

Grzegorz SZALA¹

ZAŁOŻENIA PROGRAMOWANYCH BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH

W pracy omówione zostały podstawowe założenia programowanych badań elementów konstrukcyjnych, których celem jest ocena eksploatacyjnej trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w tym mechanicznych pojazdów jednośladowych. Zakres pracy obejmuje opis zagadnień modelowania: obiektu badań, obciążeń eksploatacyjnych i wymagania dotyczące stanowisk badawczych i instrumentarium badawczego.

Całość zilustrowana jest przykładem programowanych badań elementu konstrukcyjnego (węzła ramy) pojazdu jednośladowego.

ASSUMPTIONS OF PROGRAMMED FATIGUE TESTS OF CONSTRUCTIONAL ELEMENTS

The paper presents the basic assumptions of programmed tests of constructional elements. Their goal is to evaluate operating fatigue life of constructional elements including mechanical one-track vehicles. The scope of the paper includes the description of modeling issues: test object, operating loading and requirements regarding test stands and test equipment. There is presented an example of programmed tests of an constructional elements (frame node) of a one-track vehicle.

Wykaz ważniejszych oznaczeń:

S – ogólne oznaczenie naprężenia w MPa

S_{max} – naprężenie maksymalne: w cyklu sinusoidalnym, na analizowanym odcinku naprężeń losowych (np. odcinku pomiarowym obciążeń eksploatacyjnych) lub w widmie i programie obciążeń w MPa

S_{min} – naprężenie minimalne: w cyklu sinusoidalnym, na analizowanym odcinku naprężeń losowych (np. odcinku pomiarowym obciążeń eksploatacyjnych) lub w widmie i programie obciążeń w MPa

S_m – średnia wartość naprężenia: w cyklu sinusoidalnym, na analizowanym odcinku naprężeń losowych (np. odcinku pomiarowym obciążeń eksploatacyjnych) lub w widmie i programie obciążeń w MPa

S_a – amplituda naprężenia w cyklu sinusoidalnym

¹Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, 85-789 Bydgoszcz, ul. Kaliskiego 7; tel. +48 52 340 82 95, fax; +48 52 340 82 71, e-mail: szala@utp.edu.pl

S_{ai} - amplituda naprężenia w cyklach sinusoidalnym i-tego stopnia w widmie i programie obciążeń

i - numer stopnia w widmie i programie obciążeń

$t_i = \frac{n_i}{n_c} = \frac{n_{0i}}{n_{0c}}$ - udział cykli o amplitudzie $S_{a,i}$ w sumarycznej liczbie cykli w widmie lub

programie obciążeń

n_i - liczba cykli o amplitudzie $S_{a,i}$ w widmie obciążeń

n_c - sumaryczna liczba cykli w widmie obciążeń

N - liczba cykli - oznaczenie ogólne

N_i - liczba cykli do pęknięcia zmęczeniowego w warunkach obciążenia sinusoidalnego o amplitudzie $S_{a,i}$

N_c - trwałość zmęczeniowa

$F(S_a)$ - rozkład wartości cykli sinusoidalnych

C_0 i m_0 - parametry we wzorach opisujących wykres Wöhlera dla $R = -1$ w postaci wykładniczej

C i m - parametry we wzorach opisujących wykres Wöhlera dla $R \neq -1$ w postaci wykładniczej

C_t i m_t - parametry we wzorach opisujących wykres trwałości zmęczeniowej Gassnera w postaci wykładniczej

R - współczynnik asymetrii cyklu $R = S_{\min}/S_{\max}$

$S_{f(0)}$ - granica zmęczenia dla współczynnika asymetrii cyklu $R=0$ (obciążenie odzerowotętniające)

Ψ_N - współczynnik wrażliwości materiału na asymetrię cyklu.

indeksy:

ex - wyniki lub wartości eksploatacyjne

obl - wyniki lub wartości obliczeniowe

1. WPROWADZENIE

Własności cykliczne materiałów konstrukcyjnych wyznacza się w warunkach obciążenia sinusoidalnego o stałej amplitudzie. Elementy konstrukcyjne o złożonych cechach konstrukcyjnych (geometrycznych, materiałowych i dynamicznych) w złożonych warunkach eksploatacji, poddane są działaniu zmiennych losowych obciążeń.

Jedną z metod powszechnie stosowaną w badaniach trwałości zmęczeniowej jest metoda programowanych badań.

Programowane badania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych to badania prowadzone w warunkach określonego programu obciążenia zmiennoamplitudowego na obiektach rzeczywistych lub ich modelach.

Z definicji tej wynika, że w programowanych badaniach modelowaniu podlega obiekt badań oraz obciążenie eksploatacyjne.

Modelowanie obciążenia eksploatacyjnego polega na opracowaniu widma (spektrum) obciążenia, które może być uporządkowanym zbiorem cykli sinusoidalnych o zmiennych wartościach amplitudy i zmiennych wartościach średnich lub może być losowym przebiegiem obciążeń w czasie.

Podstawowym warunkiem właściwego opracowania widma obciążenia, jest równość (w sensie probabilistycznym) trwałości zmęczeniowej w warunkach eksploatacji z trwałością wyznaczoną w warunkach badań programowanych.

Widmo obciążenia stanowi podstawę opracowania programu obciążenia realizowanego na stanowiskach badawczych.

Program obciążeń opracowany na podstawie widma obciążeń posiada ściśle określony okres programu (powtarzany w badaniach aż do zniszczenia elementu konstrukcyjnego), odpowiednią sekwencję obciążeń oraz może zawierać uproszczenia polegające na pominięciu cykli o wartościach parametrów nieistotnie wpływających na wynik badania.

Autorami pierwszych prac z zakresu programowanych badań zmęczeniowych byli A. Teichman [1] i E. Gassner [2], który wprowadził do literatury nazwę „programowane badania” (programme tests). Wymienione prace dotyczyły badań samolotów. W Polsce pierwszą pracę poświęconą programowanym badaniom ramy skutera opublikowali T. J. Pindera, Z. Orłoś i K. Rościszewski [3], a pierwsze monograficzne ujęcie programowanych badań przedstawione zostało w pracach J. Szali [4] i [5].

Szeroki zakres problematyki programowanych badań zmęczeniowych uniemożliwia szczegółowy opis wszystkich zagadnień, ze względu na objętość pracy. W związku z tym poszczególne zagadnienia omówione zostaną na wysokim stopniu ogólności ze wskazaniem źródeł literaturowych, w których można znaleźć opisy poruszanych zagadnień. Wybrane zagadnienia zilustrowane zostaną przykładami badań układu nośnego motoroweru.

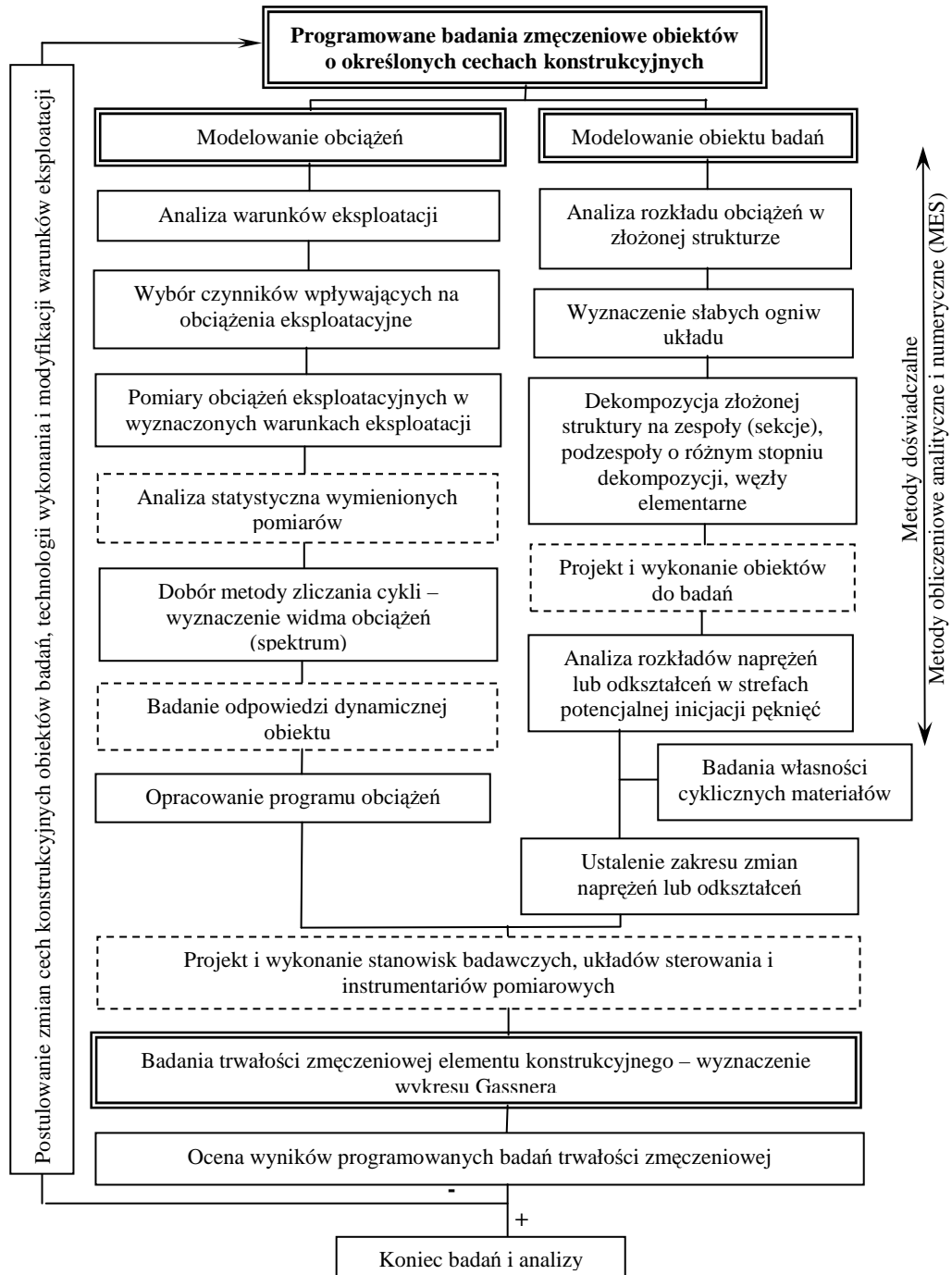
2. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA PROGRAMOWANYCH BADAŃ

W programowanych badaniach, których celem jest ocena eksploatacyjnej trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych, przyjmuje się następujące założenia:

- program obciążenia jest, w odniesieniu do trwałości zmęczeniowej, równoważny obciążeniom eksploatacyjnym,
- występuje zgodność rozkładów podstawowych parametrów obciążenia eksploatacyjnego i programu obciążeń (dotyczy to rozkładów wartości lokalnych ekstremów – minimów i maksimów),
- miejsca inicjacji pęknięć i ich fizyczna postać w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i badaniach stanowiskowych – są zgodne w skali makroskopowej,
- program obciążeń obejmuje wszystkie istotne, ze względu na trwałość zmęczeniową, sytuacje eksploatacyjne (np. warunki drogowe – rodzaj nawierzchni, profil drogi, prędkość jazdy, przyspieszenie, hamowanie, wykonywane manewry skrętu, najazdu na przeszkody drogowe i obciążenia wynikające z rozkładu mas w pojeździe itp.)
- obiekty badań, jako fragmenty złożonej struktury, wykonane są z zachowaniem technologicznych warunków wytwarzania, oraz zachowują zgodność warunków brzegowych ze stanem obciążeń wewnętrznych struktury, z której są wydzielone.

Z wymienionych wyżej założeń wynika, że podstawowymi problemami programowanych badań są: problemy modelowania obciążeń eksploatacyjnych i problemy modelowania obiektów badań.

Pełny schemat blokowy struktury programowanych badań trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych zamieszczono na rys. 1.



Rys.1. Schemat blokowy struktury programowanych badań zmęczeniowych

3. WYBRANE ZAGADNIENIA MODELOWANIA OBCIĄŻEŃ EKSPLOATACYJNYCH

Podstawowe dane o obciążeniach eksploatacyjnych pozyskiwane są z pomiarów przeprowadzanych na kompletnym obiekcie np. na pojeździe mechanicznym. Pomiary te poprzedzone są szczegółową analizą warunków eksploatacji i wyborem czynników wpływających na obciążenia eksploatacyjne [6]. Dane na ten temat uzyskuje się np. z badań ankietowych prowadzonych wśród użytkowników pojazdów, sprzedawców i punktów serwisowych oraz z badań nadzorowanych z udziałem wyselekcjonowanej grupy użytkowników, specjalnie przygotowanych pojazdów wyposażonych w odpowiednie liczniki, czujniki i rejestratory. Dane te stanowią podstawę opracowania scenariuszy eksploatacyjnych np. użytkowników motorowerów, jako podstawowego środka transportowego w środowisku wiejskim, użytkowników motorowerów, jako środka uprawiania turystyki, czy użytkowników motorowerów, jako środka uprawiania sportu. Każdy z tych scenariuszy składa się z wielu elementarnych sytuacji eksploatacyjnych, w których dokonywane są pomiary obciążeń.

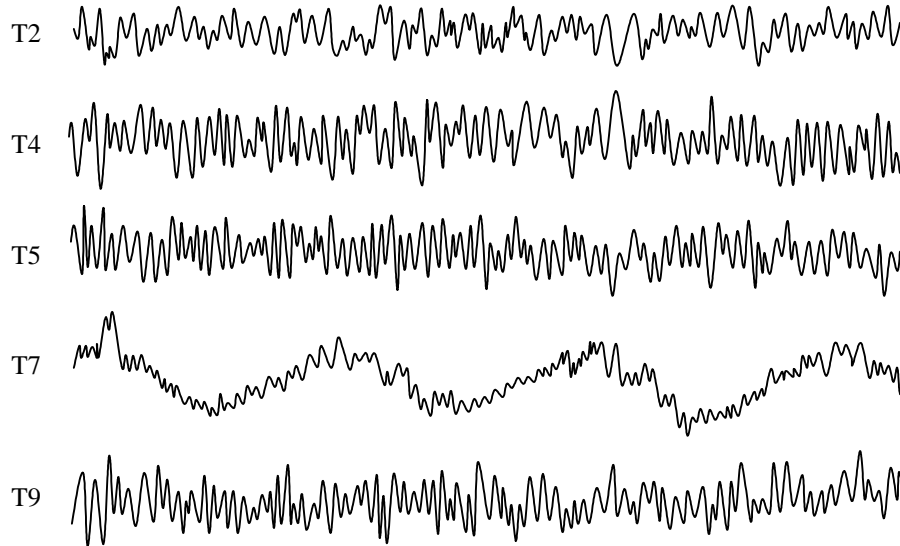
Pomiary te mogą dotyczyć: przyspieszeń, przemieszczeń, sił i momentów, które w warunkach eksploatacyjnych mają przebieg losowy. Przebiegi te zastępowane są zbiorem cykli sinusoidalnych wyznaczanych odpowiednimi metodami zliczania cykli, które opisane są m. in. w pracy [7]. Uporządkowany zbiór cykli sinusoidalnych nazywa się widmem (spektrum) obciążeń i jeśli dotyczy jedynie zmienności amplitud obciążenia, to mówi się o widmie 1D, natomiast jeśli dotyczy zmienności amplitud i wartości średnich obciążenia, to mówi się o widmie 2D [8].

Dobór odpowiedniej metody zliczania cykli powinien być poprzedzony analizą statystyczną wyników pomiarów [9]. W analizie tej istotnym elementem jest analiza funkcji widmowej gęstości mocy, ponieważ dla obciążeń szerokowidmowych, zalecaną metodą zliczania cykli jest metoda obwiedni (rain flow) [10][11].

W badaniach stanowiskowych parametrami sterującymi są zazwyczaj naprężenia lub odkształcenia, w związku z tym program obciążeń opracowywany jest jako zbiór cykli w ujęciu naprężeniowym lub odkształceniowym. Należy zatem dokonać transformacji widma obciążenia na program obciążeń przez badanie odpowiedzi obiektu badań poddanego działaniu przyspieszenia, przemieszczenia, sił lub momentów w postaci przebiegu zmiennych naprężeń lub odkształceń w obszarach potencjalnej inicjacji pęknięć. Powyższe uwagi dotyczą tzw. widm i programów blokowych.

Współczesne urządzenia badawcze umożliwiają obciążenie obiektu według programu składającego się z odcinków zarejestrowanych w warunkach eksploatacji obciążeń losowych.

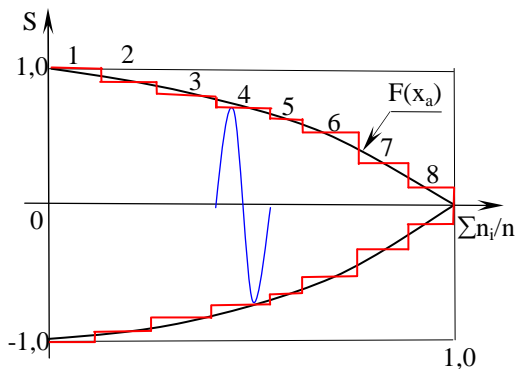
Dla przykładu na rys. 2 pokazano fragmenty zapisu losowych naprężeń zarejestrowanych w różnych punktach układu nośnego motoroweru [12].



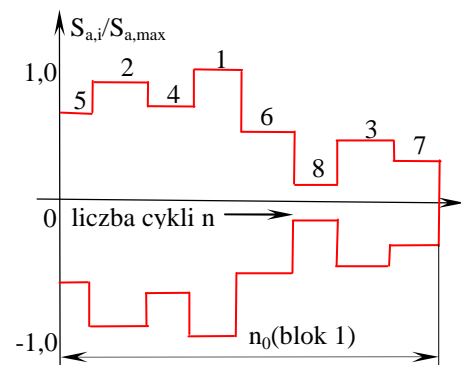
Rys. 2. Fragmenty wykresów naprężeń zarejestrowanych równocześnie w różnych punktach układu nośnego motoroweru (T2 – na widelcu koła przedniego, T4 – na ramie przy rurze kierownicy, T5 – na rurze nośnej w strefie mocowania silnika, T7 – na ramie przy zaczepie teleskopu, T9 – na tylnym wahaczu)[12]

Z pobieżnej analizy wykresów zamieszczonych na rys. 2 wynika, że w tych samych warunkach zewnętrznych obciążzeń, naprężenia w różnych jego punktach różnią się istotnie co do wartości, a przede wszystkim zmienności w czasie. Ogólnie mówiąc występuje tu cecha procesu losowego czasowo – przestrzennego, stąd wynika waga badania odpowiedzi układu na obciążenia zewnętrzne.

a)

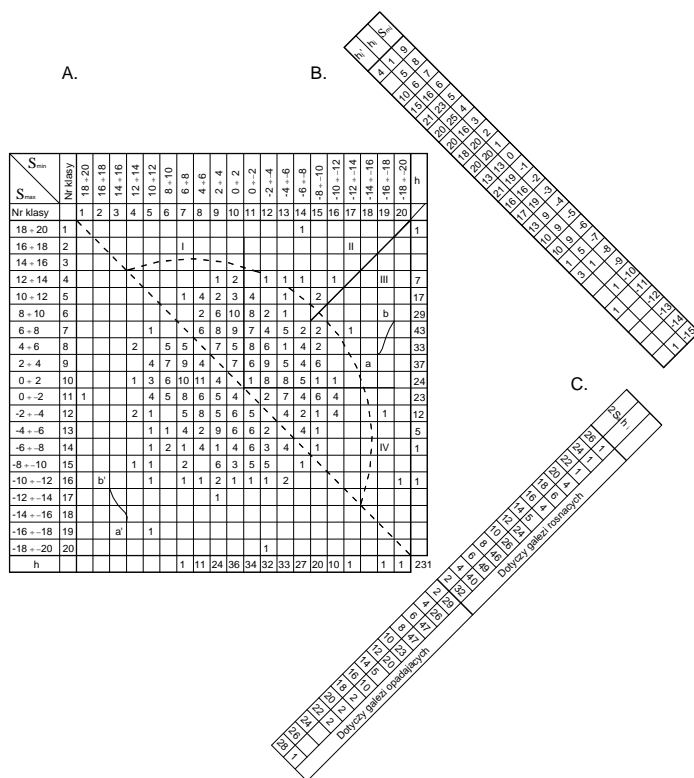


b)



Rys. 3. a) Widmo obciążeń, b) program obciążeń z nieregularnym następstwem stopni (I)

Przykłady widma i programu obciążeń typu 1D w ujęciu względnych wartości naprężeń pokazano na rys. 3. Opracowanie widma i programu obciążeń w układzie względnych wartości ułatwia dobór parametrów programu w badaniach zmęczeniowych. Szczegółowe dane dotyczące doboru parametrów programu zawarte są w pracy [12].



Rys. 4. Widmo obciążeń w postaci tabeli korelacyjnej (2D): A) zasadnicza część tabeli zawierająca liczby gałęzi rosnących i malejących o parametrach $S_{max,i}$ i $S_{min,i}$, B) pomocnicza tabela zawierająca liczby cykli o wartościach $S_{m,i}$, C) pomocnicza tabela zawierająca liczby cykli o wartościach $S_{a,i}$

Widma obciążeń zawierające cykle sinusoidalne o różnych wartościach amplitud obciążenia $x_{a,i}$ i różnych wartościach średnich cyklu x_{min} lub równoważnych parametrach $x_{min,i}$ i $x_{max,i}$ (typ 2D) opracowuje się w postaci tabel korelacyjnych. Przykład takiej tablicy wykonanej w układzie $x_{min,i} - x_{max,i}$ pokazano na rys. 4 [12]. W takim przypadku losowe obciążenie dzieli się na gałęzie rosnące zawarte pomiędzy lokalnym minimum ($x_{min,i}$) a lokalnym maksimum ($x_{max,i}$) oraz gałęzie malejące zawarte pomiędzy lokalnym maksimum ($x_{max,i}$) a lokalnym minimum ($x_{min,i}$).

Opis własności tabeli korelacyjnych i metody opracowywania na ich podstawie programów obciążeń znaleźć można w pracach B. Ligaja [13] i [14], a zastosowanie widm

2D w badaniach trwałości zmęczeniowej szybowców wykonanych z kompozytów w pracy M. Rodzewicza [15].

4. WYBRANE ZAGADNIENIA MODELOWANIA OBIEKTU BADAŃ

Obiekty o złożonej konstrukcji w wyjątkowych przypadkach i w ograniczonym zakresie podlegają badaniom zmęczeniowym. Powyższe stwierdzenie wynika ze względów technicznych i ekonomicznych i w wielu przypadkach nie jest uzasadnione celami badań.

Złożone obiekty, dużych wymiarów i masie, wytwarzane w małych seriach i o wysokiej wartości, wymagają odpowiedniego modelowania, celem zaprojektowania i wykonania prostych obiektów badań, możliwych do zastosowania w badaniach doświadczalnych w statystycznie uzasadnionych ilościach. Modelowaniu obiektów badań poświęcono szereg prac m. in. [16], [17] i [18].

W pracy [16] wyodrębniono kilka poziomów złożoności obiektów badań, od najprostszych do kompletnych struktur w naturalnej skali. Obiekty badań w tej kwalifikacji to: znormalizowane próbki, próbki z karbem, próbki z karbami wytworzone z zachowaniem technologii wykonania struktury, fragmenty struktury o różnych poziomach złożoności.

Odmianą koncepcję przyjęto w pracach [17] i [18]. Polega ona na stopniowej dekompozycji całości, która stanowi 1 poziom, następnie poziomy dotyczą dużych fragmentów złożonej struktury, mniejszych fragmentów struktury, próbek z połączeniami (z elementami połączeń), próbek z karbami. Na najniższym poziomie dekompozycji prowadzi się najszersze w sensie statystycznym badania [19] i [20] np. wpływu cech konstrukcyjnych połączeń i różnych technologii wykonania na trwałość zmęczeniową.

Po zmodyfikowaniu cech konstrukcyjnych i technologii wykonania, przeprowadzono badania weryfikacyjne, dokonując syntezy od najprostszych próbek do całej struktury. Synteza ta stanowiła lustrzane odbicie wcześniejszej dekompozycji, zawierała zatem tą samą ilość poziomów stopnia złożoności próbek i fragmentów struktury.

W pracy [21] sformułowano warunki projektowania i wytwarzania próbek i fragmentów struktury, są to:

- odwzorowanie rozkładu naprężeń lub odkształceń z rzeczywistej struktury,
- zastosowanie w połączeniach tych samych elementów, technologii wykonania i montażu, jak w rzeczywistej strukturze,
- zastosowanie tych samych materiałów, obróbek cieplnych i cieplno – chemicznych,
- zastosowanie tych samych zabiegów końcowych (umocnienia plastycznego, powłok ochronnych itp.),
- wykonania obiektów badań przez wytwórców rzeczywistej struktury (jeśli to możliwe).

Ustalenie zatem zmian parametrów sterujących w programowanych badaniach zmęczeniowych wymaga wyznaczenia zgodnie z odpowiednimi normami [19] i [20] własności statycznych i cyklicznych materiałów, z których wykonane są obiekty badań.

W modelowaniu obiektów badań stosuje się metody doświadczalne związane z pomiarami i opracowaniem wyników pomiarów rozkładu naprężeń, odkształceń lub przemieszczeń, metody obliczeń analitycznych i głównie numerycznych metodą elementów skończonych, oraz metody hybrydowe: doświadczalnie – numeryczne [22], doświadczalnie – analityczne oraz analityczno – numeryczne.

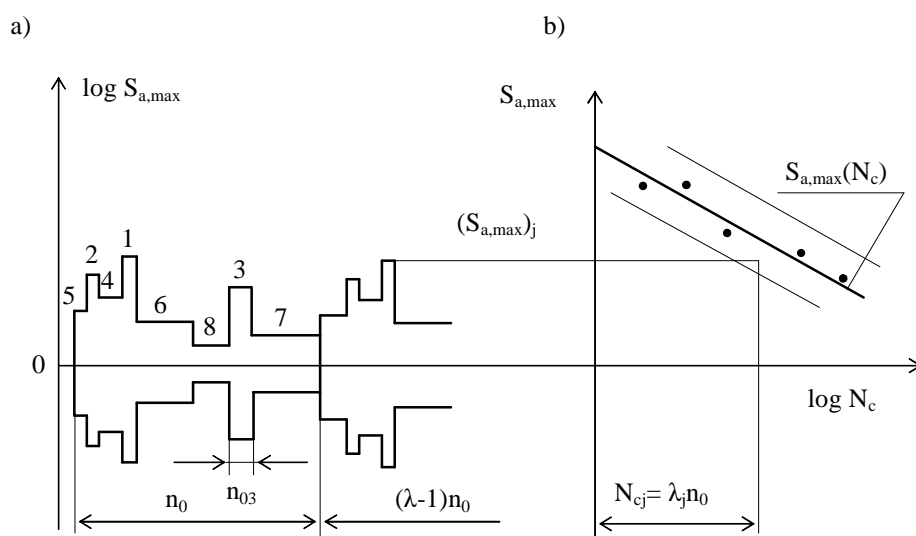
Przykład analizy obciążeń wewnętrznych w ramach pojazdów jednośladowych opisano w pracy [23].

5. PROGRAMOWANE BADANIA ZMĘCZENIOWE

Dysponując programem obciążeń opracowanym według algorytmu przedstawionego na rys. 1 i odpowiednim modelem fizycznym istnieje możliwość oceny trwałości zmęczeniowej struktury i dokonania analizy wpływu poziomu obciążeń zmiennych na jej trwałość.

Należy w tym miejscu podkreślić, że nie zawsze, zwłaszcza w procesie projektowo-konstrukcyjnym, istnieje możliwość przeprowadzenia wszystkich czynności objętych algorytmem z rys. 1. Brak tej możliwości wynika zwykle z braku fizycznych obiektów, które mogłyby być poddane pomiarom w warunkach eksploatacji. W takich przypadkach korzysta się z danych literaturowych i raportów z badań podobnych obiektów. Istnieje szereg źródeł, w których podane są standaryzowane widma (spektra) i opracowane na ich podstawie programy obciążenia, są to m. in. Opracowania [24], [25], [26] i [27] i programów o akronimie CARLOS. Omówienie standaryzowanych widm znaleźć można w pracy [9].

Wyniki programowanych badań trwałości zmęczeniowej przedstawia się zwykle w postaci wykresu, który dla uhonorowania twórcy tego rodzaju badań w literaturze niemieckojęzycznej, nazywa się wykresem Gassnera. Sposób wykreślenia tego wykresu pokazano schematycznie na rys. 5.



Rys. 5. Schemat wyznaczenia wykresu trwałości Gassnera

Dla określonej wartości ($S_{a,max}$)_j otrzymujemy λ_j powtórzeń bloku programu, a zatem trwałość zmęczeniowa równa jest (N_c)_j = $\lambda_j n_0$; tym wartościom odpowiada punkt j. Zwiększając lub zmniejszając naprężenia w programie otrzymujemy kolejną trwałość i

kolejny punkt na wykresie. Dla kilku poziomów $S_{a,\max}$ otrzymujemy zbiór punktów, który opracowujemy statystycznie w identyczny sposób, jak w przypadku wykresu zmęzeniowego ($S_a - N_c$), wyznaczonego przy obciążeniu sinusoidalnym. Z licznych badań wynika, że podobnie jak przy obciążeniu sinusoidalnym, wyniki programowanych badań w układach współrzędnych ($\log N_c$, $\log S_{a,\max}$) mogą być aproksymowane prostą w zakresie ograniczonej trwałości. Odpowiednie równanie ma postać:

$$S_{a,\max}^{m_t} N_c = C_t \quad (1)$$

lub postaci logarytmicznej

$$\log S_{a,\max} = -\frac{1}{m_t} \log N_c + c_t \quad (2)$$

Na osi odciętych na wykresie trwałości zmęzeniowej oznaczona jest całkowita liczba cykli do pęknięcia zmęzeniowego elementu konstrukcyjnego. Znając liczbę cykli zmian obciążenia eksploatacyjnego na 1 km przebiegu pojazdu lub godzinę pracy maszyny roboczej można wynik badania trwałości przeskalować z liczby cykli na przebieg pojazdu czy czas pracy maszyny roboczej.

Analiza wykresu trwałości zmęzeniowej pozwala dokonać analizy wpływu wartości zmiennych naprężeń na trwałość zmęzeniową i określić ich wartości dopuszczalne ze względu na projektową trwałość.

Ponadto stanowi cenne źródło informacji w badaniach wpływu czynników konstrukcyjnych, wytwórczych i eksploatacyjnych na trwałość zmęzeniową analizowanego (projektowanego) elementu konstrukcyjnego.

Przykład wyżej omówionego wykresu trwałości dla elementów pojazdów jednośladowych przytoczony jest w pracy autora pt. **Metoda wstępnych obliczeń trwałości zmęzeniowej elementów pojazdów mechanicznych**, zamieszczonej w tym numerze pisma.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Teichman A.: *Basic consideration on fatigue durability in service*, Jahrbuch der Deutschen Luftfahrtforschung, 1941.
- [2] Gassner E.: *Über bisherige Ergebnisse aus Festigkeitsversuchen im Sinne der Betriebsstatistik*, in Bericht 106, Lilienthal – Gesellschaft für Luftfahrtforschung Berlin, Stuttgart, 1939.
- [3] Pindera T. J., Orłoś Z., Rościszewski K.: *O pewnych zagadnieniach kształtowania wytrzymałościowego ramy skutera*, Przegląd Mechaniczny nr 16, 1960.
- [4] Szala J.: *Podstawy programowanych badań i obliczeń zmęzeniowych w konstrukcji maszyn*, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej, Warszawa, 1978.
- [5] Szala J.: *Badania i obliczenia zmęzeniowe elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych*, Prace Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, nr 6, Warszawa, 1979.

- [6] Jazdon A., Szala J., Wojciechowicz B.: *Programowane badania niezawodności i trwałości obiektów technicznych*, ATR, ZN 7, Bydgoszcz, 1977.
- [7] Kocańda S., Szala J.: *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa, 1997.
- [8] Heuler P., Klätschke H.: *Generation and use of standardized load spectra and load – time histories*, International Journal of Fatigue, 27, 2005.
- [9] Gajek L., Kałuszka M.: *Wnioskowanie statystyczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.
- [10] Norma ASTM: *Standard practices for cycle counting in fatigue analysis*, ASTM Designation: E 1049-85, 1990.
- [11] Szala J., Boroński D.: *Ocena stanu zmęczenia materiału w diagnostyce maszyn I urządzeń*, ITE-PIB, Radom, 2008.
- [12] Szala J.: *Obciążenia i trwałość zmęczeniowa elementów maszyn*, Wydawnictwo ATR, Bydgoszcz, 1989.
- [13] Ligaj B.: *Analiza zastosowania tablic korelacyjnych w badaniach trwałości zmęczeniowej*, Rozprawa doktorska, ATR, Bydgoszcz, 2006.
- [14] Ligaj B.: *Wpływ wybranych programów obciążeń wygenerowanych na podstawie tablicy korelacyjnej na trwałość zmęczeniową stali 18G2A*, Problemy Eksploatacji, ZN 3(66), 2007.
- [15] Rodzewicz M.: *Spektra obciążeń i trwałość zmęczeniowa struktury nośnej szybowców kompozytowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2008.
- [16] Schütz D., Heuler P.: *The Significance of Variable Amplitude Fatigue Testing*, ASTM STP 1231, 1995.
- [17] Kaniowski J.: *Badania wpływu geometrycznych cech konstrukcyjnych na trwałość zmęczeniową na przykładzie skrzydła samolotu PZL I-22 Iryda*, Rozprawa Doktorska, ATR, Bydgoszcz, 1998.
- [18] Szala J., Kaniowski J.: *Analysis of fatigue cracks propagation in complex structures*, ECF14, Fracture Mechanics Beyond 2000, EMAS Publishing, vol. II, 2002.
- [19] PN-76/H-04325: *Badanie metali na zmęczenie, pojęcia podstawowe i ogólne wytyczne przygotowania próbek oraz przeprowadzenia prób*.
- [20] *Standard Practice for Statistical Analysis of Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data*, ASTM E 739-91.
- [21] De Jonge J. B.: *Monitoring Loads Experience of Individual Aircraft*, ICAS 90-4.4.4.
- [22] Boroński D., Szala J.: *The hybrid strain analysis in fatigue loading conditions*, In: Fatigue 2002, Bloom ed., EMAS, 2002.
- [23] Szala J., Boroński D.: *Fatigue investigations of one-track vehicles*, Proceedings of Fatigue Design'95 – VTT Manufacturing Technology, vol. I, Helsinki, 1995.
- [24] Schütz D., Klätschke H., Steinhilber H., Heuler P., Schütz W.: *Standardized load sequences for car wheel suspension components, car loading standard – CARLOS*, LBF, IABG, Darmstadt, 1999.
- [25] Schütz D., Klätschke H.: *Standardized load sequences for car powertrains with manual gears-car loading standard-CARLOS PTM*, LBF, Darmstadt, 1997.
- [26] Klätschke H.: *Standardized load sequences for car powertrains with automatic gears-car loading standard-CARLOS PTA*, LBF, Darmstadt, 2002.
- [27] Schütz D., Klätschke H., Heuler P.: *Standardized multiaxial load sequences for car wheel suspension components-car loading standard – CARLOS multi*, LBF, Darmstadt, 1994.