

Bogdan LIGAJ

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

WPLYW WYBRANYCH PROGRAMÓW OBCIĄŻEŃ WYGENEROWANYCH Z TABLICZY KORELACYJNEJ NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ STALI 18G2A

Słowa kluczowe

Tablica korelacyjna, modelowanie obciążeń, trwałość zmęczeniowa.

Streszczenie

W artykule przedstawiono budowę tablicy korelacyjnej w układzie σ_{\min} - σ_{\max} , znajdującej zastosowanie do opisu obciążeń eksploatacyjnych, uwzględniającą zmienność wartości średnich i wartości amplitud cykli wyznaczonych w wyniku schematyzacji wymienionych obciążeń. Wybrane właściwości tablic pozwalają na ich aplikację w stanowiskowych badaniach trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych na etapie modelowania obciążeń. Wspomniane modelowanie, związane ze sposobem pobierania danych z tablicy korelacyjnej, pozwala na opracowanie wielu programów obciążenia o różnej sekwencji cykli, co w pracy zostało zobrazowane jedynie wybranymi przykładami programów. Wykazano, że trwałość zmęczeniowa badanej stali przy obciążeniach eksploatacyjnych i użytych programach obciążeń nie różni się istotnie.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

N – liczba niezależnych obserwacji funkcji obserwowanej (liczność próby),

n_λ – pojemność bloku programu obciążenia,

\hat{s}_σ^2 – estymator wariancji s_σ^2 ,

- p_i – szerokość przedziału przyjęta do analizy zmian estymatorów parametrów statystycznych,
 λ – liczba powtórzeń bloku programu obciążenia,
 $\hat{\mu}_\sigma$ – estymator wartości średniej μ_σ ,
 σ_i – wartości naprężenia na i -tym poziomie w przebiegu obciążeń, MPa,
 σ_{\max} – wartość maksymalna naprężenia w przebiegu obciążeń, MPa.

Wprowadzenie

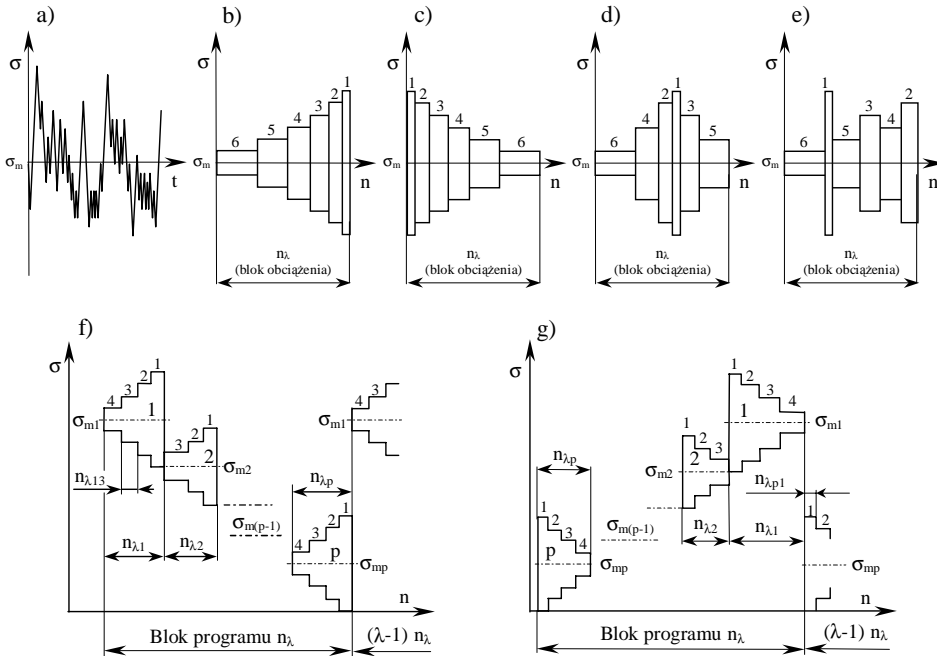
Prowadzone przez liczne ośrodki badawcze badania dotyczące charakteru i zakresu zmienności obciążeń elementów konstrukcyjnych obiektów technicznych w warunkach eksploatacji pozwoliły na wyznaczenie modeli obciążenia. Najczęściej do opisu przebiegu obciążeń stosowane są funkcje statystyczne, blokowe widma obciążenia oraz tablice korelacyjne [1, 2, 18]. Zastosowanie tych ostatnich można odnaleźć w pracach dotyczących m.in. konstrukcji lotniczych [12, 14, 20], morskich [5, 8] oraz pojazdów kołowych [3, 11].

Tablica korelacyjna w układzie σ_{\min} - σ_{\max} stanowi ciekawą i czytelną formę zapisu obciążeń eksploatacyjnych. Prosta budowa i właściwości [3, 15] tablicy wskazują na możliwość zastosowania jej w obliczeniach i badaniach stanowiących trwałości zmęczeniowej złożonych obiektów technicznych, poddanych w warunkach eksploatacji obciążeniom stochastycznym [15]. Do obliczeń oprócz tablicy korelacyjnej należy przyjąć odpowiednią dwuparametryczną charakterystykę zmęczeniową [16] i odpowiednią hipotezę kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych [17]. Można ją także stosować do modelowania obciążeń na potrzeby programowanych badań trwałości zmęczeniowej.

W badaniach z zakresu wysoko- i niskocyklowego zmęczenia stosowane są programy o losowym następstwie lokalnych ekstremów (rys. 1a) lub posiadające postać blokową, których przykłady przedstawiono na rysunku 1b÷1e [9, 13, 19]. Charakteryzują się one zmienną sekwencją wartości amplitud przy zachowaniu stałej wartości średniej oraz zmienną liczbą cykli występującą na każdym i -tym poziomie w bloku obciążenia n_i .

Programy obciążenia mogą uwzględniać także zmianę wartości średniej cykli. Przykłady przedstawione na rysunkach 1f i 1g charakteryzują się częściową stałością wartości średniej [4, 18], w których cykle zgrupowano w minibloki. Kolejność występowania cykli w każdym z nich została określona poprzez sekwencję zmian wartości amplitud. W ten sposób w programie obciążenia uzyskano stałość wartości średniej w zakresie realizacji minibloków, a zmiana wymienionej wartości następuje zgodnie z przyjętą sekwencją, np.: malejącą (rys. 1f) i rosnącą (rys. 1g). Przedstawione przykłady nie wyczerpują możliwych sekwencji następstw tej wartości. Programy obciążenia o częściowej stałości

wartości maksimum przedstawiono w pracy [7], a o częściowej stałości amplitud w pracy [6].



Rys. 1. Przykłady programów obciążeń: a – losowy, b – stopniowo rosnący (Lo-Hi), c – stopniowo malejący (Hi-Lo), d – stopniowo rosnący i malejący (Lo-Hi-Lo), e – nieregularny, f – charakteryzującego się chwilową stałością wartości średniej o sekwencji malejącej, g – charakteryzującego się chwilową stałością wartości średniej o sekwencji rosnącej [6, 18]

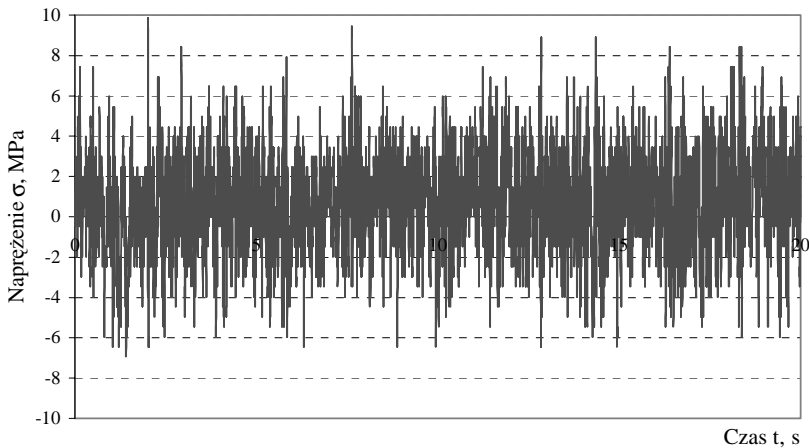
Celem pracy jest przedstawienie możliwości modelowania obciążeń o zmiennych parametrach cyklu obciążenia na podstawie danych zgromadzonych w tablicy korelacyjnej w układzie σ_{\min} - σ_{\max} .

Zakres pracy obejmuje przedstawienie sposobu opracowania tablicy korelacyjnej na podstawie obciążenia eksploatacyjnego. Na zamieszczonym przykładzie zostanie omówiona budowa tablicy korelacyjnej oraz jej wybrane właściwości pozwalające na opracowanie programów obciążeń o zmiennych parametrach charakteryzujących cykl obciążenia. Wybrane programy zostaną poddane analizie w zakresie oceny zmian chwilowej wartości średniej i wariancji oraz zastosowane w stanowiskowych badaniach trwałości zmęczeniowej.

1. Tablica korelacyjna w układzie σ_{\min} - σ_{\max}

1.1. Obciążenie eksploatacyjne

W celu przedstawienia zagadnień związanych ze sposobem modelowania obciążeń w badaniach trwałości zmęczeniowej, z dużej liczby zarejestrowanych przebiegów wybrano jeden przykładowy przebieg, który przedstawiono na rysunku 2. Obrazuje on zmianę naprężeń w czopie zwrotnicy przedniego koła samochodu osobowego podczas jazdy na wprost po nawierzchni wykonanej z kostki betonowej ze stałą prędkością równą 30 km/h.



Rys. 2. Fragment przebiegu obciążeń eksploatacyjnych

Schematyzację przebiegu eksploatacyjnego przeprowadzono metodą obwiedni [10, 11]. Wydzielone w ten sposób cykle sinusoidalne opisane są amplitudą i wartością średnią zmian naprężeń z pominięciem częstotliwości. Każdy z nich można podzielić na dwa półcykle (gałęzie): rosnący i malejący [15].

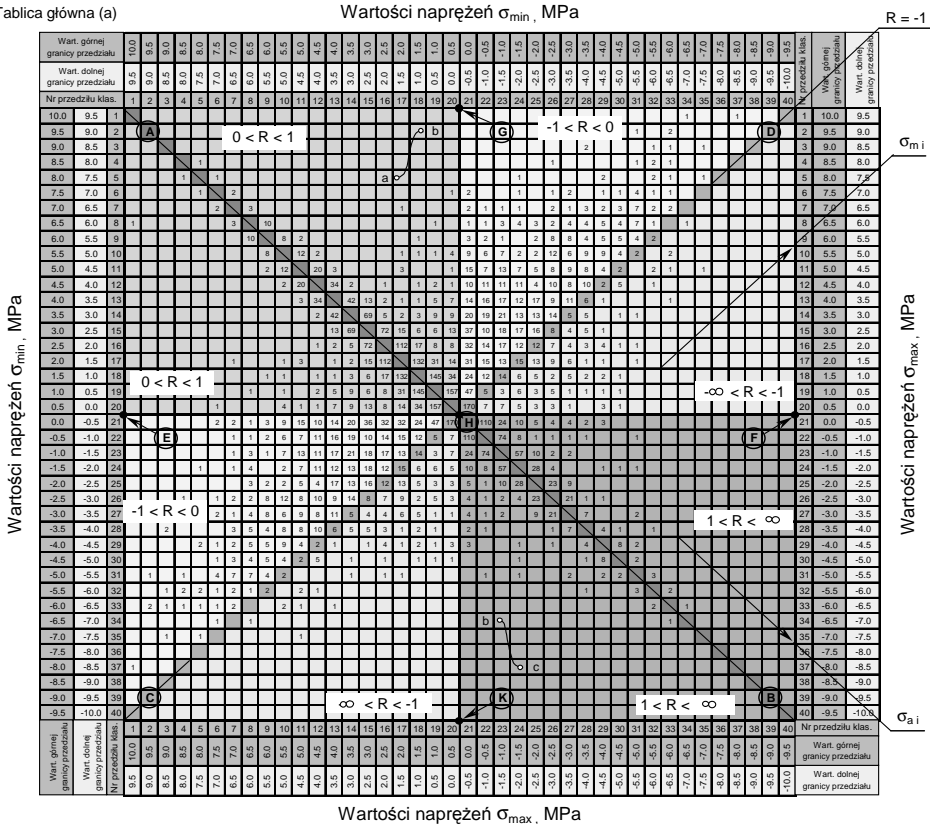
1.2. Budowa tablicy korelacyjnej

Na podstawie wyników schematyzacji eksploatacyjnego przebiegu obciążeń (rys. 2) opracowano tablicę korelacyjną w układzie σ_{\min} - σ_{\max} (rys. 3). Szczegółowy opis budowy tablicy przedstawiono w pracy [15].

Przedstawiona tablica korelacyjna posiada szereg właściwości istotnych ze względu na badania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych. Umożliwia ocenę rozkładu wartości średniej, amplitudy, minimów, maksimów oraz współczynnika asymetrii cyklu R opisujących sinusoidalny cykl obciążenia. Pozwala ona także na prowadzenie analiz obciążenia eksploatacyjnego w odniesieniu do granicy zmęczenia, granicy plastyczności oraz doraźnej wy-

trzymałości. Ponadto dane zgromadzone w tablicy głównej pozwalają na ocenę szerokości widma amplitudowego obciążenia eksploatacyjnego. W artykule pod wyżej wymienionym tytułem przedstawione właściwości tablicy zostały jedynie zasygnalizowane, a ich dokładna analiza będzie tematem kolejnych publikacji.

Tablica główna (a)



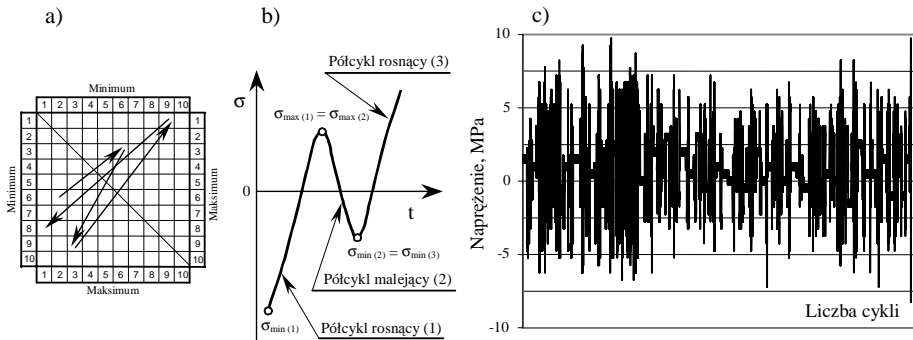
Rys. 3. Tablica korelacyjna w układzie σ_{min} - σ_{max}

2. Modelowanie obciążeń w badaniach trwałości zmęczeniowej

Budowa i właściwości tablicy korelacyjnej umożliwiają opracowywanie programów obciążeń o różnym następstwie cykli, które realizowane są poprzez właściwe pobieranie zgromadzonych danych z pola tablicy głównej (a). Spośród znanych sposobów pierwszy oparty jest na pseudolosowym pobieraniu danych, natomiast drugi polega na przeszukiwaniu tablicy korelacyjnej wg wybranego parametru opisującego cykl obciążenia.

2.1. Program obciążenia opracowany według pseudolosowego sposobu pobierania danych

Idea pseudolosowego sposobu pobierania danych z tablicy korelacyjnej opiera się na przeszukiwaniu tablicy głównej (a) (rys. 4a) i pobieraniu z niej danych w taki sposób, który pozwala na łączenie dwóch półcykli (rosnącego i malejącego) o dowolnej amplitudzie i wartości średniej. Łączone półcykle muszą posiadać część wspólną. W zależności od tego, czy łączeniu podlega półcykl rosnący z malejącym czy też półcykl malejący z rosnącym, część wspólną w pierwszym przypadku stanowi wartość σ_{\max} lub w drugim przypadku wartość σ_{\min} (rys. 4b).



Rys. 4. Schematyczne ujęcie pseudolosowego sposobu pobierania danych z tablicy korelacyjnej (a), pozwalające na łączenie cykli (b), w programie obciążenia (c)

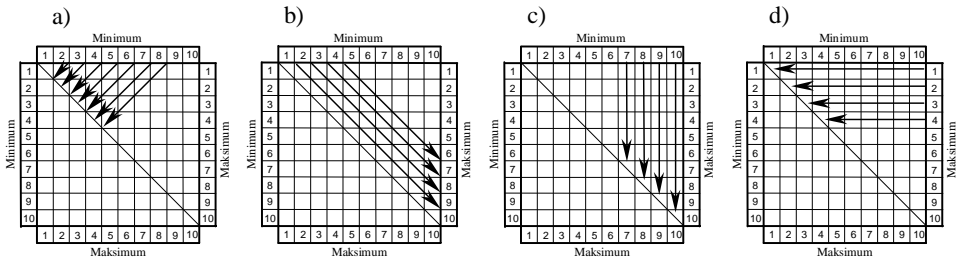
Technika budowania programów obciążeń wg pseudolosowego sposobu pobierania danych przedstawiona została w pracy [15]. Pobieranie danych z tablicy głównej (a) rozpoczyna się od wskazania części tablicy, w której w sposób losowy zostanie określone pole o wartościach σ_{\min} - σ_{\max} . Przyjęto, iż pobieranie danych rozpocznie się od części gałęzi malejących pola tablicy głównej (a). W tej części tablicy w sposób losowy wskazano pole z półcyklami o wartościach σ_{\min} - σ_{\max} . Tylko wartość σ_{\min} opisująca półcykl malejący jest brana pod uwagę i stanowi pierwsze lokalne ekstremum w budowanym programie obciążenia. Następnie przechodząc do części gałęzi rosnących tablicy głównej (a), w sposób losowy wskazano półcykl rosnący o wartościach σ_{\min} - σ_{\max} , którego wartość minimalna jest taka sama jak wartość ostatniego minimum w budowanym programie obciążenia. Spełnienie tego warunku pozwala na pobranie półcyklu rosnącego i zapisanie go jako kolejnego w budowanym programie. Liczba półcykli w polu opisanym wartościami σ_{\min} - σ_{\max} , z którego pobrano półcykl, zostaje pomniejszona o 1. Następnie w części gałęzi malejących tablicy głównej

(a) w sposób losowy wskazano półcykl malejący o wartościach σ_{\min} - σ_{\max} , którego wartość maksymalna posiada taką samą wartość jak ostatnie maksimum w budowanym programie obciążenia. Spełnienie tego warunku pozwala na pobranie półcyklu malejącego i zapisanie go jako kolejnego w budowanym programie. Liczba półcykli w polu opisanym wartościami σ_{\min} - σ_{\max} , z którego pobrano półcykl, zostaje pomniejszona o 1. Następnie z części gałęzi rosnących pobierany jest półcykl rosnący, a po nim ponownie półcykl malejący z części gałęzi malejących wg określonych zasad. Każdy pobierany półcykl wchodzi w skład budowanego programu obciążenia, a pobieranie trwa do chwili wyczerpania danych w tablicy głównej (a).

Korzystając z przedstawionego algorytmu pobierania danych i tablicy korelacyjnej w układzie σ_{\min} - σ_{\max} (rys. 3) dla obciążenia eksploatacyjnego opracowano program obciążenia (rys. 4c).

2.2. Program obciążenia o częściowej stałości wybranych parametrów cyklu obciążenia

Tablice korelacyjne pozwalają na modelowanie obciążeń według kryteriów, którymi są parametry opisujące cykl obciążenia. Zaliczyć do nich można wartości: średnią (rys. 5a), amplitudę (rys. 5b), minimum (rys. 5c) i maksimum (rys. 5d), których rozkłady w tablicy korelacyjnej są ściśle określone i zgodne z oznaczonymi na rysunkach.



Rys. 5. Schematyczne ujęcie sposobu pobierania danych z tablicy korelacyjnej: a – wg stałej wartości średniej, b – wg stałej wartości amplitudy, c – wg stałej wartości minimum, d – wg stałej wartości maksimum

Zróznicowanie programów obciążeń zależy od przyjętego sposobu pobierania cykli z tablicy głównej (a) oraz przyjętej sekwencji następstw parametru głównego i uzupełniającego. Głównym parametrem programu jest parametr cyklu wyznaczający kierunek poruszania się po polach tablicy korelacyjnej. Natomiast parametrem uzupełniającym jest parametr stanowiący uzupełnienie

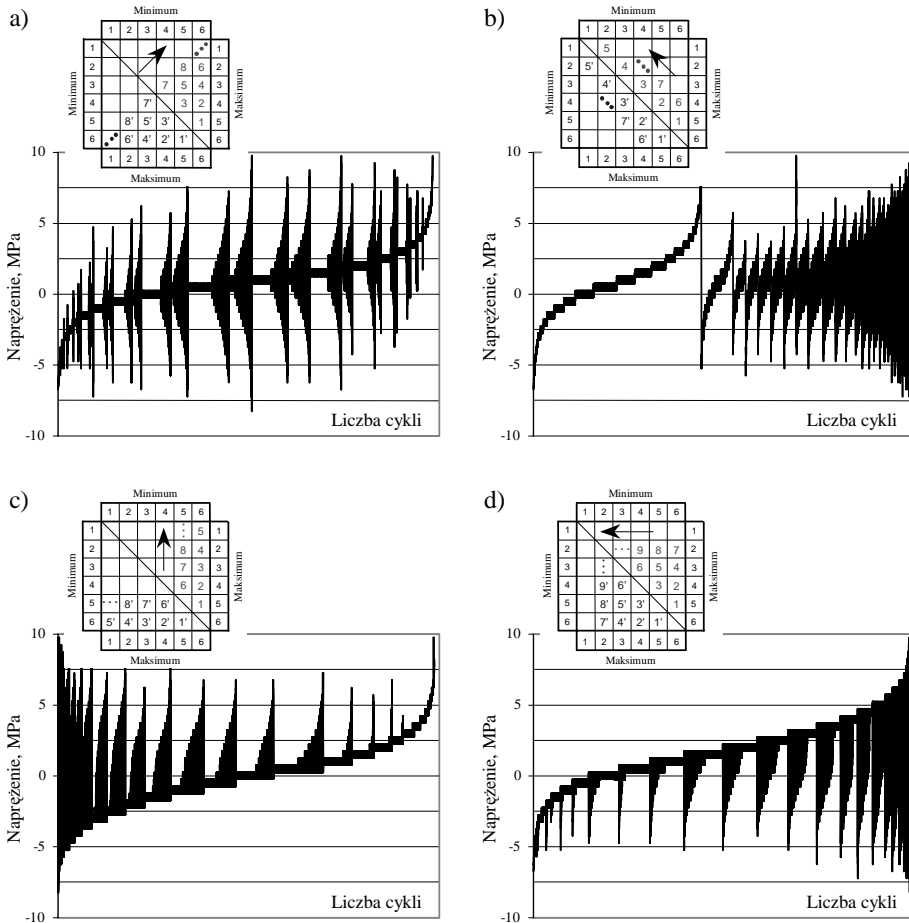
opisu cyklu obciążenia. Sekwencje pobierania parametru głównego i uzupełniającego nie są ze sobą związane i każdy z tych parametrów może być pobierany w inny sposób. Zawarte w tablicy dane można pobierać w sposób rosnący (Lo-Hi), malejący (Hi-Lo), pseudolosowy, na przemian zaczynając od jej środka lub od jej granic oraz w sposób odpowiadający programom o sekwencji Lo-Hi-Lo czy też Hi-Lo-Hi, co umożliwi opracowywanie różnorodnych programów obciążeń ze względu na sekwencję następstw cykli w bloku programu. Wymienione sposoby nie wyczerpują wszystkich możliwych sekwencji, a są jedynie wybranymi przykładami.

Szerokie możliwości opracowywania obciążeń ilustruje kostka morfologiczna przedstawiona w pracy [15]. Sposób pobierania cykli o określonych wartościach parametru głównego i uzupełniającego określa kolejność pobierania danych z tablicy, a tym samym ustala ich sekwencję w programie obciążenia. Parametr główny wyznacza kierunek przeszukiwania tablicy korelacyjnej, wzdłuż którego występują cykle o takiej samej wartości parametru głównego i zmiennej wartości parametru uzupełniającego. Pobieranie cykli leżących na wyznaczonym kierunku następuje zgodnie z przyjętą sekwencją pobierania parametru uzupełniającego. Gdy zostaną pobrane wszystkie cykle dla wyznaczonego kierunku, określany jest nowy kierunek pobierania danych zgodny z przyjętym sposobem pobierania parametru głównego, który jest równoległy do wcześniej wyznaczonego. Dla każdego kolejnego wyznaczonego kierunku dane z tablicy korelacyjnej pobierane są wg sekwencji pobierania parametru uzupełniającego.

Przykładowe programy obciążeń według przedstawionego powyżej sposobu pobierania danych opracowano na podstawie tablicy korelacyjnej prezentowanej na rysunku 3. Ze względu na objętość pracy liczba przykładów została ograniczona jedynie do wybranych programów charakteryzujących się częściową stałością wartości: średnich (rys. 6a), amplitud (rys. 6b), minimum (rys. 6c) i maksimum (rys. 6d).

W wymienionych przykładach zmiana parametru głównego i uzupełniającego przebiega według sekwencji rosnącej. Kolejność pobierania danych z tablicy korelacyjnej, dla przedstawionych przykładów, została oznaczona cyframi na schematycznych rysunkach zamieszczonych obok programów obciążeń. Z pól o takich samych wartościach minimum i maksimum, mieszczących się w części gałęzi rosnących i malejących tablicy, pobierane były półcykle (na przemian rosnący i malejący) do chwili wyczerpania danych. Potem następowało przejście do kolejnego pola i pobieranie danych do wyczerpania.

Wszystkie przedstawione programy obciążeń posiadają taką samą liczbę cykli wynoszącą 2774, równą liczbie cykli w obciążeniu eksploatacyjnym.



Rys. 6. Przykładowe programy obciążeń charakteryzujące się częściową stałością wartości: a – średnich, b – amplitud, c – minimów i d – maksimów

3. Warunki i wyniki badań trwałości zmęczeniowej

3.1. Obiekt badań

Badania trwałości zmęczeniowej przeprowadzono na próbkach materiałowych wykonanych ze stali niskostopowej o podwyższonej wytrzymałości 18G2A o strukturze ferrytyczno-perlitycznej i składzie chemicznym, który przedstawiono w tabeli 1. Zawartość poszczególnych pierwiastków w przyjętej stali jest zgodna z normą PN-EN 10025-2: 2005.

Tabela 1. Wyniki badań składu chemicznego stali 18G2A

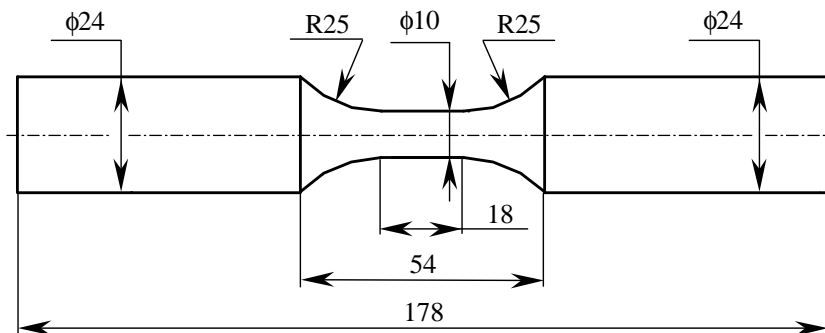
	Skład chemiczny stali, %														
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Ti	Sn	Zn	Mg	
Wg PN- EN	Max			Max					min						
	0,20	1,00 ÷ 1,65	0,20 ÷ 0,55	0,040 0,035	0,040 0,035	0,30	0,30	0,30	0,02	–	–	–	–	–	
Wg badań	Średnie wartości zawartości pierwiastków w stali														
	0,194	1,381	0,329	0,012	0,021	0,076	0,118	0,241	0,025	0,015	0,005	0,022	0,022	0,047	

Własności wymienionego stopu w warunkach obciążeń rozciągających wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 10002-1+AC1 na 35-ciu znormalizowanych próbkach walcowych pięciokrotnych o przekroju kołowym. Średnie wartości parametrów opisujących własności statyczne stali wraz z określoną wartością odchylenia standardowego zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Własności statyczne stali 18G2A w warunkach obciążeń rozciągających

	Własności statyczne stali				
	R_{eL}	R_m	E	A_5	Z
	MPa	MPa	MPa	%	%
Wartość średnia	499,9	678,0	208 159	17,2	59,8
Odchylenie standardowe	8,4	7,1	1 306	0,99	0,90

Do badań trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych zastosowano próbki walcowe o przekroju kołowym (rys. 7) zgodne z normą PN-74/H-04327 wykonywane z pręta ciągniętego okrągłego o średnicy 25 mm w stanie dostawy.



Rys. 7. Próbką do badań zmęczeniowych

3.2. Stanowisko badawcze

W skład stanowiska badawczego wchodziły: maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8502 wraz z układem sterująco-pomiarowym, ekstensometr o bazie pomiarowej 10 mm, mostek tensometryczny ESAM TRAVELLER 1 oraz komputer PC. Istotne znaczenie dla pracy stanowiska badawczego miało specjalistyczne oprogramowanie pozwalające na sterowanie maszyną wytrzymałościową z poziomu komputera PC oraz na rejestrację i archiwizację wyników pomiarów.

3.3. Programy obciążeń

W badaniach trwałości zmęczeniowej zastosowano obciążenie eksploatacyjne (Rys. 2), które posłużyło do opracowania tablicy korelacyjnej w układzie σ_{\min} - σ_{\max} . Na podstawie danych zgromadzonych w tablicy opracowano programy obciążeń, spośród których do badań doświadczalnych przyjęto jedynie wybrane przykłady:

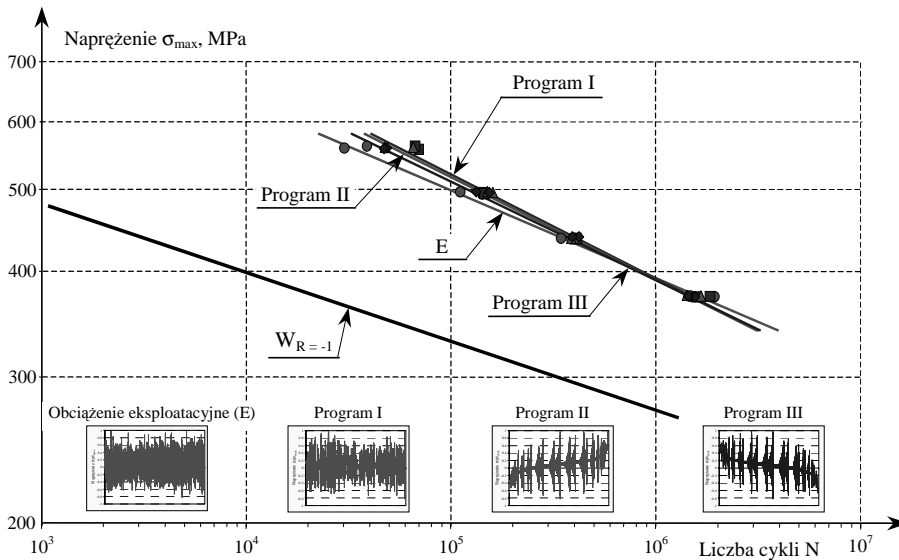
- a) program opracowany wg pseudolosowego sposobu pobierania danych (rys. 4c),
- b) program o częściowej stałości wartości średniej zmiennej rosnąco oraz zmiennej rosnąco wartości amplitudy (rys. 6a),
- c) program o częściowej stałości wartości średniej zmiennej malejąco oraz zmiennej rosnąco wartości amplitudy.

Wymienione programy na potrzeby badań stanowiskowych przedstawiono w układzie wartości względnych σ_i/σ_{\max} , gdzie wartość σ_{\max} była największą wartością obciążenia występującą w obciążeniu eksploatacyjnym. Zmianę wartości lokalnych ekstremów w programach przeprowadzano na drodze skalowania względem wartości maksymalnej występującej w programie. Badania trwałości zmęczeniowej przeprowadzono na czterech poziomach naprężeń maksymalnych: 370 MPa, 430 MPa, 490 MPa, 550 MPa.

Pierwszym przebiegiem obciążeń zastosowanym w badaniach trwałości zmęczeniowej było obciążenie eksploatacyjne. Uzyskane wyniki z jego udziałem stanowiły punkt odniesienia dla wyników trwałości otrzymanych dla przyjętych programów obciążeń.

3.4. Wyniki badań trwałości zmęczeniowej

Na podstawie uzyskanych wyników badań trwałości zmęczeniowej próbek materiałowych wykonanych ze stali 18G2A w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych w oparciu o określone sposoby pobierania danych z tablicy korelacyjnej wyznaczono średnie wartości trwałości zmęczeniowej. Wzajemne położenie charakterystyk dla poszczególnych przebiegów obciążeń, o różnych wartościach współczynników kierunkowych i wyrazach wolnych, przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Wyniki badań trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń: $W_{R=-1}$ – wahadłowych ($R = -1,0$), E – eksploatacyjnych, Program I – programowanych wg pseudolosowego sposobu pobierania danych, Program II – programowanych z częściową stałością wartości średniej zmiennej rosnąco, Program III – programowanych z częściową stałością wartości średniej zmiennej malejąco

Postać równania opisującego wykres trwałości zmęczeniowej zależna jest od charakteru obciążenia, co przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie wartości współczynników opisujących wykresy trwałości

Rodzaj obciążeń	Postać równania	Współ. kierunkowy	
		a	b
Wahadłowe ($R = -1$)	$\log \sigma_{\max} = a \log N + b$	-0,0811	2,9247
Eksploatacyjny		-0,1064	3,2280
Program I		-0,1224	3,3282
Program II		-0,1209	3,3172
Program III		-0,1160	3,2874

4. Analiza porównawcza wyników badań w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych

Ocenę wyników trwałości zmęczeniowej uzyskanych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych przeprowadzono z zastosowaniem analizy statystycznej, której celem było:

- zweryfikowanie hipotezy H_0 : o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej uzyskanych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programo-

wanych, wobec hipotezy H_1 , że nie wszystkie średnie badanych populacji są równe,

- b) zweryfikowanie hipotezy H_0 : o równości współczynników kierunkowych prostych regresji wyznaczonych na podstawie wyników uzyskanych dla obciążeń programowanych względem współczynnika kierunkowego prostej wyznaczonej dla obciążenia eksploatacyjnego, wobec hipotezy H_1 , mówiącej o braku równości współczynników kierunkowych wymienionych wyżej prostych regresji.

Weryfikację hipotezy o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej przeprowadzono wykorzystując test istotności dla wielu średnich. Wymieniony test przeprowadzono biorąc pod uwagę wszystkie uzyskane wyniki trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń losowych i programowanych.

Na podstawie przeprowadzonego testu istotności (analizy wariancji) na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ dla stopni swobody $n_1 = 3$ i $n_2 = 28$ nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej H_0 o równości średnich wartości trwałości zmęczeniowej uzyskanych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych.

W analizie dotyczącej oceny wartości współczynników kierunkowych wyznaczonych dla prostych regresji przy obciążeniu eksploatacyjnym i programowanym, wg przyjętych do badań sposobów pobierania danych z tablicy korelacyjnej, wykorzystano test równoległości.

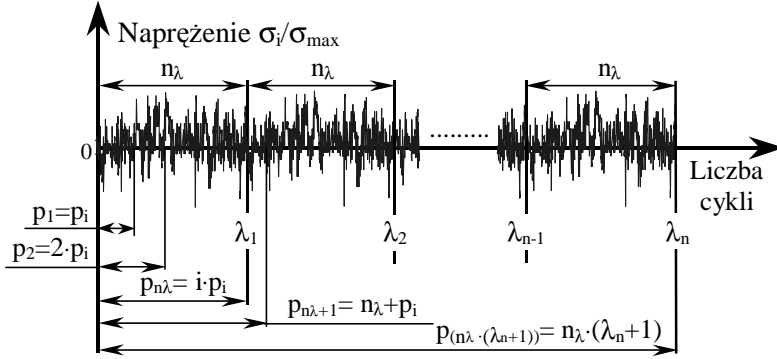
Na podstawie przeprowadzonego testu istotności (testu równoległości) na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ dla $n = 12$ stopni swobody nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej H_0 o równości współczynników kierunkowych prostych regresji wyznaczonych na podstawie wyników uzyskanych dla obciążeń programowanych względem współczynnika kierunkowego prostej wyznaczonej dla obciążenia eksploatacyjnego.

Analiza statystyczna wykazała, iż różnice w wynikach trwałości zmęczeniowej uzyskanych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych są nieistotne. Świadczy to o braku istotnego wpływu sekwencji cykli w programie obciążenia na trwałość zmęczeniową.

5. Analiza metod modelowania obciążeń w odniesieniu do charakteru obciążeń losowych

Porównując programy obciążeń, opracowanych na podstawie tablicy korelacyjnej, o częściowej stałości wartości średniej (rys. 6a), amplitudy (rys. 6b), minimum (rys. 6c) i maksimum (rys. 6d) oraz opracowany wg pseudolosowego sposobu pobierania danych (rys. 4c) z obciążeniem eksploatacyjnym (rys. 2), analizowano zmianę wartości składowej statycznej i dynamicznej obciążenia w bloku programu oraz podczas realizacji wielu jego powtórzeń. Bloki programów opisane wartościami względnymi σ_i/σ_{\max} zestawiono w sposób przedsta-

wiony na rysunku 9 i podzielono na przedziały, w których wyznaczano wybrane parametry statystyczne.



Rys. 9. Schematyczne przedstawienie sposobu wyznaczania estymatora wartości średniej i wariancji w powtarzających się blokach obciążenia

Szerokość pierwszego przedziału wynosiła 50 cykli obciążenia, a każdy kolejny zawierał wcześniejszy przedział i był powiększony o kolejnych 50 cykli. Wartość estymatora wartości średniej i wariancji w analizowanym przedziale obliczono według zależności:

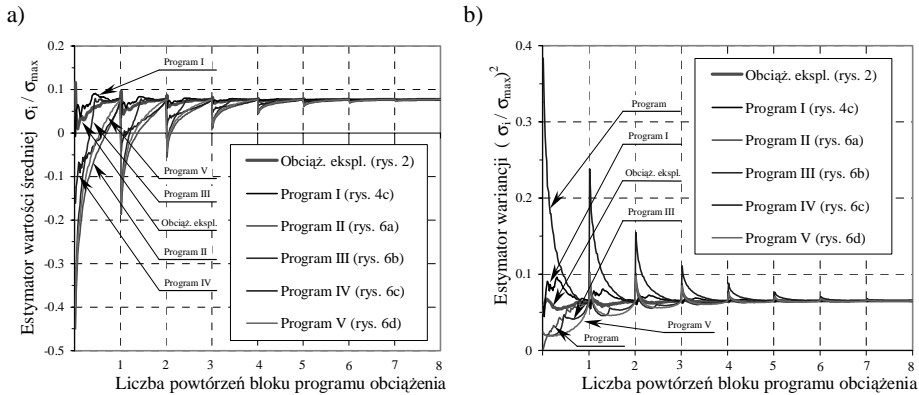
a) estymator wartości średniej

$$\hat{\mu}_{\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (1)$$

b) estymator wariancji

$$\hat{s}_{\sigma}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\sigma_i - \hat{\mu}_{\sigma} \right)^2 \quad (2)$$

Wyniki obliczeń dla wybranych programów obciążeń przedstawiono na rysunku 10. Analiza uzyskanych wyników w zakresie realizacji tylko jednego bloku obciążenia eksploatacyjnego wykazała znaczące zmiany wartości estymatora wartości średniej (rys. 10a) i wariancji (rys. 10b) występujące w początkowych przedziałach, w stosunku do wartości wymienionych parametrów wyznaczonych dla całego bloku. Stabilizacja wymienionych estymatorów dla obciążenia eksploatacyjnego następuje po realizacji około 65% cykli w bloku obciążenia.



Rys. 10. Wykresy zmian estymatora wartości średniej (a) i estymatora wariancji dla wybranych przebiegów obciążeń (b)

Analiza zmian wartości parametrów statystycznych obciążenia eksploatacyjnego w kolejnych powtarzających się blokach programu wskazuje na ich stabilizację na poziomie wartości dla całego bloku. Widoczny wzrost wartości w początkowej fazie realizacji bloku maleje dla kolejnych jego powtórzeń osiągając nieznaczne wahania wartości parametrów statystycznych w zakresie całego bloku programu. W przypadku estymatora wartości średniej stabilizacja następuje po ośmiu, a w przypadku estymatora wariancji po sześciu powtórzeniach bloku.

Najbardziej zbliżonym wizualnie programem do obciążenia eksploatacyjnego jest program oparty na pseudolosowym sposobie pobierania danych (oznaczonego na rys. 10 jako program I). Wykres zmian estymatora wartości średniej dla wymienionego programu jest zbliżony do wykresu dla obciążenia eksploatacyjnego, natomiast przebieg zmian estymatora wariancji ma zdecydowanie inny przebieg praktycznie w całym zakresie bloku. Stabilizację parametrów statystycznych dla powtarzających się bloków analizowanego programu uzyskano po pięciu powtórzeniach.

Wyznaczono także wykresy zmian parametrów statystycznych dla wybranych programów obciążeń zbudowanych na podstawie tablicy korelacyjnej. Do analizy przyjęto programy o częściowej stałości wartości średnich, amplitud, minimów i maksimów przedstawionych na rysunku 6.

Programy obciążenia o częściowej stałości określonych parametrów cyklu obciążenia zmiennych rosnąco wykazują wyraźne różnice wartości estymatora wartości średniej i wariancji w stosunku do wartości uzyskanych dla obciążenia eksploatacyjnego w zakresie realizacji jednego bloku programu. Z wyjątkiem programu III, dla którego widoczna jest stabilizacja estymatora wartości średniej

po realizacji około 50% cykli w bloku, inne programy wykazują zmienność parametrów statystycznych w zakresie realizacji całego bloku.

Wraz z kolejnymi powtórzeniami bloku programu wartości parametrów statystycznych stabilizują się osiągając zbliżone wartości do wyznaczonych dla obciążenia eksploatacyjnego. Wymagana liczba powtórzeń wynosi 8, a stabilizacja wartości zachodzi w podobny sposób jak dla wcześniej omawianego programu.

Wyznaczone wartości parametrów statystycznych, dla analizowanych programów obciążenia, wykazują stabilizację wraz z kolejnymi powtórzeniami bloku programu. Można zauważyć, że wartości wymienionych parametrów uzyskane dla całego bloku i kolejnych jego powtórzeń są takie same dla wszystkich analizowanych programów obciążenia. Po ośmiu powtórzeniach bloku wartości estymatora wartości średniej i wariancji kształtują się na poziomie wartości dla obciążenia eksploatacyjnego. Zatem różnice dotyczące tylko jednego bloku programu stają się nieistotne przy wielokrotnym jego powtarzaniu ze względu na stabilizację wartości wymienionych parametrów statystycznych.

Podsumowanie

Tablica korelacyjna znajduje zastosowanie w programowanych badaniach trwałości zmęczeniowej na etapie opracowywania programów obciążeń. Wykorzystując przedstawione metody pobierania danych z tablicy można opracować wiele różnych programów obciążeń, ze względu na sekwencje następstw cykli. Istotną cechą wszystkich programów opracowanych na podstawie jednej tablicy korelacyjnej jest to, że posiadają one taki sam rozkład wartości minimumów, maksimumów, średnich i amplitud oraz taką samą liczbę cykli w bloku programu. Dlatego programy obciążenia opracowane na podstawie tablicy korelacyjnej można uznać jako równoważne obciążeniu eksploatacyjnemu w zakresie dużej liczby cykli.

Analiza statystyczna wyników badań zmęczeniowych, w warunkach obciążeń eksploatacyjnych i programowanych, wykazała nieistotność różnic trwałości zmęczeniowej próbek wykonanych ze stali 18G2A. Powyższe spostrzeżenie ma bardzo ważne znaczenie ze względu na możliwość zastąpienia w warunkach laboratoryjnych obciążenia eksploatacyjnego obciążeniem programowanym o określonej sekwencji cykli, opracowanym na podstawie tablicy korelacyjnej.

Analiza zmian wartości estymatora chwilowej wartości średniej i wariancji w programach obciążenia wykazała duże różnicowanie w zakresie realizacji jednego bloku programu. Wraz z kolejnymi jego powtórzeniami następuje stabilizacja wymienionych parametrów statystycznych. Po około ośmiu powtórzeniach bloku każdego z analizowanych programów wartości estymatorów są zbliżone do wartości estymatorów wyznaczonych dla obciążenia eksploatacyjnego w zakresie całego bloku. Świadczy to o równoważności programów opracowa-

nych na podstawie tablicy korelacyjnej pod względem zmiany estymatora wartości średniej i wariancji dla realizacji większej liczby powtórzeń bloku niż osiem, co jest praktycznym wskazaniem do prowadzenia programowanych badań zmęczeniowych.

Bibliografia

1. Argyris J., Aicher W., Ertelt J.: Analyse und Synthese von Betriebsbelastungen. Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen Universität Stuttgart, ISD – Bericht Nr 193. Stuttgart, Februar 1976.
2. Argyris J., Aicher W., Ertelt J.: Adaptive Prüfmaschinenkorrektur. Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen Universität Stuttgart, ISD – Bericht Nr 301. Stuttgart, April 1983.
3. Berger C., Elitz K. G., Heuler P., Kotte K. L., Naundorf H., Schuetz W., Sonsino C.M., Wimmer A., Zenner H.: Beribsfestigkeit in Germany – an overview. *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, 2002, s. 603÷625.
4. Fischer R., Haibach E.: Simulation von Baunspruchungs – Zeit – Funktionen in Versuchen zur Beurteilung von Werkstoffen. Schenck – Druckschrift P5941, Düsseldorf 1979.
5. Germanischer Lloyd Group: Fatigue Strength of Ship Structures. Hamburg 1997.
6. Kocańda S., Szala J.: Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
7. Lee L.J., Fu K.E., Yang J.N.: Prediction of fatigue damage and life for composite laminates under service loading spectra. *Composites Science and Technology*, 56, 1996, s. 635÷648.
8. Load Criteria for Ship Structural Desing, SSc – 240 Technikal Raport, 1973.
9. Mroziński S.: Influence of loading program sequennce on the course of the 45 steel stabilization process. *The Archive of Mechanical Engineering*, Vol. L, 2003, Number 4, s. 387÷401.
10. Norma ASTM: Standard Practices for cykle counting in fatigue analysis. ASTM Designation: E 1049-85 (Reapproved 1990).
11. Praca zbiorowa pod redakcją Rice R. C.: Fatigue Design HandBook. Second Edition, Society of Automotive Engineers, Warrendale 1988.
12. Praca zbiorowa: Description of a Fighter Aircraft Loading Standard for Fatigue. Evaluation 1979.
13. Schijve J: Fatigue of structures and materials. Kluwer Academic Publishers 2001.
14. Schultz W.: Standardized Stress – Time Histories – An Overview. Development of Fatigue Loading Spectra. ASTM STP 1006. American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1989.

15. Szala J., Ligaj B.: Tablice korelacyjne dla obciążeń eksploatacyjnych – budowa, właściwości i zastosowanie. Materiały konferencyjne. X Jubileuszowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Stare Jabłonki 2005, s. 531÷541.
16. Szala J., Lipski A.: Koncepcja opisów własności zmęczeniowych materiałów w obliczeniach trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, Zeszyt 2 (142), Vol. 40, 2005.
17. Szala J.: Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1998.
18. Szala J.: Obciążenia i trwałość zmęczeniowa elementów maszyn, Cz. I, Wyd. II, Bydgoszcz 1989.
19. Szala J.: Wpływ sekwencji obciążeń na trwałość zmęczeniową. Mechanika Teoretyczna i Stosowana, nr 2, 16, 1978.
20. ten Have A.: European Approaches in Standard Spectrum Development. Development of Fatigue Loading Spectra. ASTM STP 1006. American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1989.

Recenzent:

Ewald MACHA

The influence of selected loading programmes generated from the correlation table on fatigue life of 18G2A steel

Key words

Correlation table, loading modelling, fatigue life.

Summary

The article presents the construction of a correlation table in the system σ_{\min} - σ_{\max} , which is used to describe service loading and that demonstrates changes of average values and amplitude cycles values defined as a result of the loading schematization. The chosen features of table enable their application in the loading modelling phase of construction elements fatigue life in laboratory stand. The modelling is connected with the way of data taking from correlation tables. It allows to create a variety of loading programmes with different cycles' sequences. Only some examples of programmes has been shown in the article. It has been proved that fatigue life of the tested steel under service loading and used cyclic programme loading is not significantly different.