

OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH Z TWORZYW SZTUCZNYCH(*)

JÓZEF SZALA i TOMASZ TOPOLIŃSKI (BYDGOSZCZ)

W artykule opisano możliwości obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych wykonanych z tworzyw sztucznych, poddanych działaniu obciążeń stochastycznych. Wskazano, że znane z literatury metody oparte na hipotezach sumowania uszkodzeń, równaniach Żurkowa i Bailey'a oraz oparte na teorii rozwoju pęknięć zmęczeniowych, nie dają zadowalających rezultatów. Na tle tej analizy i analizy wyników badań własnych opracowano metodę obliczeń opartą na statystycznych zależnościach pomiędzy trwałością wyznaczoną przy obciążeniu sinusoidalnym a trwałością wyznaczoną w warunkach obciążeń stochastycznych. Obliczenia według proponowanej metody zweryfikowano doświadczalnie na próbkach wykonanych z Itamidu 35 (poloamid 6 zbrojony krótkim włóknem szklanym) otrzymując zadowalającą zgodność wyników obliczeń z wynikami badań.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a_j, b_j parametry wykresów trwałości zmęczeniowej,
 a_{0j}, b_{0j} parametry wykresu zmęczeniowego Wöhlera, indeksy: $j = c$ dla zakresu cieplnego, $j = m$ dla zakresu mechanicznego,
 i numer stopnia amplitud naprężeń w widmie lub programie obciążeń,
 k liczba stopni amplitud naprężeń w widmie lub programie obciążeń,
 n_i liczba cykli o amplitudzie σ_{ai} w widmie lub programie obciążeń,
 n_c sumaryczna liczba cykli w widmie lub programie obciążeń,
 N trwałość zmęczeniowa przy obciążeniu stałoaamplitudowym sinusoidalnym,
 N_c trwałość zmęczeniowa przy obciążeniu stochastycznym lub programowym; indeksy dodatkowe: R — stochastycznym, P — programowanym,
 $p(\sigma_a)$ funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu amplitud,
 ζ współczynnik wypełnienia widma obciążenia,
 σ_a amplituda cyklu naprężeń sinusoidalnie zmiennych [w MPa],
 σ_{ai} amplituda cyklu naprężeń i -tego stopnia w widmie lub programie obciążeń,
 σ_{amax} maksymalna wartość amplitudy cyklu naprężeń w widmie obciążenia stochastycznego lub programowanego [w MPa],
 $\sigma_a = f(N)$ wykres zmęczeniowy,
 $\sigma_{amax} = f(N_c)$ wykres trwałości zmęczeniowej.

(*) Temat opracowany na podstawie wyników badań realizowanych w ramach CPBP 02.01 pt. „Podstawy mechaniki materiałów, maszyn, konstrukcji i procesów technologicznych” koordynowanego przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk.

1. WPROWADZENIE

Na trwałość zmęczeniową elementów konstrukcyjnych dominujący wpływ ma obciążenie zmienne, które w ogólnym przypadku ma charakter losowy. Trwałość tę ocenia się na podstawie wyników badań głównie programowanych oraz obliczeń. Dla elementów konstrukcyjnych wykonanych z metali i ich stopów istnieje szereg skutecznych metod badań i obliczeń [1, 2, 3, 4], które nie mogą być bezpośrednio zastosowane do wyznaczania trwałości zmęczeniowej elementów wykonanych z tworzyw sztucznych. Coraz powszechniejsze zastosowania tworzyw, szczególnie różnego rodzaju kompozytów, o istotnie odmiennych (w stosunku do metali) własnościach zmęczeniowych, wymaga poszukiwań metod oceny trwałości.

Opublikowane nieliczne metody obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów wykonanych z tworzyw sztucznych oparte są na zastosowaniu następujących teorii:

1) hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych w tym Palmgren–Minera [5], Broutmana–Sahu'a [6] i Owena–Howe'a [7]; 2) hipotez fizycznych opartych głównie na modyfikacji równania Żurkova i Bailey'a [8]; 3) teorii rozwoju pęknięć zmęczeniowych [9].

Dokładność obliczeń z zastosowaniem hipotez sumowania uszkodzeń zmęczeniowych zależy w znacznym stopniu od rodzaju tworzywa i warunków obciążeń; żadna z wymienionych hipotez w tym względzie nie jest uniwersalną. Z wstępnych badań własnych i obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów z Itamidu 35 wynika, że zależnie od poziomu naprężeń, stosunek trwałości obliczeniowej do wyznaczonej doświadczalnie wahał się w granicach następujących: 1) dla hipotezy Palmgren–Minera od 0,04 do 0,56; 2) dla hipotezy Broutmana–Sahu'a od 0,06 do 0,89 oraz 3) dla hipotezy Owena–Howe'a od 0,66 do 10,1 (ale z utratą sensu fizycznego dla $\sigma_{amax} > 90$ MPa).

Z przedstawionych danych wynika, że dla tych samych warunków badań obserwuje się duży rozrzut wyników obliczeń według poszczególnych hipotez, a zatem ocena trwałości zmęczeniowej tymi metodami jest niepewna.

Metody oparte na zastosowaniu hipotez fizycznych wymagają wyznaczenia szeregu stałych materiałowych i, jak wynika z analizy danych literaturowych, zadowalające wyniki uzyskać można w ściśle określonych warunkach badań. Niepełne dane z literatury o wymienionych stałych materiałowych dla różnych tworzyw istotnie ograniczają możliwość zastosowania tych metod.

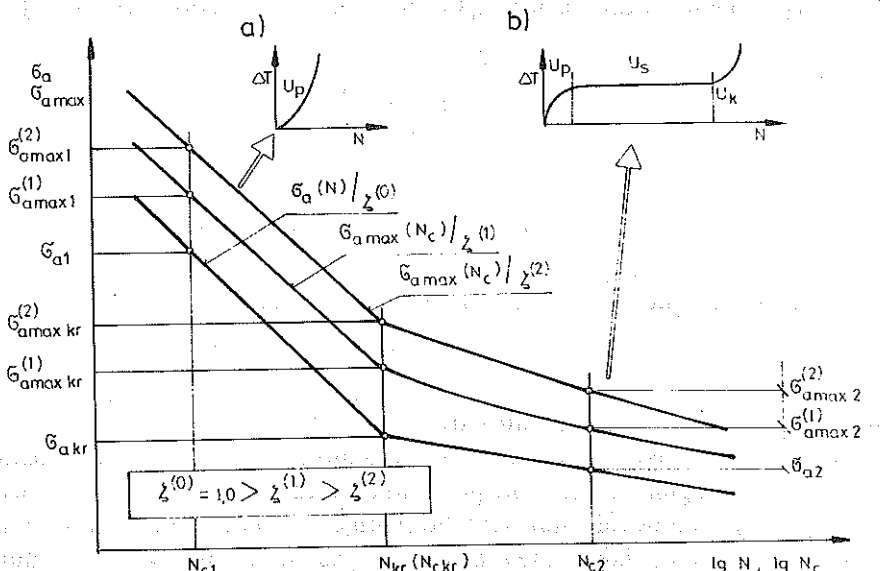
Metody obliczeń oparte na zastosowaniu teorii rozwoju pęknięć zmęczeniowych z założenia mogą być stosowane do wyznaczania trwałości zmęczeniowej elementów z pęknięciami i jedynie w etapie rozwoju tych pęknięć. Nieuwzględnienie trwałości do inicjacji tego pęknięcia istotnie ogranicza praktyczne zastosowanie tych metod, a w przypadku gdy udział trwałości do inicjacji pęknięcia dominuje — wyklucza ich stosowanie.

Z przeprowadzonej analizy danych literaturowych np. [6 i 7] i zgodności rezultatów obliczeń i badań zmęczeniowych elementów z tworzyw sztucznych — wynika potrzeba dalszych poszukiwań metod obliczeń. Jedną z możliwości jest opracowanie metody opartej na statystycznych związkach pomiędzy trwałością zmęczeniową wyznaczoną przy obciążeniu sinusoidalnym a trwałością wyznaczoną w warunkach obciążeń stochastycznych lub programowanych im równoważnych. Tego rodzaju statystyczne zależności zostały wyznaczone dla elementów wykonanych ze stopów metali (stale i duralu) [1 i 3].

Celem artykułu jest zatem opracowanie i doświadczalna weryfikacja metody obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych wykonanych z tworzyw sztucznych.

2. SFORMUŁOWANIE ZAGADNIENIA

Podobnie jak w przypadku metali i ich stopów, podstawowe własności zmęczeniowe tworzyw sztucznych opisane są zależnościami, których obrazem graficznym jest najczęściej wykres zmęczeniowy $\sigma_a(N)$ (rys. 1). Zależności te stanowią podstawowe dane do obliczeń. Z analizy literatury (m. in. [13 i 14]) i badań własnych opisanych w pracach [10 i 11] wynika, że rezultaty badań



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie przebiegów wykresów: zmęczeniowego — $\sigma_a(N)$, trwałości zmęczeniowej — $\sigma_{amax}(N_c)$ dla dwóch różnych wartości współczynnika wypełnienia widma (1) i (2) oraz przyrostu temperatury samowzbudnej dla zakresu niszczenia cieplnego — a i mechanicznego — b (na schematach oznaczone udział przyrostu początkowego — U_p , stabilnego — U_s i końcowego — U_k)

zmęczeniowych przy obciążeniu sinusoidalnym mogą być aproksymowane w semilogarytmicznym układzie współrzędnych $(\sigma_a, \lg N)$ linią łamaną. Punkt załamania (krytyczny) o współrzędnych σ_{akr} i N_{kr} dzieli wykres na przedział niszczenia cieplnego ($N < N_{kr}$) i przedział niszczenia mechanicznego ($N \geq N_{kr}$). Przedziałom tym odpowiadają różne przebiegi procesu zmęczenia. Różnice te dotyczą temperatury samowzbudnej: dla niszczenia cieplnego występuje progresywny jej wzrost a dla niszczenia mechanicznego pojawia się pewien przedział proporcjonalnych do liczby cykli, małych przyrostów temperatury (przebiegi te schematycznie pokazano w górnej części rysunku). Warunki obciążenia zmęczeniowego określone są w tym przypadku wartością amplitudy σ_a i częstością f .

W obliczeniach trwałości zmęczeniowej zakładamy, że obciążenie stochastyczne składa się z cykli sinusoidalnych o zmiennej amplitudzie σ_{ai} (w przypadkach szerokopasmowych procesów stochastycznych — o zmiennej amplitudzie σ_{ai} i wartości średniej σ_{mi}). Amplitudy te wydzielane są według znanych metod schematyzacji, które opisano m. in. w pracy [12]. Amplitudy wyznaczone według odpowiedniej metody schematyzacji są zmiennymi losowymi o określonym rozkładzie $P(\sigma_a)$. Rozkład ten lub w opracowaniu statystycznym odpowiadającą mu stopniową dystrybuantę nazywa się widmem obciążeń [12]. Widmo to opisuje się maksymalną wartością amplitudy σ_{amax} i współczynnikiem wypełnienia widma $0 < \zeta \leq 1,0$ obliczanym ze wzoru (2.1) [4, 12]:

$$(2.1) \quad \zeta = \int_{\sigma_{amin}}^{\sigma_{amax}} \frac{1}{A} \sigma_a p(\sigma_a) d\sigma_a$$

gdzie

$$(2.2) \quad A = \int_{\sigma_{amin}}^{\sigma_{amax}} p(\sigma_a) d\sigma_a \quad \text{oraz} \quad p(\sigma_a) = P'(\sigma_a).$$

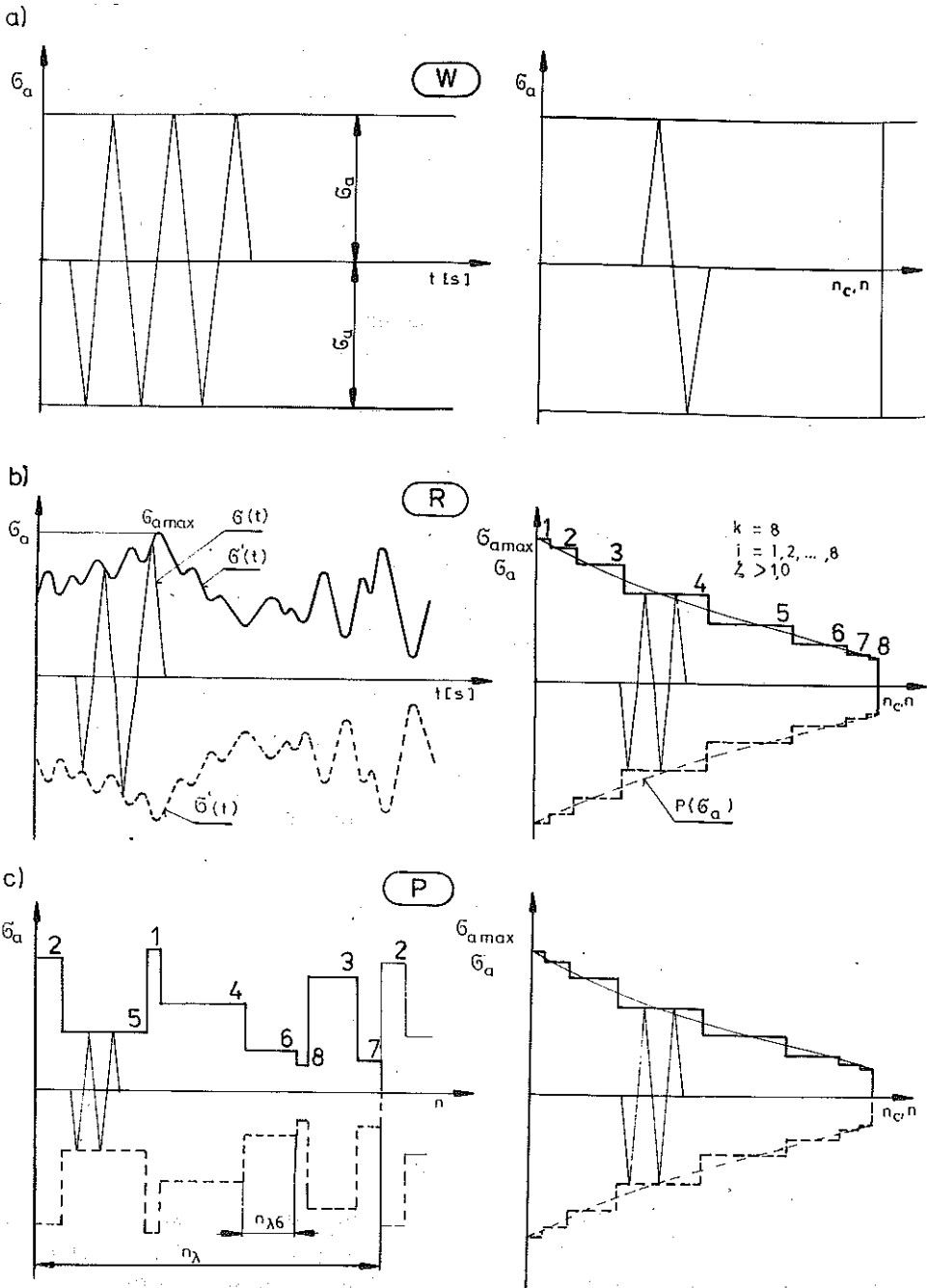
Dla widm stopniowych wzór (2.1) przyjmuje postać

$$(2.3) \quad \zeta = \sum_{i=1}^k \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} \frac{n_i}{n_c}$$

Opis obciążenia i oznaczenia zilustrowano na rys. 2.

Element konstrukcyjny poddany obciążeniom stochastycznym o parametrach σ_{amax} i ζ ulegnie zniszczeniu po zrealizowaniu N_c cykli. Zmieniając wartość σ_{amax} przy zachowaniu stałości ζ otrzymuje się zbiór wyników, które aproksymuje się podobnie jak w przypadku obciążeń sinusoidalnych linią łamaną, nazywaną wykresem trwałości zmęczeniowej $\sigma_{amax}(N_c)$ (rys. 1). Położenie wykresu trwałości $\sigma_{amax}(N_c)$ w stosunku do wykresu zmęczeniowego $\sigma_a(N)$ zależy od wartości współczynnika wypełnienia widma ζ .

Na podstawie powyższego opisu i danych zawartych w pracach [10 i 11] można sformułować następujące założenia do obliczeń trwałości:



Rys. 2. Obciążenie zmienne: a) sinusoidalne o stałej amplitudzie naprężenia, b) stochastyczne, c) programowane

a) przebieg procesu zmęczenia dla obciążeń sinusoidalnych i stochastycznych jest jakościowo podobny, o czym świadczą wykresy zmęczeniowe $\sigma_a(N)$ i wykresy trwałości zmęczeniowej $\sigma_{a\max}(N_c)$ oraz wykresy temperatury samowzbudnej;

b) obciążenie sinusoidalne jest szczególnym przypadkiem obciążenia stochastycznego o współczynniku wypełnienia widma $\zeta = 1,0$, a wykres zmęczeniowy $\sigma_a(N)$ — szczególnym przypadkiem wykresu trwałości zmęczeniowej $\sigma_{a\max}(N_c)$;

c) wartość trwałości krytycznej nie zależy od wartości współczynnika wypełnienia widma, tzn. $N_{ckr} = N_{ckr}(\zeta)$;

d) położenie wykresu zmęczeniowego $\sigma_a(N)$ względem wykresu $\sigma_{a\max}(N_c)$ zależy od wartości współczynnika wypełnienia widma ζ .

Z przyjętych założeń i oznaczeń na rys. 1 wynika, że

$$(2.4) \quad \frac{\sigma_{a\max 1}^{(1)}}{\sigma_{a1}} = \frac{\sigma_{a\max kr}^{(1)}}{\sigma_{akr}} = \frac{\sigma_{a\max 2}^{(1)}}{\sigma_{a2}} = C^{(1)}$$

oraz

$$(2.5) \quad \frac{\sigma_{a\max 1}^{(2)}}{\sigma_{a1}} = \frac{\sigma_{a\max kr}^{(2)}}{\sigma_{akr}} = \frac{\sigma_{a\max 2}^{(2)}}{\sigma_{a2}} = C^{(2)},$$

gdzie $C^{(1)}$ jest stałą dla $\zeta^{(1)}$ i $C^{(2)}$ stałą dla $\zeta^{(2)}$; ogólnie $C = f(\zeta)$.

Ze wzorów (2.4) i (2.5) wynika, że dla dowolnych wartości ζ i $N = N_c$ zachodzi zależność

$$(2.6) \quad \sigma_{a\max} = \frac{\sigma_{a\max kr}}{\sigma_{akr}} \sigma_a = f(\zeta) \sigma_a.$$

Wykres zmęczeniowy $\sigma_a(N)$ w układzie semilogarytmicznym można przedstawić następującym równaniem:

$$(2.7) \quad \sigma_a = a_{0j} \lg N + b_{0j}$$

podobnie wykres trwałości zmęczeniowej — równaniem

$$(2.7') \quad \sigma_{a\max} = a_j \lg N_c + b_j$$

Podstawiając prawą stronę wzoru (2.7) do wzoru (2.6) i uwzględniając warunek $N = N_c$ otrzymuje się po przekształceniach

$$(2.8) \quad \lg N_c = \frac{\sigma_{a\max}}{a_{0j} f(\zeta)} - \frac{b_{0j}}{a_{0j}}$$

Ze wzoru (2.8) można obliczyć trwałość elementu konstrukcyjnego poddanego działaniu obciążeń stochastycznych, znając wartości maksymalnej amplitudy w widmie $\sigma_{a\max}$ i współczynnika wypełnienia widma ζ oraz własności zmęczeniowe wyznaczone wykresem zmęczeniowym o parametrach a_{0j} i b_{0j} . Ze

wzoru (2.8) wynika ponadto, że w obliczeniach znać należy zakres niszczenia, w którym przeprowadza się obliczenia.

W przypadku gdy

$$(2.9) \quad \sigma_{a\max} \leq f(\xi)\sigma_{akr}$$

obliczenia przeprowadza się w zakresie niszczenia mechanicznego (we wzorze (2.8) podstawia się a_{0m} , b_{0m}), w przeciwnym razie — w zakresie niszczenia cieplnego (parametry a_{0c} i b_{0c}).

3. DANE EKSPERYMENTALNE

Do uzasadnienia przyjętych założeń i wyznaczenia danych liczbowych do obliczeń wykorzystane zostały wyniki badań zmęczeniowych przeprowadzonych na próbkach wspornikowych wykonanych metodą wtrysku z Itamidu 35 (poliamid 6 zbrojny krótkim włóknem szklanym w ilości 35% wagowo) o średnicy roboczej $\varnothing 12$ opisane w pracach [10 i 11].

W badaniach (10 próbek) przy obciążeniu statycznym wyznaczono (w pierwszej dobie po wtrysku): 1) doraźną wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 133$ MPa, $s_m = 11,4$ MPa (1 mm/min — prędkość rozciągania), 2) doraźną wytrzymałość na zginanie $R_g = 140$ MPa, $s_g = 5,4$ MPa.

Na podstawie wyników badań 40 próbek przy obciążeniu sinusoidalnym $f = 26$ Hz wyznaczono wykres zmęczeniowy $\sigma_a(N)$ opisany równaniem o postaci (2.7), natomiast na podstawie wyników badań 160 próbek w warunkach obciążeń stochastycznych (R) i programowanych (P) wyznaczono wykresy trwałości zmęczeniowej $\sigma_{a\max}(N_c)$, którym odpowiadają równania o postaci (2.7'). Warunki badań i parametry wykresów uzupełnione wartościami współrzędnych punktów załamania (krytycznych) σ_{kr} , N_{kr} lub $\sigma_{a\max kr}$, N_{ckr} zestawiono w tablicy 1.

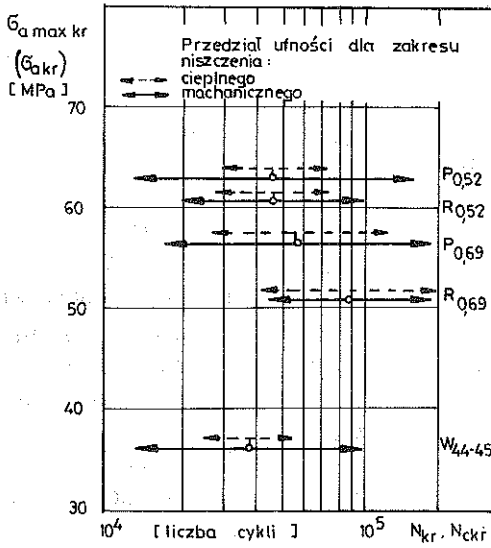
Założenia a) i b) wynikają z analizy wykresów zmęczeniowych i trwałości z jednej strony i odpowiadającym im przebiegom temperatury samowzbudnej z drugiej strony. Szczegółową analizę tych zagadnień przedstawiono w pracach [10 i 11].

Z analizy danych zawartych w kolumnie 9 tablicy 1 wynika, że wartości trwałości krytycznej N_{ckr} są zbliżone do wartości N_{kr} wyznaczonych w badaniach przy obciążeniu sinusoidalnym. Wartości średnie trwałości krytycznych wraz z przedziałami ufności (na poziomie ufności 0,95) przedstawiono na rys. 3. Liniami ciągłymi oznaczono przedziały niszczenia mechanicznego, natomiast liniami przerywanymi — niszczenia cieplnego. Przedziały te mają różną rozpiętość, co wynika m. in. z ograniczonej i różnej liczby danych z badań, na podstawie których wyznaczono proste regresji w zakresie niszczenia cieplnego i mechanicznego. Pokrywanie się tych przedziałów świadczy o nieistotnym

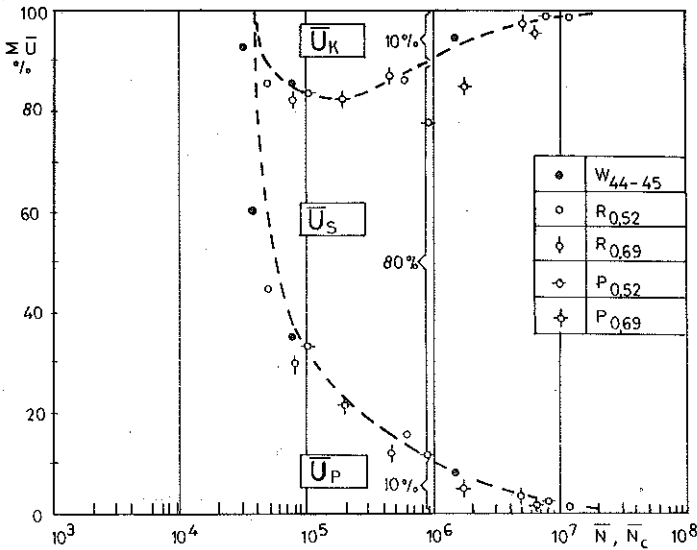
Tablica 1. Dane liczbowe do opisu wykresów: zmęczenia i trwałości zmęczenia

Lp.	Wykres	Obciążenie		Zakres	Parametr			
		ξ	R, W, P		a_{0j} lub a_j [MPa]	b_{0j} lub b_j [MPa]	σ_{akr} lub σ_{amaxkr} [MPa]	Przedział ufnosci (0,95) dla N_{kr} lub N_{ckr}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	zmęczenia $\sigma_a(N)$	1,0	W	c m	-17,156 -3,771	113,8 54,63	37,96	$\langle 2,5 \cdot 10^4, 5,3 \cdot 10^4 \rangle$ $\langle 1,03 \cdot 10^4, 9,6 \cdot 10^4 \rangle$
2		0,52	R	c m	-28,852 -7,573	193,92 95,598	60,61	$\langle 2,9 \cdot 10^4, 7,2 \cdot 10^4 \rangle$ $\langle 2,0 \cdot 10^4, 9,8 \cdot 10^4 \rangle$
3	trwałości zmęczenia $\sigma_{amax}(N_c)$	0,52	P	c m	-37,792 -8,915	238,02 104,21	62,90	$\langle 3,0 \cdot 10^4, 7,2 \cdot 10^4 \rangle$ $\langle 1,02 \cdot 10^4, 1,06 \cdot 10^5 \rangle$
4		0,69	R	c m	-18,538 -7,594	142,08 88,366	51,09	$\langle 4,1 \cdot 10^4, 2,0 \cdot 10^5 \rangle$ $\langle 4,3 \cdot 10^4, 1,08 \cdot 10^5 \rangle$
5		0,69	P	c m	-19,037 -8,759	146,63 98,082	56,79	$\langle 2,6 \cdot 10^4, 1,03 \cdot 10^5 \rangle$ $\langle 1,07 \cdot 10^4, 1,08 \cdot 10^5 \rangle$

Objaśnienia: obciążenia oznaczono: W — sinusoidalne, R — stochastyczne, P — programowane



Rys. 3. Wartości naprężeń krytycznych σ_{akr} i $\sigma_{a \max kr}$ oraz trwałości krytycznych N_{kr} i N_{ckr} wraz z przedziałami ufnosci (obciążenia: W — sinusoidalne, R — stochastyczne, P — programowane)

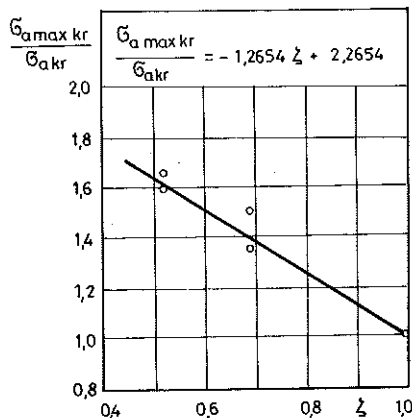


Rys. 4. Wykresy udziałów przyrostów temperatury samowzbudnej U_p — początkowego, U_s — stabilnego i U_k — końcowego w zależności od trwałości zmęczeniowej N lub N_c dla różnych obciążeń (W — sinusoidalne, R — stochastyczne dla $\zeta = 0,69$ i $0,52$ i P — programowane dla $\zeta = 0,69$ i $0,52$)

wplywie rodzaju obciążenia (sinusoidalne, stochastyczne, programowane) i wartości współczynnika wypełnienia widma ζ na wartość trwałości krytycznej N_{kr} lub N_{ckr} . Powyższe formalne stwierdzenie uzasadniające założenie c), potwierdza analiza udziałów przyrostów temperatury samowzbudnej przedstawiona na rys. 4. Na rys. 1b pokazano schematycznie wykres temperatury samowzbudnej dla niszczenia mechanicznego z wyróżnieniem udziału okresu początkowego przyrostu temperatury U_p , okresu stabilnego przyrostu U_s i końcowego przyrostu temperatury U_k . Suma udziałów $\Sigma U = U_p + U_s + U_k = 100\%$, np. dla trwałości $N = N_c = 10^6$ udziały oznaczone na rys. 4 są następujące: $U_p = 10\%$, $U_s = 80\%$ i $U_k = 10\%$. Trwałość krytyczna N_{kr} lub N_{ckr} odpowiada stanowi, w którym udział okresu stabilnego przyrostu temperatury U_s równy jest zeru [10]. Odpowiada to przejściu z wykresu o postaci pokazanej na rys. 1b na wykres o postaci pokazanej na rys. 1a.

Z rys. 4 wynika, że niezależnie od rodzaju obciążenia U_s dąży do zera dla trwałości $N_{kr} = N_{ckr} = 5 \cdot 10^4$ odpowiadającej średniej wyznaczonej z danych zawartych w kolumnie 9 tablicy 1 i z wykresu na rys. 3.

Z założenia d) wynika istnienie funkcji $f(\zeta)$ występującej we wzorze (2.6), którą opisuje stosunek wartości maksymalnej amplitudy obciążenia stochastycznego $\sigma_{a\max}$ zależnej od wartości współczynnika wypełnienia widma ζ do wartości amplitudy naprężenia sinusoidalnego σ_a , przy założeniu tej samej trwałości $N = N_c$. W szczególnym przypadku funkcję tę można wyznaczyć z wartości naprężeń krytycznych σ_{akr} i $\sigma_{a\max kr}$ podanych w kolumnie 8 tablicy 1. Wartości te naniesiono na wykres (rys. 5) — podkreślić należy, że każdy z pun-



Rys. 5. Wykres zależności $\sigma_{a\max kr} / \sigma_{akr}$ od współczynnika ζ

któw wykresu wyznaczony został na podstawie co najmniej 36 wyników zmęczenia. Na podstawie tych wyników metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono wzór

$$(3.1) \quad \sigma_{a\max kr} = 48,036(1 - \zeta) + \sigma_{akr}$$

a z niej szukaną funkcję

$$(3.2) \quad f(\zeta) = \frac{\sigma_{a \max kr}}{\sigma_{a kr}} = -1,2654 \zeta + 2,2654.$$

Dane liczbowe zawarte w tabelicy 1 dotyczące wykresu zmęczeniowego Wöhlera (Lp. 1) i funkcja (3.2) stanowią podstawę obliczeń trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń stochastycznych lub programowanych opisanych parametrami $\sigma_{a \max}$ i ζ .

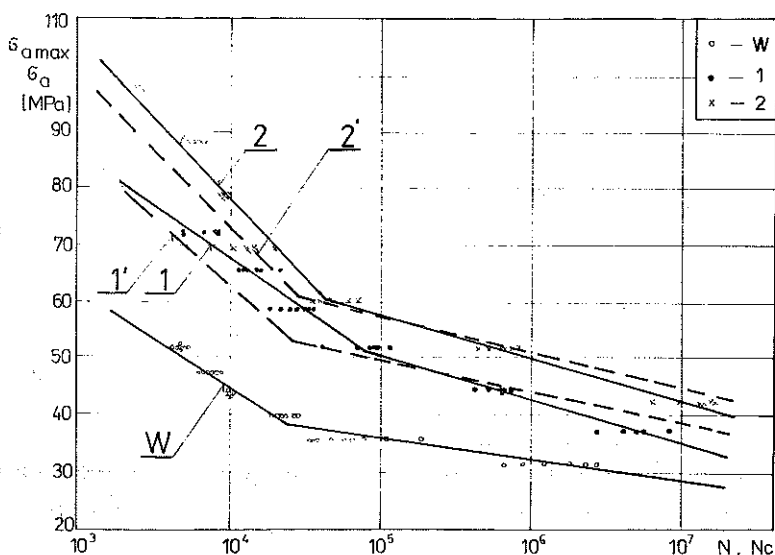
4. WYNIKI OBLICZEŃ

Wyniki obliczeń dla wybranych poziomów naprężeń $\sigma_{a \max}$ i współczynników $\zeta = 0,52$ i $0,69$ zestawiono w tabelicy 2. Wartości $\sigma_{a \max}$ tak dobrano, aby dwa poziomy dla każdej wartości wypadły w przedziale niszczenia cieplnego

Tablica 2. Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek z Itamidu 35 poddanych obciążeniom stochastycznym

Lp.	ζ	Zakres	$\sigma_{a \max}$ MPa	Trwałość $\times 10^4$ cykle		$\frac{N_{cT}}{N_c}$
				N_{cT}	N_c	
1	2	3	4	5	6	7
1	0,52	c	97,3	1,56	2,23	0,699
2			69,5	15,03	20,53	0,732
3		m	60,5	57,38	43,12	1,331
4			42,1	5217	1160	4,504
5	0,69	c	72,5	4,52	5,67	0,797
6			58,5	17,0	32,2	0,528
7		m	51,5	73,1	71,58	1,021
8			37,5	3019	499,4	6,046

i dwa w przedziale niszczenia mechanicznego. Dla oceny rozpiętości wyników jedną z każdej pary wartości $\sigma_{a \max}$ przyjęto w pobliżu wartości $\sigma_{a \max kr}$, drugą natomiast na krańcu przedziału. Wyniki obliczeń zamieszczono w kolumnie 5, w kolumnie 6 dla porównania zamieszczono wyniki z badań zmęczeniowych, natomiast w kolumnie 7 podano wartości stosunku trwałości obliczonej N_{cT} do trwałości doświadczalnej N_c . Z porównania wartości N_{cT} i N_c oraz z analizy stosunku tych wartości wynika, że zgodność obliczeń z wynikami badań jest wysoka dla wartości $\sigma_{a \max}$ w pobliżu punktu krytycznego i maleje wyraźnie w kierunku krańców przedziałów niszczenia cieplnego i mechanicznego.



Rys. 6. Wykresy obliczeniowej trwałości zmęczeniowej N_{cT} (oznaczone znakiem prim) na tle wykresów wyznaczonych doświadczalnie w warunkach obciążeń stochastycznych: 1 — dla $\zeta = 0,69$, 2 — dla $\zeta = 0,52$.

Na podstawie wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej dla pośrednich wartości $\sigma_{a \max}$ wyznaczono pełne wykresy trwałości zmęczeniowej (rys. 6), opisane równaniami:

a) dla $\zeta = 0,69$:

w przedziale niszczenia cieplnego

$$(4.1) \quad \sigma_{a \max} = -24,348 \lg N_c + 161,5,$$

w przedziale niszczenia mechanicznego

$$(4.2) \quad \sigma_{a \max} = -5,352 \lg N_c + 77,53,$$

b) dla $\zeta = 0,52$:

w przedziale niszczenia cieplnego

$$(4.3) \quad \sigma_{a \max} = -28,294 \lg N_c + 187,68,$$

w przedziale niszczenia mechanicznego

$$(4.4) \quad \sigma_{a \max} = -6,219 \lg N_c + 90,095.$$

Mając na uwadze znaczny rozrzut wyników badań zmęczeniowych, zgodność obliczeń z wynikami doświadczeń można uznać za zadowalającą. Zgodność ta, jak widać z rys. 6, jest wyższa dla przedziału niszczenia mechanicznego, w praktyce ważniejszego, ponieważ głównie w tym zakresie konstruuje się elementy maszyn z tworzyw sztucznych.

5. PODSUMOWANIE

Podstawą obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z tworzyw sztucznych według proponowanej metody jest podobnie jak w innych metodach znajomość: 1) krzywej zmęczeniowej (jej parametrów a_{0c} , b_{0c} , a_{0m} i b_{0m} , na podstawie których wyznacza się σ_{akt} , N_{kr}), 2) parametrów obciążenia stochastycznego (σ_{amax} i ζ), 3) statystycznej funkcji $f(\zeta)$, charakterystycznej dla tworzywa, z którego wykonany jest element konstrukcyjny.

Dane przytoczone w przedstawionym artykule mogą być bezpośrednio wykorzystane do obliczeń elementów konstrukcyjnych wykonanych z Itamidu 35, szeroko stosowanego do wytwarzania elementów maszyn metodą wtrysku. Metoda obliczeń posiada jednakże bardziej uniwersalny charakter i może być stosowana do innych tworzyw wykazujących podobne własności zmęczeniowe, charakteryzujących się podobnym przebiegiem zjawisk „reotermokinetycznych” (fazy niszczenia cieplnego i mechanicznego).

Dokładność obliczeń zależy głównie od dokładności wyznaczenia statystycznej funkcji $f(\zeta)$ dla danego materiału. Przy znajomości krzywej zmęczeniowej, co jest warunkiem koniecznym każdych obliczeń, wyznaczenie tej funkcji oprócz można na prostych programowanych badaniach zmęczeniowych. W tym celu przyjęć należy conajmniej jeden program obciążeń o dowolnej wartości współczynnika ζ istotnie różnej od 1,0 oraz dowolną wartość maksymalnej amplitudy σ_{amax} w programie (np. $\zeta \approx 0,5$, $\sigma_{amax} \approx 1,25\sigma_{akt}$) i wyznaczyć na kilku próbkach trwałość zmęczeniową N_c . Dla warunku $N_c = N$ z równania krzywej zmęczeniowej $\sigma_a(N)$ oblicza się wartość amplitudy σ_a i na podstawie tych danych dla przyjętej wartości ζ , wartość

$$(5.1) \quad f(\zeta_1) = \frac{\sigma_{amax1}}{a_{0j} \lg N_c + b_{0j}}$$

Wyznaczona wartość $f(\zeta_1)$ dla ζ_1 i fakt, że dla $\zeta_0 = 1,0$ wartość $f(\zeta_0) = 1,0$ umożliwia opis ogólnej funkcji $f(\zeta)$ w postaci (3.2).

Przyjęcie w omawianych badaniach większej liczby programów (np. 3 lub 4) o różnych współczynnikach ζ i prowadzenie badań na większej liczbie próbek sprzyja dokładności wyznaczenia statystycznej funkcji $f(\zeta)$. Podkreślić należy, że badania takie prowadzi się dla określonego tworzywa, a nie każdorazowo do obliczeń.

Porównanie wyników obliczeń trwałości zmęczeniowej próbek z Itamidu 35 według wymienionych w p. 1 metod z wynikami obliczeń według proponowanej metody zestawionymi w tablicy 2 wskazuje, że jedynie w przypadku hipotezy Owena-Howe'a otrzymano dla niektórych poziomów naprężeń wyniki równie bliskie eksperymentalnym. Podkreślić jednak należy, że stałe występujące w obliczeniach z zastosowaniem tej hipotezy zostały dla obliczanych próbek doświadczalnie wyznaczone, co istotnie wpłynęło na dokładność obliczeń, a w praktycznych zastosowaniach nie zawsze ma miejsce.

Opisana w artykule metoda obliczeń wymaga dalszej doświadczalnej weryfikacji. Badania te przyczynić się mogą do poszerzenia zbioru danych liczbowych o własnościach tworzyw sztucznych i ich zachowaniu w warunkach obciążeń stochastycznych i programowanych. Doskonalenie metod obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych poddanych działaniu obciążeń stochastycznych jest jednym z warunków zwiększenia zakresu praktycznych zastosowań tworzyw sztucznych.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. E. GASSNER, W. SCHÜTZ, *The significance of constant load amplitude tests for the fatigue evaluation of aircraft structures*, Pergamon Press, 1961.
2. J. SCHIJVE, *The analysis of random load-time histories with relation to fatigue tests and life calculations. Fatigue of aircraft structures*, Pergamon Press, 1963.
3. J. SZALA, *O pewnej metodzie obliczeń elementów konstrukcyjnych na zmęczenie w warunkach obciążeń stochastycznych*, Arch. Budowy Maszyn, **29**, 3—4, 1982.
4. С. В. Серенсен, В. П. Кобаев, Р. М. Шнейдерович, *Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность*, Машиностроение, Москва 1975.
5. S. AMIJIMA, T. TANIMOTO, T. MATSUOKA, A. OCHI, *Fatigue life estimation of FRP under superimposed sinusoidal wave and various random load patterns*, J. Soc. of Materials Sci. of Japan, **33**, 364, 1984.
6. L. J. BROUTMAN, S. SAHU, *A new theory to predict cumulative fatigue damage in fiberglass reinforced plastics*, Composite Materials: Testing and Design, ASTM STP 497, 1972.
7. M. J. OWEN, R. J. HOWE, *The accumulation of damage in a glass-reinforced plastic under tensile and fatigue loading*, J. of Phys., D5, 1972.
8. M. NOWAK, G. NOWICKA, J. ZAWADZKI, *Fenomenologiczna ocena porównawcza wpływu starzenia poliamidu na jego trwałość zmęczeniową*, Prace IMiMT Politech. Wrocławskiej, nr 25, 1974.
9. J. C. RADON, *Fatigue crack growth in polymers*, Intern. J. Fracture, **16**, 6, 1980.
10. J. SZALA, T. TOPOLIŃSKI, *Wpływ przebiegu obciążenia na trwałość zmęczeniową i temperaturę samowzbuć poliamidu wzmocnionego włóknem szklanym*, Arch. Budowy Maszyn, **34**, 2, 1987.
11. J. SZALA, T. TOPOLIŃSKI, *Effect of chosen factors connected with programmed loading on fatigue life of short glass fiber reinforced polyamide*, Arch. Budowy Maszyn, **34**, 3, 1987.
12. S. KOCANĀDA, J. SZALA, *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa 1985.
13. M. NOWAK, *Obliczanie i badanie na wytrzymałość zmęczeniową tworzyw sztucznych*, Arch. Budowy Maszyn, **30**, 3—4, 1983.
14. M. NOWAK, *Zgięcia i nieciągłości wykresów zmęczenia tworzyw sztucznych*, Arch. Budowy Maszyn, **29**, 2, 1982.

Summary

DETERMINATION OF FATIGUE LIFE OF STRUCTURAL ELEMENTS MADE OF PLASTICS

Methods of determination of fatigue life of plastic structural elements subject to stochastic loading are discussed. Known methods based on the hypothesis of damage pile-up, the Zhurkov and Bailey equations, and the fatigue crack growth theory do not lead to

satisfactory results. On the basis of this analysis and some original investigations, a new method is proposed taking into account the statistical relations between the durability determined under sinusoidal loading and under random loading conditions. The method was verified experimentally by testing Itamide 35 specimens (polyamide 6 reinforced by short glass fibers (satisfactory agreement of the corresponding results were obtained.

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
WYDZIAŁ MECHANICZNY, BYDGOSZCZ

Praca została złożona w Redakcji dnia 25 lutego 1987 r.

РЕЗЮМЕ

РАСЧЕТ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПЛАСТМАСС

В статье представлены возможности расчетов усталостной прочности конструктивных элементов изготовленных из пластмасс, подверженных воздействию стохастических нагрузок. Отмечено, что известные из литературы методы, основанные на гипотезах суммирования повреждений, уравнениях Журкова и Байлея, а также основанные на теории развития усталостных трещин не дают положительных результатов. Исходя из этого анализа и анализа результатов собственных исследований был разработан расчетный метод основанный на статистических зависимостях между прочностью, определенной при синусоидальной нагрузке и прочностью, определенной в условиях стохастических нагрузок. Расчеты согласно предложенной методике были экспериментально проверены на образцах, изготовленных из итамида 35 полиамид 6 армированных короткими стеклянными волокнами. Было получено хорошее соответствие расчетов с результатами испытаний.
