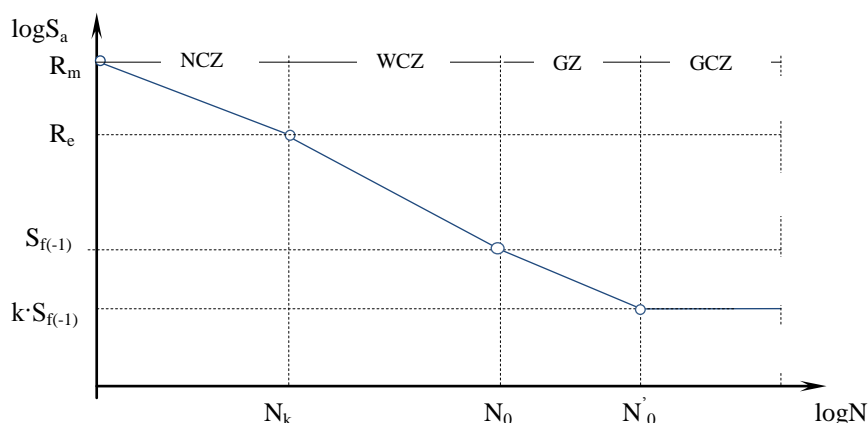
4. PODSUMOWANIE

Przykłady omówione w punkcie 3 dotyczyły opisu wykresów Wöhlera w zakresie przejścia z zakresu NCZ do WCZ. Wyniki badań i ich aproksymacja wykazały, że stałe w zakresach NCZ i WCZ mogą być z zadowalającym przybliżeniem opisane jedną prostą, natomiast w przypadku stopu aluminium lepszym przybliżeniem jest linia łamana o różnych odcinkach dla zakresów NCZ i WCZ.

Przebieg wykresów w zakresie przejścia z WCZ do GZ jest w badaniach słabo udokumentowany, przykłady opisu wykresów w tych zakresach można znaleźć w monografii [2]. Natomiast przebiegi w zakresie GCZ prowadzone są według odmiennych metod, ze

względu na długotrwałość prób. W metodach tych stosuje się wzbudniki piezoelektryczne o dużych częstotliwościach drgań, co sprawia, że warunki badań w tym zakresie odbiegają istotnie od standardowych metod badań w zakresach NCZ, WCZ i GZ. Proponowane modele w zakresach GZ i GCZ oparte są na badaniach zjawisk zmęczeniowych analizowanych metodami metalografii optycznej i elektronowej oraz badania, wpływu naprężeń mniejszych od granicy zmęczenia na trwałość zmęczeniową, które także opisane zostały w monografii [1].

Mając na względzie wielość czynników wpływających na zgodność wyników obliczeń i wyników badań doświadczalnych, modelem kompletnym wykresu zmęczeniowego, dającym wyniki po bezpiecznej stronie oszacowań trwałości, jest model przedstawiony na rys. 8. Wykres ten składa się z elementów modeli przedstawionych w punkcie 2 tego opracowania.



Rys. 8. Schematyczne ujęcie modelu kompletnego wykresu zmęczeniowego Wöhlera ($S_a - N$), zalecanego do obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych

Fig. 8. Schematic approach of the model of the complete Wöhler ($S_a - N$) fatigue life curve recommended for fatigue life calculations of structural elements

Praca naukowa sfinansowana przez MNiSzW oraz NCN w ramach projektu badawczego własnego nr 2221/B/T02/2010/39.

Bibliografia

1. Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1997.
2. Szala G., Ligaj B.: Dwuparametryczne charakterystyki zmęczeniowe stali konstrukcyjnych i ich eksperymentalna weryfikacja. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji Państwowego Instytutu Badawczego, Radom 2011.
3. Ligaj B., Szala G.: Comparative analysis of fatigue life calculation methods of C45 steel in conditions of variable amplitude loads in the low- and high-cycle fatigue ranges. Polish Maritime Research, No. 4(76), Vol. 19, Gdańsk 2012.
4. Hainbach E.: Betriebsfestigkeit. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1989.
5. Tian H., Kirhan M.J., Jiang B., Wang G., Liaw P.K.: Failure Mechanisms of Ultra High Cycle Fatigue in Engineering Materials. Proceedings of Fourth International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF-4), Michigan 2007.

6. Jasiński M., Radkowski S.: Use of the Higher Spectra and the Wigne's Analysis in the Gigacycles – Fatigue Testing. Proceedings of the World Congress on Engineering Asset Management and Intelligent Maitenance Systems (WCEAM-IMS 2008), China, Bejing 2008.
7. Novy F., Bokůvka O.: Gigacycle Fatigue at High Frequency Loading. Proceedings of the 7th International Technical Systems Degradation Seminar, Liptovsky Mikulas 2008.
8. Kocańda S.: Zmęczeniowe pękanie metali. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.
9. Szala J.: Ocena trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych. Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1980.