

## ZASTOSOWANIE PROGRAMOWANYCH BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH DO WYZNACZANIA GRANICY ZMĘCZENIA

JÓZEF SZALA

AT-R Bydgoszcz

W pracy opisano możliwość zastosowania programowanych badań zmęczeniowych do przybliżonego wyznaczenia granicy zmęczenia. Proponowana metoda podobnie jak metoda Locati oparta jest na hipotezie sumowania uszkodzeń zmęczeniowych sformułowanej przez Palmgrena i Minera. Na podstawie licznych wyników badań zmęczeniowych dokonano analizy przydatności proponowanej metody oraz zakresu jej zastosowań.

### Wykaz ważniejszych oznaczeń

- $i$  — numer stopnia naprężeń w stopniowym programie,  
 $k$  — liczba stopni naprężeń spełniających warunek  $\sigma_{ai} \geq Z_G$ ,  
 $N_c = \lambda n_\lambda$  — ogólna liczba cykli obciążenia programowanego do zniszczenia zmęczeniowego próbki,  
 $n_i$  — liczba cykli zrealizowana do zniszczenia zmęczeniowego próbki na  $i$ -tym stopniu  $n_i = \lambda n_{\lambda i}$ ,  
 $n_\lambda$  — ogólna liczba cykli w okresie programu,  
 $n_{\lambda i}$  — liczba cykli o amplitudzie  $\sigma_{ai}$  w okresie programu,  
 $s$  — odchylenie standardowe odpowiadające granicy zmęczenia  $\bar{Z}_G$  w MPa,  
 $s_Z$  — odchylenie standardowe granicy zmęczenia w MPa,  
 $Z_G$  — granica zmęczenia w MPa (wielkość losowa),  
 $\bar{Z}_G$  — średnia wartość granicy zmęczenia dla programu o określonej wartości  $\sigma_{amax}$  w MPa,  
 $\bar{\bar{Z}}_G$  — średnia wartość granicy zmęczenia dla wszystkich wartości  $\sigma_{amax}$  w programie o określonej postaci w MPa,  
 $\zeta$  — współczynnik wypełnienia programu obciążeń (widma obciążeń),  
 $\lambda$  — liczba powtórzeń okresu programu do zniszczenia zmęczeniowego próbki,

$\sigma_{ai}$  — amplituda naprężeń  $i$ -tego stopnia w MPa,  
 $\sigma_{amax} = \sigma_{a1}$  — maksymalna wartość amplitudy naprężeń w programie odpowiadająca amplitudzie pierwszego stopnia.

## 1. Wprowadzenie

Dokładne wyznaczenie granicy zmęczenia według metody schodkowej (staircase method) i metody Probit, opisanych m.in. w pracach [1] i [2] wymaga przeprowadzenia długotrwałych badań zmęczeniowych na ponad 25 próbkach do bazowej liczby cykli  $N_G$  od  $5 \cdot 10^6$ – $5 \cdot 10^7$  cykli. Od dłuższego czasu poszukiwane są metody skróconego wyznaczania granicy zmęczenia. W literaturze opisano: metodę brzegową (boundary technique) [3] i [4] i pełnobazowych stopniowych przeciążeń [5]. Metody te umożliwiają wyznaczenie parametrów statystycznych granicy zmęczenia na podstawie mniejszej liczby próbek, jednakże z mniejszą dokładnością niż w przypadku metody schodkowej i Probit.

Niedogodnością w stosowaniu wymienionych metod poza czasochłonnością badań jest to, że wymagają one wstępnego oszacowania granicy zmęczenia z względnie dużą dokładnością, dla przyjęcia poziomów naprężeń, na których badania te się rozpoczyna. Gdy takie oszacowanie (np. na podstawie wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ , czy danych literaturowych dotyczących badań zmęczeniowych podobnych próbek lub węzłów konstrukcyjnych) jest niedokładne, liczba próbek potrzebnych do badań rośnie o tę liczbę, którą przeznaczają się na wstępne badania, których celem jest orientacyjne wyznaczenie granicy zmęczenia.

Wymienionych niedogodności nie posiadają t.zw. przyspieszone metody np. Locati i Protta [6]. Pierwsza z wymienionych objęta została normą ZSRR [7]. W metodach tych zastąpiono obciążenie zmienne sinusoidalnie o stałej amplitudzie, obciążeniem programowanym. Skrócenie czasu badań otrzymuje się przez zmniejszenie liczby badanych próbek (wszystkie próbki ulegają zniszczeniu zmęczeniowemu) oraz realizacją mniejszej liczby cykli do zniszczenia próbki niż przyjęta graniczna (bazowa) liczba cykli np. w metodzie schodkowej, czy brzegowej.

Metodami przyspieszonych badań, granicę zmęczenia wyznacza się pośrednio, co jest poważną wadą. Do obliczeń stosuje się ogólnie znaną liniową hipotezę sumowania uszkodzeń zmęczeniowych Palmgrena-Minera. W wielu pracach m.in. [8] i [9] wykazano, że zależnie od warunków obciążeń otrzymuje się różną zgodność tej hipotezy z wynikami badań. Istnieją jednakże takie zakresy obciążeń programowanych, w których zgodność liniowej hipotezy jest zadowalająca [10]. Podstawowym czynnikiem wpływającym na niezgodność hipotezy z wynikami badań jest przyjęcie do obliczeń sumy uszkodzeń niedokładnego opisu wykresu zmęczeniowego jako linii łamanej. Wykazano już w pracy [11] co potwierdzono także w pracy [9], że szczególnie w zakresie naprężeń bliskich granicy zmęczenia, wykres zmęczeniowy odbiega od przyjmowanej powszechnie linii łamanej.

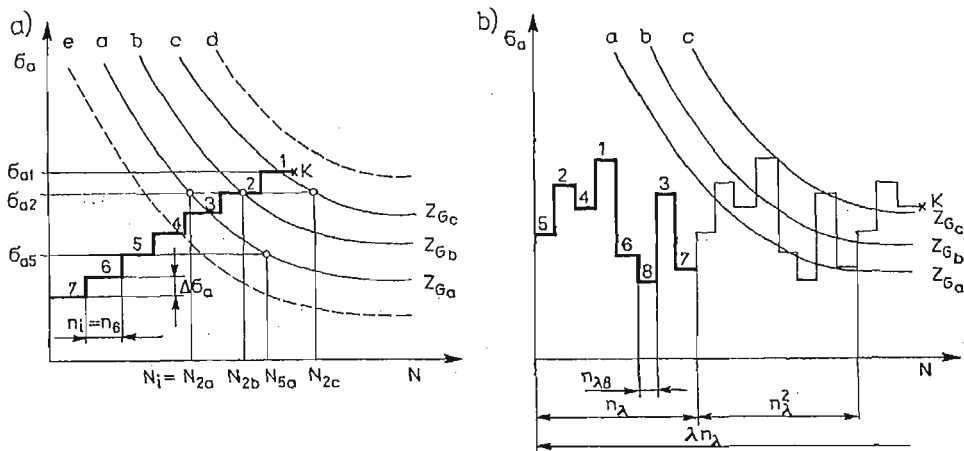
Celem pracy jest analiza możliwości zastosowania programowanych badań zmęczeniowych do wyznaczania granicy zmęczenia, porównanie proponowanej metody z metodą schodkową i metodą Locati oraz określenie warunków badań wpływających na dokładność wyznaczenia granicy zmęczenia według proponowanej metody i metody Locati.

## 2. Sformułowanie problemu

W metodzie wyznaczania granicy zmęczenia opartej na wynikach programowanych badań, podobnie jak w metodzie Locati, zakłada się słuszność liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych:

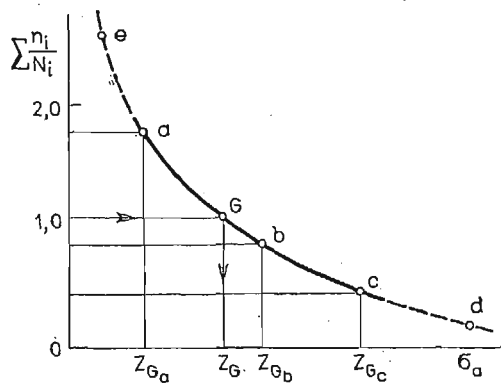
$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1,0 \quad (1)$$

przy czym sumowaniu podlegają liczby cykli  $n_i$  na stopniach naprężeń  $\sigma_{ai} \geq Z_G$ .



Rys. 1. Schemat programów obciążeń do wyznaczania granicy zmęczenia metodą: a) Locati, b) programowanych badań

Sposób postępowania może być objaśniony na przykładzie metody Locati — rys. 1a. Zastosowano tu program obciążeń stopniowo rosnących do momentu zniszczenia próbki lub elementu konstrukcyjnego w punkcie K, na poziomie naprężeń  $\sigma_{a1}$ , po zrealizowaniu 7 stopni obciążenia. Ponieważ nie jest znany rzeczywisty wykres zmęczeniowy, przyj-



Rys. 2. Schemat do interpolacyjnego wyznaczania granicy zmęczenia

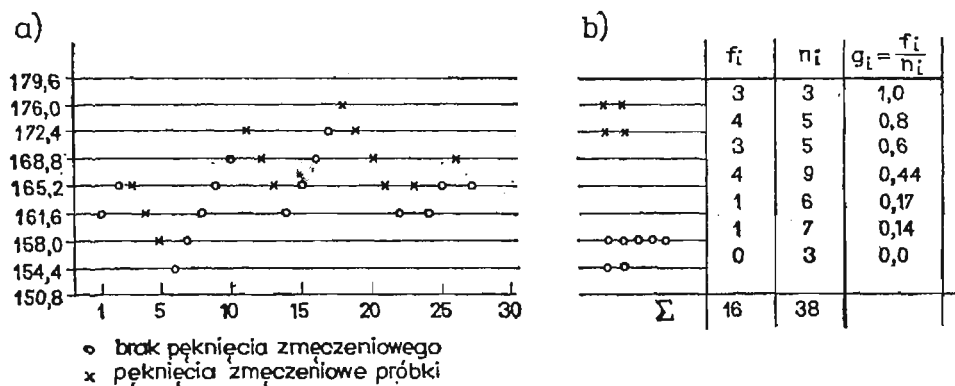
musimy na podstawie literatury lub innych źródeł orientacyjne wykresy  $a$ ,  $b$  i  $c$ , według których obliczane będą cząstkowe uszkodzenia według wzoru (1). Na podstawie otrzymanych z wzoru (1) wyników sumowania, dla poszczególnych wykresów zmęczeniowych sporządza się pomocniczy wykres do interpolacyjnego wyznaczania granicy zmęczenia — rys. 2. Granicy zmęczenia na tym wykresie odpowiada punkt  $G$ , dla którego suma uszkodzeń zgodnie z założeniem równa jest 1,0.

W ten sam sposób postępuje się dla dowolnego programu obciążeń o liczbie cykli w okresie  $n_k$ , powtarzanego do zniszczenia zmęczeniowego  $\lambda$  razy — rys. 1b. W obu przypadkach dla poszczególnych wykresów zmęczeniowych uwzględnia się tylko poziomy naprężenia  $\sigma_{aj} > Z_{Gj}$  (gdzie  $j = a, b, c$ ), czyli dla wykresu  $a$  poziomy od 1—6, dla wykresu  $b$  poziomy od 1—4, dla wykresu  $c$  poziomy od 1—3.

### 3. Wyniki badań zmęczeniowych i ich opracowanie

Dla oceny przydatności wymienionych w punktach 1 i 2 metod przyspieszonego wyznaczania granicy zmęczenia przeprowadzono badania na próbkach z karbem ( $\alpha_k = 1,65$ ) wykonanych ze stali 45 w stanie normalizowanym w warunkach obrotowego zginania. Opis próbki i pozostałe własności mechaniczne podano w pracy [9].

3.1. Wyznaczenie granicy zmęczenia metodami schodkową i Probit. Podstawą analizy był rozkład granicy zmęczenia wyznaczony metodą schodkową na 27 próbkach według opisu zawartego w pracy [2]. Schemat eksperymentu i wyniki badań pokazano na rys. 3a.



Rys. 3. Schemat badań zmęczeniowych metodą schodkową i Probit

Z obliczeń zamieszczonych w pracy [2], a dotyczących omawianych w tej pracy próbek otrzymano:

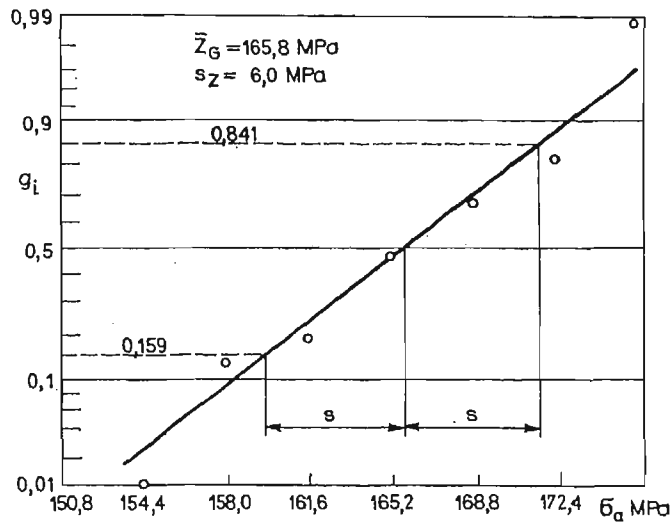
— średnią wartość granicy zmęczenia

$$\bar{Z}_G = 165,5 \text{ MPa,}$$

— odchylenie standardowe

$$s = 10,33 \text{ MPa.}$$

Wartości te określają rozkład normalny granicy zmęczenia. Nanosząc częstotliwość występowania zniszczenia próbek na poszczególnych poziomach na siatkę rozkładu



Rys. 4. Wykreślne wyznaczenie rozkładu granicy zmęczenia metodą Probit

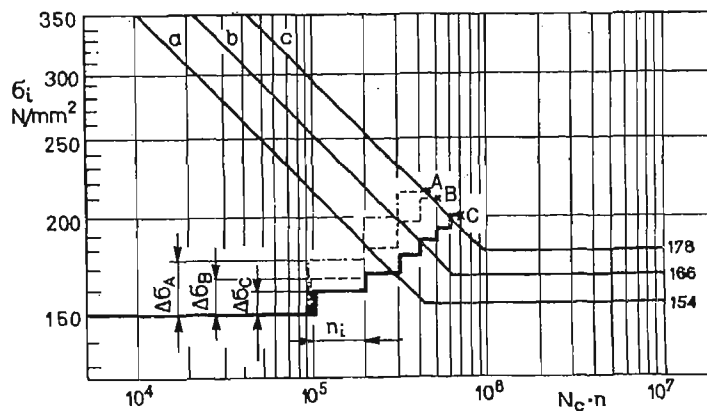
normalnego rys. 4 wyznaczamy średnią wartość granicy zmęczenia i jej odchylenie standardowe metodą Probit. Z danych na rys. 4 odczytujemy:

$$\bar{Z}_G = 165,8 \text{ MPa},$$

oraz:

$$s_z = 6,0 \text{ MPa}.$$

Do wyznaczania tych danych wykorzystano wyniki badań metodą schodkową (rys. 3a) uzupełnione dodatkowymi próbami na dolnych poziomach naprężeń (154,4 i 158,0 MPa)



Rys. 5. Schemat badań zmęczeniowych metodą Locati próbek z normalizowanej stali 45 dla trzech różnych programów obciążeń

celem upewnienia się o niepękaniu próbek oraz na górnych poziomach (172,4 i 176,0 MPa) celem potwierdzenia spostrzeżenia o pękaniu próbek (rys. 3b). Dane do wyznaczenia wykresu (rys. 4) wzięto z tabliczki zamieszczonej na rys. 3b.

3.2. **Badania metodą Locati.** Schemat badań zmęczeniowych metodą Locati przedstawiono na rys. 5, na którym oznaczono literami *a*, *b* i *c* przybliżone wykresy zmęczeniowe obejmujące rozproszone wyniki badań w zakresie ograniczonej trwałości. Literami *A*, *B* i *C* oznaczono programy obciążeń różniące się przyrostem naprężeń  $\Delta\sigma$  na kolejnych stopniach, który wynosi dla programu *A* — 25 MPa, dla programu *B* — 15 MPa i programu *C* — 8 MPa. Liczba cykli na poszczególnych stopniach  $n_i = 10^5$  dla wszystkich programów.

Wyniki obliczeń sum uszkodzeń zmęczeniowych  $\Sigma n_i/N_i$  według wzoru (1) podano w tablicy 1 i na wykresie pomocniczym do interpolacyjnego wyznaczania granicy zme-

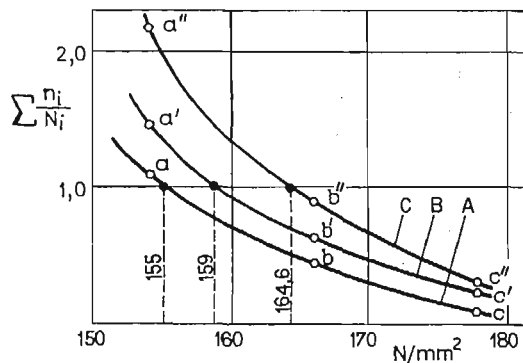
Tablica 1. Sumy uszkodzeń  $\Sigma \frac{n_i}{N_i}$  dla poszczególnych programów obciążeń

Program obciążeń	Obliczenia według krzywej		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	2	3	4
A	1,1	0,44	0,1
B	1,4	0,6	0,2
C	2,08	0,9	0,32

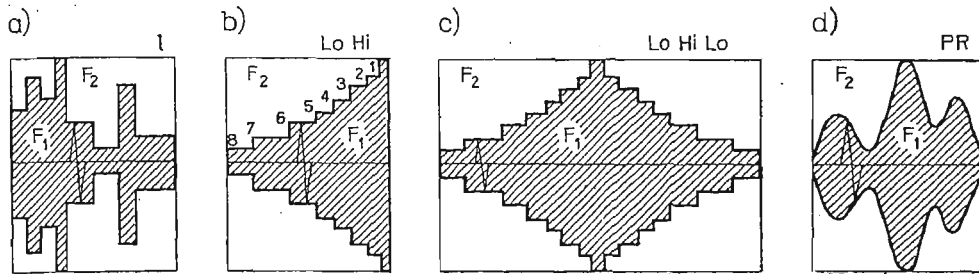
czenia (rys. 6). Krzywe *A*, *B* i *C* pokazane na tym rysunku powstały z połączenia punktów: *a*-wyznaczonego na podstawie sumowania uszkodzeń według wykresu zmęczeniowego *a* z rys. 5, *b* — podobnie, z obliczeń według wykresu zmęczeniowego *b* i *c* — wyznaczonego według wykresu zmęczeniowego *c*.

Dla programu *A* punkty te są bez oznaczeń, dla programu *B* — ze znakiem prim ('), dla programu *C* — ze znakiem bis ("). Dla  $\Sigma n_i/N_i = 1$  otrzymuje się następujące wartości granicy zmęczenia  $Z_{GA} = 155$  MPa,  $Z_{GB} = 159$  MPa,  $Z_{GC} = 164,6$  MPa.

3.3. **Programowane badania zmęczeniowe.** W programowanych badaniach zastosowano programy obciążeń z nieregularnym następstwem stopni I, stopniowo rosnących naprężeń



Rys. 6. Wykres do interpolacyjnego wyznaczania granicy zmęczenia próbek ze stali 45



Rys. 7. Schematy programów obciążeń zastosowanych w badaniach zmęczeniowych

*Lo-Hi*, stopniowo rosnących a następnie malejących naprężeń *Lo-Hi-Lo* oraz z pseudolosową zmianą amplitud *PR*, pokazane na rys. 7. Dane liczbowe w układzie wartości względnych zamieszczono w tablicy 2. Badania programowane przeprowadzono na kilku

Tablica 2. Dane liczbowe programów obciążeń

Nr poziomu <i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_{a1}/\sigma_{amax}$	1,00	0,875	0,750	0,625	0,50	0,375	0,250	0,125
$\alpha_i = \frac{n_{\lambda i}}{n_{\lambda}}$ dla $\zeta$	0,34	0,006	0,012	0,038	0,081	0,138	0,205	0,305
	0,56	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
	0,77	0,170	0,305	0,205	0,138	0,081	0,038	0,012

poziomach  $\sigma_{amax}$ , oraz dla trzech wartości współczynnika wypełnienia widma  $\zeta = 0,34$ ,  $0,56$  i  $0,77$ . Do obliczeń sum uszkodzeń przyjęto te same orientacyjne wykresy zmęczeniowe, jak w punkcie 3.2 w badaniach metodą Locati. Dane liczbowe do wyznaczania granicy zmęczenia, dla programu z nieregularnym następstwem stopni I i współczynnika wypełnienia widma  $\zeta = 0,34$  podano w tablicy 3. Podobny zestaw danych dla widm o  $\zeta = 0,56$  i  $\zeta = 0,77$  zamieszczono w tablicy 4, tu także realizowano program obciążeń I. W kolumnach 2 tych tablic podano maksymalne amplitudy naprężeń w programach  $\sigma_{amax} = \sigma_{a1}$ . Wartości naprężeń dla pozostałych poziomów  $\sigma_{ai}$  obliczamy posługując się danymi z wiersza 2 tablicy 2. Podobnie znając całkowitą liczbę cykli do zniszczenia  $N_c$  podaną w kolumnach 3 tablic 3 i 4 obliczyć można dla poszczególnych wartości  $\zeta$  wartości  $n_i = \alpha_i N_c$  biorąc dane  $\alpha_i$  odpowiednio dla  $\zeta$  z wierszy 3, 4 i 5 tablicy 2. Wartości  $N_i$  do obliczenia sum uszkodzeń można odczytać (lub obliczyć z równań) z wykresów zmęczeniowych pokazanych na rys. 5, przy czym  $\Sigma_{(a)}$  jest sumą obliczoną według wykresu *a*,  $\Sigma_{(b)}$  — według wykresu *b* oraz podobnie  $\Sigma_{(c)}$  jest sumą obliczoną według wykresu *c*. Wartości tych sum zestawiono w kolumnach 4, 5 i 6 tablic 3 i 4.

Z wykresów pomocniczych do interpolacyjnego wyznaczania granicy zmęczenia (tu nie pokazanych ze względu na ich dużą liczbę) wyznaczono wartości granicy zmęczenia  $Z_{G_i}$

zestawione w kolumnach 7 tablic 3 i 4. Dane zawarte w tych tablicach uzupełnione o wartości średnie i odchylenia standardowe granicy zmęczenia wyznaczone dla poszczególnych poziomów naprężeń  $\sigma_{amax}$  (kol. 8).

Tablica 3. Dane liczbowe do wyznaczenia granicy zmęczenia próbek z karbem ( $\alpha_k = 1,65$ ) wykonanych z normalizowanej stali 45, obciążenie programowane I o współczynniku wypełnienia  $\zeta = 0,34$

Nr próbki	$\sigma_{amax}$ [MPa]	$\frac{N_c}{10^4}$	$\Sigma_{(a)}$	$\Sigma_{(b)}$	$\Sigma_{(c)}$	$Z_G$ [MPa]	$\frac{\bar{Z}_G}{s_z}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	365	13	0,6	0,28	0,12	150,0	$\frac{155,13}{5,41}$
2		18	0,83	0,41	0,2	152,5	
3		24	1,09	0,54	0,27	155,5	
4		35	1,59	0,8	0,4	162,5	
5	325	67	1,82	0,74	0,34	163,0	$\frac{162,13}{2,37}$
6		63	1,72	0,7	0,31	162,0	
7		77	2,09	0,84	0,4	165,0	
8		48	1,30	0,53	0,26	158,5	
9	285	140	1,76	0,84	0,39	163,5	$\frac{158,24}{3,26}$
10		80	1,03	0,5	0,24	155,0	
11		100	1,25	0,6	0,27	158,0	
12		95	1,19	0,57	0,25	157,5	
13		120	1,50	0,73	0,35	161,5	
14		77	0,95	0,45	0,22	153,5	
15		96	1,20	0,57	0,27	157,3	
16		110	1,37	0,66	0,31	159,6	
17	245	150	0,96	0,31	0,15	153,8	$\frac{155,30}{2,88}$
18		130	0,83	0,28	0,11	152,0	
19		200	1,28	0,42	0,20	157,4	
20		220	1,39	0,46	0,22	158,0	
21	205	4000	0,08	0,02	0,01	—	—
22		9500	0,19	0,04	0,02	—	
23		17000	0,33	0,09	0,04	—	
24		3500	0,07	0,02	0,01	—	

Celem poszerzenia analizy o wpływ postaci programu obciążeń na wyznaczaną granicę zmęczenia przeprowadzono obliczenia dla programów obciążeń o sekwencji *Lo-Hi* (stopniowo rosnących naprężeń) odpowiadającej obciążeniu według metody Locati, sekwencji *Lo-Hi-Lo* (stopniowo rosnącej następnie malejącej) oraz pseudolosowej zmiany amplitud naprężeń *PR*. Badania te przeprowadzono dla programów o  $\zeta = 0,34$ . Zestawienie danych  $Z_{Gi}$ , obliczonych według tych samych zasad co te, które zestawiono w tablicach 3 i 4, podano w tablicy 5.



Tablica 4. Dane liczbowe do wyznaczenia granicy zmęczenia próbek z karbem ( $\alpha_k = 1,65$ ) wykonanych z normalizowanej stali 45, obciążenie programowane I o współczynniku wypełnienia  $\zeta = 0,56$  i  $\zeta = 0,77$

Nr próbki	$\sigma_{amax}$ [MPa]	$\xi$	$\frac{N_c}{10^4}$	$\Sigma_{(a)}$	$\Sigma_{(b)}$	$\Sigma_{(c)}$	$Z_G$ [MPa]	$\frac{\bar{Z}_a}{s_z}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	352	0,56	5,1	1,29	0,65	0,31	158,4	$\frac{159,33}{1,60}$
2			5,0	1,27	0,64	0,31	158,0	
3			5,6	1,42	0,71	0,35	160,3	
4			5,8	1,50	0,75	0,37	161,4	
5	312		8,9	1,26	0,60	0,29	158,0	$\frac{159,43}{2,45}$
6			11,2	1,60	0,77	0,35	162,5	
7			8,2	1,18	0,58	0,28	157,0	
8			9,8	1,40	0,70	0,35	160,2	
9	272		20,5	1,54	0,77	0,38	162,0	$\frac{158,83}{2,80}$
10			18,6	1,40	0,70	0,35	160,3	
11			15,0	1,13	0,55	0,24	156,0	
12			15,7	1,18	0,56	0,27	157,0	
13	232		33,0	1,14	0,55	0,27	156,0	$\frac{163,08}{4,76}$
14			55,0	1,90	0,93	0,45	165,0	
15			60,0	2,08	1,02	0,50	166,3	
16			55,0	1,90	0,93	0,45	165,0	
17	192		180,0	2,29	1,09	0,33	167,4	$\frac{165,3}{3,76}$
18			110,0	1,39	0,65	0,20	159,7	
19			170,0	2,17	1,03	0,31	166,5	
20			183,0	2,33	1,11	0,34	167,6	
1	324	0,77	5,25	1,48	0,72	0,34	160,7	$\frac{164,3}{2,66}$
2			6,25	1,78	0,86	0,41	164,0	
3			7,5	2,14	1,03	0,49	166,8	
4			7,0	1,99	0,96	0,46	165,7	
5	295		15,3	2,76	1,33	0,63	171,0	$\frac{164,7}{5,20}$
6			7,0	1,29	0,62	0,29	158,4	
7			9,9	1,78	0,86	0,41	164,0	
8			11,3	2,03	0,98	0,47	165,8	
9	263		16,4	1,81	0,81	0,39	163,6	$\frac{162,78}{4,54}$
10			21,0	2,29	1,02	0,50	166,5	
11			18,4	2,03	0,91	0,44	164,8	
12			10,2	1,13	0,51	0,24	156,2	
13	230		27,0	1,59	0,74	0,30	164,8	$\frac{159,60}{4,75}$
14			25,0	1,47	0,69	0,28	160,5	
15			24,0	1,40	0,65	0,26	159,8	
16			16,0	0,93	0,44	0,18	153,3	
17	196		95,0	2,26	1,11	0,26	167,7	$\frac{164,13}{6,84}$
18			55,0	1,32	0,64	0,15	158,4	
19			140,0	3,28	1,63	0,38	172,0	
20			55,0	1,32	0,64	0,15	158,4	

Tablica 5. Zestawienie wyników programowanych badań granicy zniechęcia z zastosowaniem programów Lo-Hi i Lo-Hi-Lo,  $\zeta = 0,34$

Nr próbki	$\sigma_{max}$ [MPa]	Lo-Hi, $\zeta = 0,34$			Lo-Hi-Lo, $\zeta = 0,34$			PR, $\zeta = 0,34$		
		$\frac{N_c}{10^4}$	$Z_G$ [MPa]	$\frac{\bar{Z}_G}{s_{ZG}}$	$\frac{N_c}{10^4}$	$Z_G$ [MPa]	$\frac{\bar{Z}_G}{s_{ZG}}$	$N_c$	$Z_G$ [MPa]	$\frac{\bar{Z}_G}{s_{ZG}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	365	49	171,0	$\frac{161,93}{7,97}$	20	163,0	$\frac{161,38}{14,42}$	17	152,0	$\frac{154,1}{1,73}$
2		39	165,2		11	148,5		20	153,4	
3		30	159,0		61	181,0		25	156,3	
4		20	152,5		20	153,0		22	154,7	
5	325	56	160,0	$\frac{160,13}{2,04}$	57	160,5	$\frac{163,08}{2,85}$	36	156,5	$\frac{156,38}{2,25}$
6		65	162,5		71	164,0		48	159,0	
7		57	160,5		83	166,3		22	153,5	
8		46	157,5		62	161,5		36	156,5	
9	285	76	153,2	$\frac{155,81}{3,34}$	110	159,6	$\frac{158,14}{3,62}$	87	156,5	$\frac{154,53}{4,86}$
10		85	155,3		79	154,0		84	155,4	
11		76	153,2		88	156,0		127	162,3	
12		105	158,8		116	160,7		48	148,0	
13		86	155,5		77	153,5		55	149,0	
14		70	151,8		124	162,0		60	150,5	
15		94	156,7		96	157,3		80	154,5	
16		124	162,0		135	163,0		109	160,4	
17	245	260	165,0	$\frac{157,5}{5,80}$	250	159,0	$\frac{157,23}{2,37}$	160	154,0	$\frac{157,0}{6,83}$
18		180	156,0		150	153,8		320	166,0	
19		210	158,0		230	158,6		106	150,0	
20		120	151,0		210	157,5		220	158,0	

Łącznie wszystkie wyniki dla  $\zeta = 0,34$ :  $\bar{Z}_G = 157,73$  MPa

#### 4. Analiza wyników badań

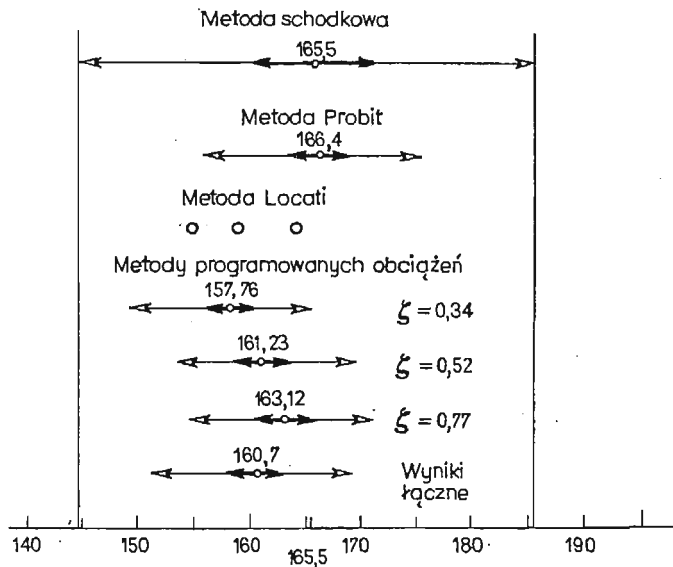
Szeroki zakres wyników badań programowanych umożliwia dokonanie analizy wpływu różnorodnych czynników związanych z obciążeniem na dokładność oceny parametrów rozkładu granicy zmęczenia a przede wszystkim wpływu:

- poziomu naprężeń maksymalnych w programie  $\sigma_{amax} = \sigma_{a1}$ ,
- współczynnika wypełnienia widma (programu)  $\zeta$ ,
- postaci programu (sekwencji obciążeń).

Przed analizą wpływu wymienionych czynników należy dokonać oceny metod schodkowej i Probit stanowiących podstawę porównań wyników badań granicy zmęczenia.

4.1. Uwagi o wynikach badań metodą schodkową i Probit. Badania zmęczeniowe według wymienionych metod prowadzi się na kilku wybranych poziomach wokół prawdopodobnej granicy zmęczenia. Na poziomach tych część próbek (lub elementów konstrukcyjnych) ulega zniszczeniu, część nie ulega zniszczeniu. Wymaga to przeprowadzenia większej liczby prób (ponad 20), ponieważ pęknięcie lub nie pęknięcie próbki na wybranym poziomie wskazuje na to, w którym kierunku (niższych lub wyższych naprężeń) leży granica zmęczenia, natomiast nie wskazuje jej wartości. Metody Locati i proponowana, oparta na programowanych badaniach, daje pojedynczy wynik z każdej indywidualnej próby, a zatem może być ograniczona ich liczba.

Porównanie parametrów rozkładu granicy zmęczenia według wzorów Dixona-Mooda w metodzie schodkowej i według metody Probit wskazuje, że wartości średnie granicy zmęczenia są praktycznie jednakowe (165,5 i 165,8 MPa), natomiast odchylenia standardowe różnią się istotnie (10,3 i 6,0 MPa). W wielu badaniach prowadzonych przez autora na elementach konstrukcyjnych zróżnicowanych pod względem kształtu, wymiarów i materiału potwierdzono wymienione spostrzeżenie. Z porównywanych metod dokład-



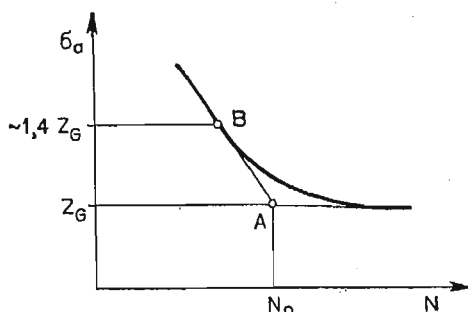
Rys. 8. Graficzne przedstawienie przedziałów ufności dla granicy zmęczenia wyznaczonej różnymi metodami

niejszą w ocenie odchylenia standardowego jest metoda Probit (w przypadku prawidłowo przeprowadzonego doświadczenia). Można z łatwością zauważyć, że wyznaczone według metody schodkowej podwójne odchylenie standardowe jest większe od rozpiętości (rozrzutu) wyników badań.

Szerokości przedziałów ufności (na poziomie 0,95) dla wartości średniej (grube strzałki) i pojedynczych wyników (cienkie strzałki) dla granicy zmęczenia wyznaczonej metodą schodkową i Probit oznaczono na rys. 8. Przedziały te stanowią tło wyników badań programowanych i badań metodą Locati.

#### 4.2. Analiza wyników programowanych badań.

a. Wpływ poziomu naprężeń maksymalnych w programie. Programowane badania zmęczeniowe przeprowadzono na kilku poziomach naprężeń maksymalnych w programie w zakresie od 205—365 MPa co w odniesieniu do granicy zmęczenia daje zakres (1,2—2,2)  $Z_G$ . Na poszczególnych poziomach badano 4 lub 8 próbek. Średnie wartości granicy zmęczenia na poszczególnych poziomach  $\sigma_{amax}$  w różnym stopniu odbiegają od wyznaczonej metodą schodkową i Probit. Mniejsze różnice otrzymano dla wyższych poziomów naprężeń  $\sigma_{amax}$ . W przypadku programu I i  $\zeta = 0,34$  badania na poziomie  $\sigma_{amax} = 205$  MPa nie dały rezultatów (nieprawdopodobnie niska wartość granicy zmęczenia), stąd w pozostałych programach dla  $\zeta = 0,34$  nie obliczano granicy zmęczenia, ponieważ badania te zostały przeprowadzone z podobnymi rezultatami. Na tak niskich poziomach  $\sigma_{amax}$  w obliczaniu sum uszkodzeń uwzględnia się nieliczne najwyższe poziomy naprężeń (1 do 3) dlatego obliczenia granicy zmęczenia są niedokładne. Główną jednakże przyczyną wspomnianej niedokładności jest to, że wykresy zmęczeniowe, jak już wspomniano w p. 1 w obszarze granicy zmęczenia nie są linią łamaną. Wykres w zakresie ograniczonej do zakresu nieograniczonej trwałości przechodzi łagodnym łukiem (rys. 9) z punktu B o rzęd-



Rys. 9. Schematyczny przebieg wykresu zmęczeniowego w obszarze granicy zmęczenia

nej około 1,4  $Z_G$  [9] i [11]. W analizie niezgodności hipotezy Palmgren-Minera z wynikami badań [10] wykazano, że uwzględnienie tego przejścia łukiem istotnie wpływa na zmniejszenie wspomnianej niezgodności.

Różnice pomiędzy granicą zmęczenia wyznaczoną metodami schodkową i Probit, a wyznaczoną w programowanych badaniach przy wysokich naprężeniach  $\sigma_{amax}$  (np.  $\sigma_{amax} = 365$  MPa,  $\zeta = 0,34$  tab. 3) wynikają z małej liczby powtórzeń programu do znisz-

czenia zmęczeniowego próbki. Mała liczba powtórzeń programu  $\lambda$  prowadzi do niedokładnej oceny trwałości  $N_c$  stanowiącej podstawę wyznaczania granicy zmęczenia  $Z_G$  (w przytoczonym przykładzie — duży rozrzut przy małej liczbie wyników).

**b. Wpływ stopnia wypełnienia programu  $\zeta$ .** Porównując dane zawarte w tablicach 3 i 4, stwierdzić można, że dokładności w wyznaczaniu granicy zmęczenia sprzyjają wyniki badań programowanych z rosnącą wartością współczynnika wypełniania  $\zeta$ . Najbliższe wynikom otrzymanym według metod schodkowej i Probit są wyniki programowanych badań z zastosowaniem programów obciążeń o współczynniku  $\zeta = 0,77$ , niezależnie od poziomu naprężeń maksymalnych w programie  $\sigma_{amax}$ . Jest to zgodne z wnioskami zawartymi w pracy [10], w której wykazano, że dla wysokich wartości współczynnika  $\zeta$  zachodzi wyższa zgodność hipotezy Palmgrena-Minera z wynikami badań. Podkreślić należy, że program obciążeń w metodzie Locati posiada współczynnik wypełnienia  $\zeta > 0,5$  (zbliżony do 0,56).

**c. Wpływ postaci programu.** Programowane badania zmęczeniowe prowadzi się z zastosowaniem programów o różnej sekwencji poziomów naprężenia. Omówione do tej pory zagadnienia dotyczyły badań z zastosowaniem programu o nieregularnym następstwie stopni. Celem umożliwienia przeprowadzenia analizy wpływu postaci programu (sekwencji obciążenia i liczby cykli na poszczególnych poziomach) wyznaczono granice zmęczenia dla programów o sekwencji: stopniowo rosnących naprężeń ( $Lo-Hi$ ) najbardziej zbliżonej do programu obciążeń metody Locati, stopniowo rosnących następnie malejących naprężeń ( $Lo-Hi-Lo$ ) oraz pseudolosowego następstwa amplitud ( $PR$ ), w którym liczba cykli na  $i$ -tym poziomie dążyła do 1,0. Wszystkie programy posiadały  $\zeta = 0,34$ . Z danych zawartych w tablicy 5 wynika, że wpływ postaci programu na wartość średnią granicy zmęczenia oraz odchylenie standardowe (za wyjątkiem poziomu  $\sigma_{amax} = 365$  MPa) jest mały. Z porównania tego wyniku, że nie ma potrzeby ograniczania liczby cykli w okresie programu poniżej ogólnych zaleceń dla programowanych badań zmęczeniowych [9].

**4.3. Analiza statystyczna wyników badań.** Analiza statystyczna obejmowała wyznaczenie wartości średniej, i odchylenia standardowego i przedziałów ufności dla granicy zmęczenia wyznaczonej w określonych warunkach programowanych badań oraz badania istotności różnic tych parametrów w stosunku do wartości odniesienia otrzymanych według metod schodkowej i Probit. Na rys. 8, na tle przedziałów ufności dla wyników otrzymanych metodą schodkową i Probit naniesiono wyniki badań według metody Locati i wyniki programowanych badań zmęczeniowych (program I) dla poszczególnych wartości współczynnika  $\zeta$  oraz wszystkich wyników programowanych badań według programu I łącznie. Wartości średnie i odchylenia standardowe granicy zmęczenia dla poszczególnych programów zestawiono w tablicy 6.

Z danych zawartych w tablicy 6 i na rys. 8 wynika, że wszystkie wyniki badań (według metod: Probit, Locati i programowanych obciążeń) mieszczą się w przedziale ufności wyznaczonym metodą schodkową.

Analiza statystyczna wyników badań dotyczyła oceny:

- typu rozkładu,
- istotności różnic średnich wartości granicy zmęczenia,
- istotności różnic wariancji.

Tablica 6. Zestawienie danych statystycznych

Lp.	Opis programu (sekwencja, $\zeta$ )	Liczba próbek $n$	$\bar{Z}_G$ [MPa]	$s$ [MPa]	Przedział ufności dla	
					średniej	pojedynczych wyników
1	2	3	4	5	6	7
1	I, 0,34	20	158,0	4,2	(156; 160)	(149; 167)
2	I, 0,56	20	161,2	3,8	(159,3; 163,1)	(152,5 170)
3	I, 0,77	20	163,1	4,7	(161,2; 165,1)	(154,4; 171,9)
4	Lo-Hi, 0,34	20	158,2	5,1	(155,84; 160,64)	(147,52; 168,96)
5	Lo-Hi-Lo, 0,34	20	159,6	6,8	(156,43; 162,85)	(145,37; 173,91)
6	PR, 0,34	20	155,3	4,4	(153,22; 157,38)	(146,05; 164,55)

Z analizy tej wynika, że we wszystkich przypadkach (dane  $Z_{G1}$  zawarte w tablicach 3, 4 i 5) nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o rozkładzie normalnym granicy zmęczenia. W analizie zastosowano test zgodności  $\chi^2$ .

W analizie statystycznej dotyczącej średnich wartości stawiano hipotezę zerową o równości średnich  $\bar{Z}_G$  z programowanych badań ze średnią otrzymaną według metody schodkowej i metody Probit. W pierwszym przypadku uzyskano negatywny wynik testu dla zbiorów danych ( $\zeta = 0,34$ , I — dane z tab. 3,  $\zeta = 0,34$ , Lo-Hi — dane z tab. 5, kol. 4, oraz dla  $\zeta = 0,34$ , PR — dane z tab. 5, kol. 10). Z porównania do wyników otrzymanych w metodzie Probit, tylko w przypadku programu:  $\zeta = 0,77$ , I — dane z tablicy 4, kol. 7.

Podobne porównanie wariancji wyznaczonych zbiorów danych wykazało, że negatywny wynik otrzymano we wszystkich przypadkach programowanych badań w porównaniu z metodą schodkową, natomiast w porównaniu z metodą Probit jedynie w przypadku programu  $\zeta = 0,56$ , I — dane z kol. 7, tablicy 4.

Negatywny wynik testów statystycznych w odniesieniu do średniej świadczy, że wyznaczona w programowanych badaniach zmęczeniowych wartość granicy zmęczenia jest mniejsza od wyznaczonej metodą schodkową i Probit. Natomiast w przypadku wariancji — wskazuje na istotnie większą wartość odchylenia standardowego wyznaczonego metodą schodkową.

4.4. Przybliżona ocena skrócenia czasu badań. Przy założeniu tej samej częstotliwości  $f$  obciążeń czas na wyznaczenie granicy zmęczenia metodą programowanych badań wynosi:

$$T_p = \frac{1}{f} \sum_j^{n_p} N_c.$$

Dla programu I,  $\zeta = 0,77$ ,  $\sigma_{max} = 324$  MPa i  $n_p = 4$  próbki (dane z tablicy 4) otrzymuje się:

$$T = \frac{1}{f} 26 \cdot 10^4 \text{ s.}$$

Natomiast rozkład granicy zmęczenia wyznaczony metodą schodkową według schematu na rys. 3 wynosi dla  $n_s = 27$  próbek około

$$T_s \cong n_s N_G \frac{1}{f} = \frac{1}{f} 27 \cdot 5 \cdot 10^6.$$

Czas na badania metodą schodkową jest kilkaset razy większy

$$\frac{T_s}{T_p} \cong \frac{27 \cdot 5 \cdot 10^6}{26 \cdot 10^4} \cong 5 \cdot 10^2.$$

Podany przykład jest oczywiście orientacyjną oceną skrócenia czasu badań, który zależy od liczby badanych próbek, zarówno  $n_p$ , jak i  $n_s$ , wartości  $\sigma_{amax}$  i  $\zeta$  w programie. Z danych zawartych w tablicach 3 i 4 wynika jednakże, że szczególnie wartość odchylenia standardowego dla wszystkich serii badań szybko się ustala (np. porównując przypadki  $n_p = 4$  i  $n_p = 8$  dla programów I) natomiast w metodach schodkowej i Probit liczba tych prób dla podobnej oceny wynosi ponad 25.

Oceniając czas próby metodą Locati dla tej samej liczby próbek (dla danych z rys. 5) otrzymujemy, że jest on około

$$\frac{T_p^L}{T_p} \cong \frac{4 \cdot 8 \cdot 10^5}{26 \cdot 10^4} \cong 12$$

razy dłuższy od czasu programowych badań przyjętych w programie.

## 5. Wnioski

- a. Analiza wyników badań wykazała możliwość zastosowania programowanych badań zmęczeniowych do wyznaczania granicy zmęczenia próbek i elementów konstrukcyjnych przy spełnieniu określonych warunków.
- b. Dokładność oceny granicy zmęczenia (odniesiona do dokładnych metod: schodkowej i Probit) rośnie w miarę wzrostu wartości współczynnika wypełnienia widma oraz dla programów obciążeń, w których  $\sigma_{amax} \geq 1,4 Z_G$ .
- c. Stwierdzone w badaniach istotne różnice w wartościach granicy zmęczenia dotyczą jej wartości średniej, nie stwierdzono natomiast istotnych różnic w wartościach odchylenia standardowego.
- d. Dokładność oceny granicy zmęczenia wyznaczonej metodą programowanych badań jest porównywalna z oceną według metody Locati.
- e. W wyniku przeprowadzonej analizy nie stwierdzono istotnego wpływu postaci programu (sekwencji obciążeń i liczby cykli na poszczególnych poziomach naprężeń) na wartość granicy zmęczenia.
- f. Istotną zaletą proponowanej metody jest skrócenie czasu badań w wyniku realizacji mniejszej liczby cykli dla osiągnięcia wyniku niż graniczna liczba  $N_G$  oraz badanie mniejszej liczby próbek niezbędnych do wyznaczania parametrów rozkładu granicy zmęczenia.

## 6. Podsumowanie

Możliwość oceny rozkładu granicy zmęczenia na podstawie programowanych badań zmęczeniowych istotnie poszerza zakres ich zastosowań. Umożliwia wykorzystanie maszyn do badań zmęczeniowych z programowanym obciążeniem. W przypadku programowanych badań realizowanych dla oceny eksploatacyjnej trwałości zmęczeniowej, możliwość jednoczesnej oceny granicy zmęczenia sprzyja dokonaniu zmian konstrukcyjnych w zakresie wymiarów, doboru materiału i technologii wykonania elementów konstrukcyjnych. Wyznaczone rozkłady granicy zmęczenia umożliwiają stosowanie probabilistycznych metod obliczeń zmęczeniowych, a niższy (w stosunku do metod dokładnych) koszt tych badań ma istotne znaczenie w nowych konstrukcjach przy konieczności weryfikacji większej liczby wersji.

Z przeprowadzonej analizy wynikają proste zalecenia dla realizacji omawianych badań. Jeśli inne względy nie ograniczają swobody doboru programu należy stosować programy o dużych wartościach współczynnika wypełnienia widma  $\zeta \geq 0,5$  oraz o istotnie większych od przewidywanej granicy zmęczenia wartości maksymalnych naprężeń w programie  $\sigma_{amax} \geq 1,4 Z_G$ . Dobór przybliżonych wykresów zmęczeniowych do obliczeń sum uszkodzeń wpływa w niniejszym stopniu na dokładność oceny granicy zmęczenia. Położenie tych wykresów można korygować w trakcie obliczeń tak aby punkt  $G$  na rys. 2 leżał pomiędzy skrajnymi punktami  $a$  i  $c$ , lub w ich pobliżu. Uwagę tę łatwo wykazać analizując wpływ położenia wykresów na rys. 1a (np. linie  $d$  i  $e$ ) na przebieg wykresu do interpolacyjnego wyznaczania granicy zmęczenia (położenie punktów  $d$  i  $e$ ) na rys. 2. Przyjmując wykresy  $b$ ,  $c$  i  $d$  na rys. 1a punkt  $G$  leży poza punktami  $b$ ,  $c$  i  $d$  na rys. 2, co obniża dokładność wyznaczenia granicy zmęczenia  $Z_G$ .

Ogólnie należy stwierdzić, że proponowana metoda wyznaczania rozkładu granicy zmęczenia nie zastępuje metod: schodkowej i Probit, a stanowi ich uzupełnienie podobnie jak znana metoda Locati.

## Literatura

1. W. MAENNIG, *Vergleichende Untersuchung über die Eignung der Treppenstufen Methode zur Berechnung der Dauerschwingfestigkeit*, Materialprüfung, 1, 1971, ss. 6 - 11.
2. S. KOCANĀDA, J. SZALA, *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa, 1985.
3. W. MAENNIG, *Statistical Planning and Evaluation of Fatigue tests. A survey of Recent Results*, International Journal of Fracture, 1, 1975.
4. W. MAENNIG, *Das Abgrenzungsverfahren, eine Kostensparende Methode zur Ermittlung von Schwingfestigkeitswerten-Theorie Praxis und Erfahrungen*, Materialprüfung, 8, 1977, ss. 280 - 289.
5. И. В. Кудрявцев, *Два замечания по методике испытаниям металлов на усталость*, Заводская Лаборатория, 9, 1978.
6. J. HAJDUK, *Przyspieszone metody wyznaczania parametrów wytrzymałości zmęczeniowej*, Przegląd Mechaniczny, 17, 1970.
7. Государственный Стандарт Союза СССР, Надежность изделий машиностроения, Ускоренная оценка пределов выносливости методом ступенчатого нагружения, ГОСТ 19533 - 74
8. R. LEHMAN, *Über die Gültigkeit der Hypothese der Linearen Schadensakkumulation*, Maschinenbau-technik 5, 1970.
9. J. SZALA, *Ocena trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i progra-*



- mowanych*. Akademia Techniczno-Rolnicza, Zeszyty Naukowe nr 79, Mechanika 22, Bydgoszcz, 1980.
10. J. SZALA, *Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych — wybrane zagadnienia*, Prace Wydziału Nauk Technicznych Bydgoskiego Towarzystwa Naukowego, Zeszyt Naukowy Nr 15, Warszawa—Poznań, PWN, 1985.
11. W. WEIBULL, *Fatigue Testing and Analysis of Results*, Pergamon Press, 1961.

## Резюме

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММИРОВАННЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРЕДЕЛА УСТАЛОСТИ

В статье представлено возможность применения программированных усталостных исследований к приближенному определению предела усталости.

Предлагаемый метод, как метод Локати, базируется на гипотезе линейного суммирования усталостных повреждений (Пальмгрена — Майнера).

На примере многих результатов усталостных исследований произведено анализ области его применения.

## Summary

APPLICATION OF THE PROGRAMMED FATIGUE INVESTIGATION TO THE FATIGUE LIMIT  
EVALUATION

A possibility of application of the programmed fatigue investigation to an approximate fatigue limit evaluation is presented in this paper. The proposed method, as the Locati method, is based on the fatigue damage cumulation hypothesis which was formulated by Palmgren and Miner. The analysis of the usefulness of the proposed method and the range of its application based on many fatigue investigation results has been made.

*Praca wpłynęła do Redakcji dnia 4 czerwca 1987 roku.*