

## OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ITAMIDU 35 OPARTE NA HIPOTEZIE LINII STAŁYCH USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH<sup>(1)</sup>

JÓZEF SZALA I TOMASZ TOPOLIŃSKI (BYDGOSZCZ)

W pracy przedstawiono zmodyfikowany opis procesu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych, opartego na liniach stałych uszkodzeń zmęczeniowych. Opis ten uwzględnia przejścia do różnych obszarów niszczenia zmęczeniowego i wynikające z tego konsekwencje. Przyjęta na podstawie tego opisu metoda obliczeń trwałości zmęczeniowej została zweryfikowana wynikami badań próbek wykonanych z Itamidu 35. Stwierdzono, że prowadzi ona do uzyskania wyników obliczeń leżących po bezpiecznej stronie wykresów trwałości zmęczeniowej, bliższych eksperymentalnym niż wg hipotezy Palmgrena-Minera i porównywalnych z hipotezą Brautmana-Sahu'a.

### OZNACZENIA

$a$	współczynnik opóźnienia,
$N$	liczba cykli do zniszczenia dla naprężeń sinusoidalnych o stałej amplitudzie,
$N_c$	liczba cykli do zniszczenia dla naprężeń stochastycznych,
$\zeta$	współczynnik wypełnienia widma naprężenia,
$\sigma_a$	amplituda naprężeń [MPa],
$\sigma_{akr}$	krytyczna amplituda naprężeń, rzędna punktu załamania wykresu zmęczeniowego [MPa],
$\sigma_{a \max}$	maksymalna amplituda naprężeń [MPa], indeksy: $c$ – w zakresie cieplnym, $m$ – w zakresie mechanicznym,
$\sigma_a(N)$	wykres zmęczeniowy (Wöhlera),
$\sigma_{a \max}(N_c)$	wykres trwałości wyznaczony w badaniach o obciążeniu stochastycznym,
$\sigma_{ai}$	amplituda naprężeń $i$ -tego stopnia widma [MPa].

<sup>(1)</sup>Praca zrealizowana w ramach CPBR 02.01 pt. "Podstawy mechaniki materiałów, maszyn, konstrukcji i procesów technologicznych" koordynowanego przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk.

## 1. WPROWADZENIE

Przy obecnym stanie wiedzy, uwzględnienie tylko podstawowych czynników wpływających na trwałość zmęczeniową w powiązaniu z fizycznym opisem procesu zmęczenia jest praktycznie niemożliwe. Dotyczy to zarówno konstrukcyjnych tworzyw metalowych, jak i tworzyw niemetalowych. Jednocześnie wydaje się, iż dla tych drugich – ze względu na bardziej złożony proces zmęczenia – perspektywy rozwiązania tego problemu są bardziej odległe. Stąd też wykorzystywane metody obliczeń najczęściej oparte są na mniej lub bardziej fizycznie uzasadnionych fenomenologicznych hipotezach kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych. Według tych hipotez niszczenie elementu następuje w wyniku powstawania i gromadzenia się uszkodzeń zmęczeniowych wraz z każdym zrealizowanym cyklem zmęczeniowym. Wielkość tych uszkodzeń i przebieg ich sumowania opierano najczęściej na makroskopowych własnościach zmęczeniowych. W przypadku tworzyw metalowych obszerny przegląd hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych przedstawiono w pracach [1-2].

Wybrane hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych opracowane dla tworzyw sztucznych – Broutmana-Sahu'a, Owena-Howe'go i Tanimoty-Amijimy przedstawiono i zweryfikowano w pracy [3]. Uzyskane wyniki prównano z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu zmodyfikowanej hipotezy Palmgrena-Minera.

W pracy [4] zaproponowano dla tworzyw sztucznych hipotezę opartą na podobieństwie i statystycznych związkach pomiędzy parametrami wykresu zmęczeniowego i wykresów trwałości, uzyskanych dla różnych wartości współczynnika wypełnienia widma naprężeń. Według tej hipotezy wyniki obliczeń były istotnie bliższe wynikom eksperymentalnym, niż dla hipotez wcześniej wymienionych.

W ostatnich latach wiele uwagi poświęca się hipotezom, których istota związana jest z założeniem istnienia linii stałych uszkodzeń zmęczeniowych. Według tych hipotez dla dwóch różnych poziomów naprężenia (np.  $\sigma_{a1} > \sigma_{a2}$ ) (ten sam stopień uszkodzenia określony w skali mikro- i makroskopowej) uzyskany zostanie po zrealizowaniu różnej liczby cykli ( $n_1 < n_2$ ). Punkty określające ten sam stopień uszkodzenia wyznaczają w układzie  $\sigma - \lg N$  linie stałych uszkodzeń zmęczeniowych. Dla metali są to przede wszystkim hipotezy SUBRAMANYANA, SCHOTTA

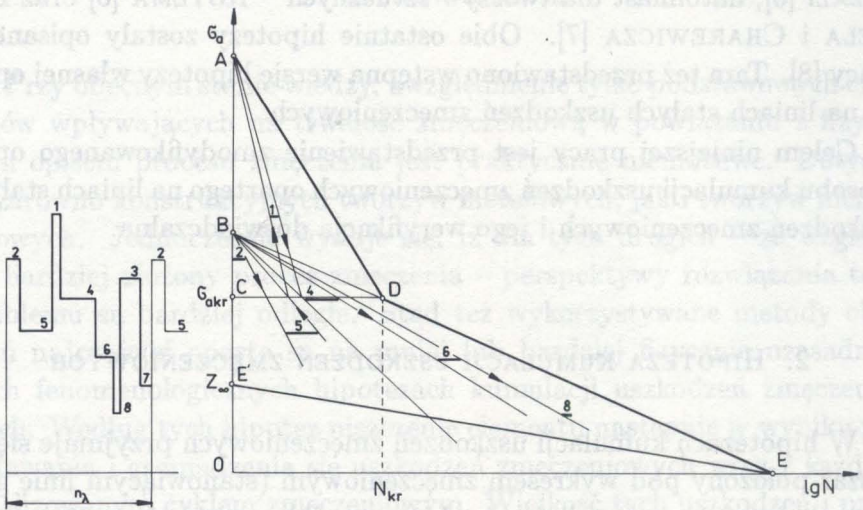
i SZALI [5], natomiast dla tworzyw sztucznych – ROTEMA [6] oraz DANIĘLA i CHAREWICZA [7]. Obie ostatnie hipotezy zostały opisane w pracy [8]. Tam też przedstawiono wstępną wersję hipotezy własnej opartej na liniach stałych uszkodzeń zmęczeniowych.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie zmodyfikowanego opisu sposobu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych opartego na liniach stałych uszkodzeń zmęczeniowych i jego weryfikacja doświadczalna.

## 2. HIPOTEZA KUMULACJI USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH

W hipotezach kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych przyjmuje się, iż obszar położony pod wykresem zmęczeniowym (stanowiącym linię graniczną) podzielony jest liniami. Linie te, jak wspomniano wcześniej, definiują miejsca o jednakowym uszkodzeniu, tj. miejsca pojawiania się podobnych zjawisk zmęczeniowych – poślizgów, pas poślizgów, mikro-pęknięć, np. dla metali i efektów im towarzyszących – wytrzymałość resztkowa, ugięcie itd., np. dla tworzyw sztucznych. Ostatnią z linii jest linia wykresu zmęczeniowego określająca wystąpienie złomu zmęczeniowego.

Istnienie tych linii umożliwia zatem powiązanie poziomu naprężenia bieżącego o określonej liczbie cykli z historią obciążenia, tj. z naprężeniem i stopniem uszkodzenia występującym poprzednio. Tak sformułowano problem w pracach [6-7], w których wykres zmęczeniowy w zakresie trwałości do  $10^6 - 10^7$  cykli przedstawiony był w układzie współrzędnych  $\sigma - \lg N$  w postaci linii prostej. Tymczasem dla szeregu tworzyw częściowo krystalicznych [9] wykres ten przedstawiony jest w postaci linii łamanej. Część tego wykresu, leżąca w zakresie mniejszej liczby cykli, wyróżnia zakres niszczenia cieplnego, druga część natomiast, zakres niszczenia mechanicznego. Oczywiście, w obu przypadkach można mówić tylko o dominowaniu zjawisk cieplnych lub mechanicznych w niszczeniu zmęczeniowym. Szczególnie w zakresie obciążeń leżących w pobliżu punktu załamania wykresu (zwłaszcza powyżej) można mówić o ich współlistnieniu. Istnienie tych dwóch zjawisk pociąga za sobą zróżnicowanie położenia linii stałych uszkodzeń dla obu zakresów oraz konsekwencje wynikające ze zmian (skokowych lub ciągłych) obciążenia. Analiza wpływu wybranych czynników związanych z obciążeniem



Rys. 1. Graficzna ilustracja kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych wg prezentowanej hipotezy (bez opóźnień)

na trwałość i efekty reotermokinetyczne, przedstawiona w pracach [10-11] oraz wnioski wynikające z prac [6-7] pozwalają na sformułowanie następujących założeń (rys.1):

1) pod wykresem zmęczeniowym wyróżniono trzy obszary:  $ABD$  – niszczenia cieplnego,  $CDEE'$  – mechanicznego,  $BCD$  – mieszanego,

2) linie stałych uszkodzeń dla obszaru zniszczenia cieplnego i mieszanego schodzą się w punkcie  $A$  (określony jak w hipotezie ROTEMA [6]), natomiast dla zniszczenia mechanicznego i mieszanego w punkcie  $B$  (wyraz wolny zakresu mechanicznego wykresu Wöhlera),

3) granicę rozdziału pomiędzy liniami uszkodzeń z różnych zakresów stanowi linia  $\sigma_a = \sigma_{akr}$  – naprężenie krytyczne (umownie przyjęta wartość naprężenia przejścia z obszaru cieplnego w mechaniczny i odwrotnie,

4) przejście z obszaru cieplnego w mieszany i odwrotnie odbywa się po liniach z zakresu cieplnego (niewielkie różnice naprężeń – nie ma zmiany mechanizmu niszczenia),

5) przejście z obszaru mechanicznego w mieszany odbywa się po liniach z zakresu mechanicznego,

6) rodzaj kumulacji uszkodzeń w obszarze zniszczenia mieszanego zależy od historii obciążenia (p.4 i 5) i relacji pomiędzy kolejnymi stop-

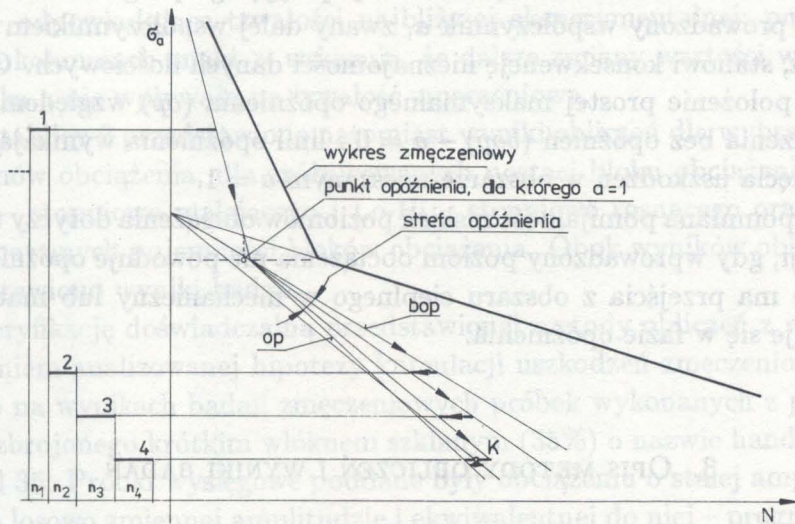
niami naprężeń,

7) przy przechodzeniu z obszaru cieplnego w mechaniczny występuje opóźnienie; wartość opóźnienia zależy od aktualnego stopnia uszkodzenia oraz liczby cykli zrealizowanych na poziomie opóźniającym,

8) złom następuje przy osiągnięciu linii granicznych wykresu zmęczenia, a trwałość odpowiada sumie cykli dla wszystkich zrealizowanych poziomów obciążenia,

9) z obszaru sumowania uszkodzeń wyłącza się obszar  $EE'O$  – uznając pomijalność wpływu naprężeń leżących poniżej  $Z_{\infty}$  [13] w zależności od liczby zrealizowanych cykli oraz następstwa obciążenia.

Ilustrację graficzną przedstawionej hipotezy pokazano na rys.1. Element podlega obciążeniu blokowemu z nieregularnym następstwem stopni (kolejność opisu na rysunku związana jest z wielkością obciążenia). Charakterystyczne przejście 5-1, to przejście z obszaru mechanicznego w cieplny i odwrotnie 1-4. Przejście poziomów 4-6-8 to kolejne fazy niszczenia w obszarze mechanicznym bez uwzględniania opóźniania. Poziom 8 bierze udział w sumowaniu uszkodzeń, mimo iż  $\sigma_{a8} < Z_{\infty}$ , gdyż z punktu widzenia aktualnej fazy procesu uszkodzeń leży poza obszarem  $EE'O$ .



Rys. 2. Graficzna ilustracja mechanizmu "zdrowienia" przy przejściu z obszaru niszczenia cieplnego do obszaru niszczenia mechanicznego

Opóźnienie przyjęte zgodnie z założeniem 7, zależy od poziomu obciążenia i liczby cykli, jakie zrealizowano na tym poziomie. Zgodnie z pracą

[12] i analizą wstępną przedstawioną w [10] można stwierdzić, że każdy poziom obciążenia zdecydowanie odciążający, ale krótkotrwały (w tym przypadku ze zmianą mechanizmu niszczenia) powoduje większy stopień wykorzystania poziomu wyższego. Sugeruje to stan "zdrowienia" tworzywa. Im poziom odciążający jest niższy, tym efekt zdrowienia większy. W skrajnym przypadku poziom odciążający jest przerwą w obciążeniu. Wobec tego "zdrowienie" powinno odpowiadać takiemu modelowi. Przy większej liczbie cykli odciążających (na tym samym poziomie lub następnym (następnych)) – po efekcie "zdrowienia" i zmianie sposobu narastania uszkodzeń – następuje stopniowe sumowanie uszkodzeń, właściwe dla danego poziomu obciążenia. Zmiana sposobu narastania następuje po uzyskaniu maksymalnego opóźnienia.

Model ten, ilościowo nie poparty danymi literaturowymi, przedstawiono na rys.2. Ukazuje on model "zdrowienia" dla części 4-stopniowego obciążenia 1-2-3-4. Przejście z poziomu 1 (obszar niszczenia cieplnego) na poziom 2 stwarza warunki opóźnienia – poziomy 2 i 3 z liczbami cykli  $n_2$  i  $n_3$  powodują zdrowienie, poziom 4 po osiągnięciu maksymalnego opóźnienia (linia *op*) powoduje przyrost uszkodzenia. Punkt *K* określa zatem stan uszkodzenia po realizacji przyjętego programu obciążenia. Wprowadzony współczynnik *a*, zwany dalej współczynnikiem opóźnienia, stanowi konsekwencję nieznanowości danych ilościowych. Określa on położenie prostej maksymalnego opóźnienia (*op*) względem linii uszkodzenia bez opóźnień (*bop*) –  $a = 0$  i linii opóźnienia wynikającej z pominięcia uszkodzeń w obszarze mieszanym  $a = 1$ .

Wspomniana pomijalność niskich poziomów obciążenia dotyczy tylko sytuacji, gdy wprowadzony poziom obciążenia nie powoduje opóźnienia, tj. nie ma przejścia z obszaru cieplnego w mechaniczny lub materiał znajduje się w fazie opóźnienia.

### 3. OPIS METODY OBLICZEŃ I WYNIKI BADAŃ

Do obliczania trwałości zmęczeniowej wykorzystano własny program opracowany w języku Basic. Program umożliwiał dowolną zmianę wartości obciążenia maksymalnego, sekwencji obciążenia, pojemności bloku obciążenia, a także przyjęcie dowolnej wartości współczynnika opóźnienia *a*. Na życzenie użytkownika istnieje możliwość podglądu aktualnego

stopnia uszkodzenia, fazy niszczenia, opóźnienia, a także określenia aktualnych linii uszkodzeń zmęczeniowych.

Algorytm obliczeń jest następujący: po przyjęciu aktualnego poziomu obciążenia program sprawdza, w jakim obszarze niszczenia znajdował się materiał poprzednio, oblicza właściwe linie uszkodzeń zmęczeniowych i określa sposób przejścia po tych liniach. Następnie zostaje określone uszkodzenie (funkcja liczby realizowanych cykli) lub – jeśli materiał znajdował się w fazie zdrowienia – opóźnienie, a więc aktualny stan materiału. Następuje zmiana poziomu obciążenia i cykl obliczeń powtarza się. Za każdym razem zostaje sprawdzony warunek przekroczenia linii granicznej.

Wyniki obliczeń dla różnych wartości współczynnika opóźnienia dla obciążenia z nieregularnym następstwem poziomów  $J$  i  $n_\lambda = 1560$  przedstawiono w tablicy 1.

Przyjęte do obliczeń wartości współczynnika są następujące:

$a = 0$  – obliczenia bez opóźnień; wszystkie naprężenia, jeżeli nie leżą w obszarze  $EE'O$ , powodują przyrost uszkodzenia,

$a = 1$  – opóźnienie maksymalne umownie równe uszkodzeniu dla obszaru mieszanego,

$a$  – odpowiadające trwałości najbliższej eksperymentalnej; podane w tych kolumnach znaki  $>$  wskazują, że dalsze zmiany wartości współczynnika  $a$  nie wpływają na trwałość zmęczeniową.

W tablicy 2 przedstawiono natomiast wyniki obliczeń dla wybranych poziomów obciążenia, dla zróżnicowanych postaci bloku obciążenia, tj. Hi-Lo – stopniowo malejącego i Lo-Hi – stopniowo rosnącego oraz dla zróżnicowanych pojemności bloków obciążenia. Obok wyników obliczeń przedstawiono wyniki badań.

Weryfikację doświadczalną przedstawionej metody obliczeń z wykorzystaniem analizowanej hipotezy kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych oparto na wynikach badań zmęczeniowych próbek wykonanych z poliamidu zbrojonego krótkim włóknem szklanym (35%) o nazwie handlowej Itamid 35. Próbkę wysięgową poddane były obciążeniu o stałej amplitudzie, o losowo zmiennej amplitudzie i ekwiwalentnej do niej – programowanej. Szczegółowy opis makrogeometrii i cech materiałowych próbek oraz warunków badań przedstawiono w pracach [10-11].

Tablica 1. Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej przy zmiennej wartości współczynnika opóźnienia

lp.	Trwałość zmęczeniowa $\times 10^{-3}$					$N_{obl}$	Trwałość zmęczeniowa $\times 10^{-3}$					$N_{obl}$
	obliczeniowa $N_{obl}$					$N_{ex}$	obliczeniowa $N_{obl}$					$N_{ex}$
	$\zeta = 0,52$						$\zeta = 0,69$					
	$n_\lambda$	1,56e3	1,56e3	1,56e3			$n_\lambda$	1,56e3	1,56e3	1,56e3		
	$S$	$J$	$J$	$J$	$R$		$S$	$J$	$J$	$J$	$R$	
$a$	0	1	-			$a$	0	1	-			
1	97,3	0,084	0,084	-	2,36	0,04	72,5	3,14	3,15	3,15	7,01	0,45
2	88,1	0,53	0,53	-	5,75	0,09	65,5	6,32	7,44	7,62	14,43	0,53
3	78,9	2,94	2,99	-	9,19	0,33	58,5	13,81	14,76	15,72	26,88	0,58
4	69,7	7,81	7,84	7,85	14,09	0,56	51,5	28,94	43,42	43,70	81,81	0,53
5	60,5	19,23	37,49	39,04	49,82	0,78	44,5	121,70	$\infty$	184,16	580,06	0,32
6	51,3	66,05	$\infty$	120,64	618,54	0,20	37,5	1968,62	1968,62	184,16	5077,80	0,39
7	42,1	457,59	$\infty$	2601,2	2601,2	0,21				-		

Objaśnienia  $N_{ex}$  - trwałość eksperymentalna

$R$  - obciążenie losowe

$S$  - sekwencja





Wyniki badań ponad 240 próbek dla wszystkich rodzajów obciążenia wykazały możliwość opisu wykresu zmęczeniowego (dla obciążenia stałoamplitudowego) i wykresów trwałości zmęczeniowej, w układzie współrzędnych semilogarytmicznych  $\sigma - \lg N$ , linią łamaną. Wyróżniono zatem dwa zakresy niszczenia – cieplny i mechaniczny. Równania prostych uzyskane metodą najmniejszych kwadratów są następujące:

dla obciążenia sinusoidalnego stałoamplitudowego ( $\xi = 1,0$ )

$$\sigma_{ac} = -17,156 \lg N + 113,8,$$

$$\sigma_{am} = -3,771 \lg N + 54,63,$$

dla obciążenia stochastycznego i  $\zeta = 0,69$

$$\sigma_{amaxc} = -18,538 \lg N_c + 142,08,$$

$$\sigma_{amaxm} = -7,594 \lg N_c + 88,366,$$

dla obciążenia stochastycznego i  $\zeta = 0,52$

$$\sigma_{amaxc} = -28,852 \lg N_c + 193,92,$$

$$\sigma_{amaxm} = -7,573 \lg N_c + 95,598.$$

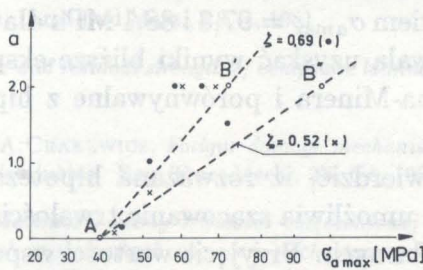
Odpowiednie rzędne punktów załamania wykresów wynoszą: dla  $\zeta = 1,0 \div 37,96$  dla  $\zeta = 0,69 \div 51,09$  i dla  $\zeta = 0,52 \div 60,61$  MPa.

Naprężenie 37,96 MPa wyznacza punkt *D* (rys.1), a więc rozdziela umownie oba obszary zniszczenia.

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Analiza danych zawartych w tablicy 1 (kolumna 7 i 13) wskazuje, iż trwałości obliczone przy wykorzystaniu przedstawionej hipotezy są niższe od trwałości eksperymentalnych. Odchylenia od trwałości eksperymentalnych są tym wyższe, im większe są różnice pomiędzy poziomem obciążenia a odpowiednim punktem (właściwym dla  $\zeta$ ) załamania wykresów trwałości zmęczeniowej. Szczególnie wyraźnie jest to widoczne dla obciążenia o wartości  $\zeta = 0,52$ . W pobliżu punktu załamania stosunek trwałości obliczeniowej do eksperymentalnej wynosi średnio 0,5, co lokuje trwałość obliczeniową wyraźnie po bezpiecznej stronie wykresów trwałości. Wyjątki stanowią przypadki oznaczone w tablicy znakiem

nieskończoności. Przyjęte wartości opóźnienia dla tych przypadków spowodowały, iż teoretycznie przyjęty proces uszkodzenia stabilizował się, tzn. przyjęte opóźnienie (zdrowienie) odpowiadało uszkodzeniu. Wyżej wspomniane trwałości uzyskane zostały dla zróżnicowanych wartości  $a$  – szczególnie dla obciążeń mniejszych od 55 MPa. Im niższe naprężenie, tym mniejszy współczynnik opóźnienia; im naprężenie bliższe wartości  $\sigma_{kr}$  dla  $\zeta = 1.0$  decydującym o mechanizmie niszczenia, tym  $a$  bliższe jest 0 (rys.3). Jest to zgodne z przyjętymi założeniami. Jednocześnie, im naprężenie wyższe, tym przyrost trwałości następuje wraz ze wzrostem współczynnika  $a$  aż do wielkości, gdy przemieszczenie prostej  $bop$  (rys.2) nie wpływa na możliwości "zdrowienia". Uzyskane w obliczeniach wielkości  $a$  przedstawiono na wykresie, na rys.3. Pomimo tego, iż położenie wrysowanych punktów sugeruje niezłożony związek pomiędzy  $\sigma_{a\max}$  a wielkością  $a$  – brak jest ścisłych danych do określenia tej zależności.



Rys. 3. Zależność pomiędzy wartością współczynnika opóźnienia  $a$  i wartością maksymalną naprężenia w widmie

Wpływ liczby cykli w okresie programu  $n_\lambda$  – na trwałość zmęczeniową (tablica 2) wg obliczeń jest zgodny z danymi eksperymentalnymi [11]. Zwiększenie  $n_\lambda$  prowadzi w ogólności do zmniejszenia trwałości zmęczeniowej, tym wyraźniej, im wyższy jest poziom obciążenia (lp. 1, tablica 1). Brak jest takiej zgodności w przypadku zmiany sekwencji obciążenia z nieregularnej  $J$  na stopniowo rosnącą Lo-Hi, czy stopniowo malejącą Hi-Lo. Wg badań własnych [11] sekwencje różne od sekwencji  $J$  prowadzą do wzrostu trwałości zmęczeniowej. Zgodność ta występuje tylko dla niskich poziomów obciążenia i  $n_\lambda = 1,144e4$  ( $\sigma_{a\max} = 51,3$  i 51,5 MPa).

Porównanie uzyskanych wyników obliczeń z wynikami otrzymanymi na podstawie hipotez niezmodyfikowanej Palmgren-Minera i Broutmana-Sahu'a (pełne wyniki w pracy [3]) przedstawiono w tablicy 3. Ich analiza

Tablica 3. Porównanie wyników obliczeń opartych na wybranych hipotezach kumulacji zmęczeń

lp.	Stosunek trwałości obliczeniowej do eksperymentalnej							
	$\zeta = 0.52$				$\zeta = 0.69$			
	$\sigma_{max}$	P-M	B-S	X	$\sigma_{a max}$	P-M	B-S	X
1	97.3	0.18	0.41	0.04	72.5	0.45	0.61	0.45
2	88.1	0.20	0.39	0.09	65.6	0.45	0.58	0.53
3	78.9	0.33	0.57	0.33	58.5	0.52	0.64	0.58
4	69.7	0.56	0.57	0.56	51.5	0.43	0.53	0.53
5	60.5	0.45	0.66	0.78	44.5	0.24	0.32	0.32
6	51.5	0.12	0.17	0.20	37.5	0.39	0.46	0.39
7	42.1	0.04	0.06	0.21				

P-M - Palmgrena-Minera

B-S - Broutmana-Sahu'a

X - przedstawiana hipoteza

wskazuje, iż z wyjątkiem  $\sigma_{a max} = 97,3$  i  $88,1$  MPa dla  $\zeta = 0,52$ , przedstawiona hipoteza pozwala uzyskać wyniki bliższe eksperymentalnym niż wyniki wg Palmgrena-Minera i porównywalne z hipotezą Broutmana-Sahu'a.

Można zatem stwierdzić, iż rozważana hipoteza kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych umożliwia szacowanie trwałości zmęczeniowej przy obciążeniach nieregularnych. Przyjęcie wartości współczynnika opóźnienia  $a = 1$  daje w większości przypadków wyniki leżące po bezpiecznej stronie wykresu trwałości zmęczeniowej o wartości nie większej niż 50% trwałości eksperymentalnej. Wyniki bliższe uzyskuje się przy zmianie parametru  $a$ ; jednak określenie jego wartości dokładnych jest kłopotliwe. Wartości przybliżone uzyskać można przyjmując  $a = 0$  (punkt A) dla naprężeń równych i mniejszych od  $\sigma_{akr}$  i  $a = 2$  (punkt B) dla maksymalnej wartości  $\sigma_{a max}$ . Pozostałe wartości wynikać będą z prostej łączącej punkty AB (na rys. 3 przedstawiono te proste linią kreskową).

Przedstawiona hipoteza uwzględnia szereg zjawisk związanych ze zmęczeniem tworzyw częściowo krystalicznych (obszary niszczeń cieplnych i mechanicznych oraz wynikające z różnych mechanizmów niszczenia – opóźnienie). Jednak wykorzystywanie jej w takiej postaci do obliczeń inżynierskich jest wątpliwe.

Wydaje się zatem, iż konieczne są dalsze prace umożliwiające uzyskiwanie trwałości obliczeniowych bliższych eksperymentalnym. Z jednej strony, powinny to być prace modyfikujące hipotezy wyżej przedsta-

wione, z drugiej zaś – prace poszukujące nowych rozwiązań, np. opartych na metodach energetycznych.

#### LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. W.HWANG and K.S. HAN, *Cumulative damage models and multistress fatigue predictions*, J.Comp. Materials, **20**, 1986.
2. J.SZALA, *Ocena trwałości zmęczeniowej elementów maszyn w warunkach obciążeń losowych i programowanych*, ZN, 79, ATR, Bydgoszcz 1980.
3. J.SZALA i T.TOPOLIŃSKI, *Ocena trwałości zmęczeniowej tworzyw sztucznych na podstawie wybranych hipotez kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych*, Prace BTN, Mechanika, 17, PWN, Warszawa-Poznań 1989.
4. J.SZALA i T.TOPOLIŃSKI, *Obliczanie trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z tworzyw sztucznych*, Rozpr.Inżyn., **36**, 1, 1988.
5. J.SZALA, *Sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych w warunkach naprężeń stochastycznych i programowanych*, Arch.Bud.Masz., **28**, 4, 1981.
6. A.ROTEM, *Fatigue and residual strength of composite laminates*, Eng.Fract.Mech., **25**, 5-6, 1986.
7. I.M.DANIEL and A.CHAREWICZ, *Fatigue damage mechanisms and residual properties of graphite/epoxy laminates*, Eng. Fract.Mech., **25**, 5-6, 1986.
8. T.TOPOLIŃSKI, *Możliwości oceny trwałości zmęczeniowej elementów wykonanych z tworzyw sztucznych w warunkach obciążeń stochastycznych*, Materiały Seminarium "Tworzywa Sztuczne w Budowie Maszyn, Kraków 1988.
9. S.MAZURKIEWICZ i in., *Badania kryteriów i wskaźników zmęczenia oraz własności mechanicznych tworzyw termoplastycznych*, Prace IPPT, Warszawa 1986.
10. J.SZALA i T.TOPOLIŃSKI, *Wpływ obciążenia programowanego dwustopniowego na przebieg zmian temperatury samowzbudnej w badaniach próbek z Itamidu 353*, Materiały XII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1986.
11. J.SZALA i T.TOPOLIŃSKI, *Effect of chosen factors connected with programmed loading on fatigue life of short glass fiber reinforced polyamide*, Arch.Bud.Masz., **34**, 3, 1987.
12. J.ZAWADZKI i in., *Problemy wytężenia i znużenia polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych*, PWN, Warszawa 1978.
13. M.NOWAK, *Analityczny opis wyników badań na zmęczenie jednym równaniem na przykładzie tworzyw sztucznych*, Mech.Teor. i Stos., **24**, 1-2, 1986.

## Резюме

## РАСЧЕТЫ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИТАМИДА 35 ОПИРАЮЩИЕСЯ НА ГИПОТЕЗУ ЛИНИЙ ПОСТОЯННЫХ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

В работе представлено модифицированное описание процесса кумуляции усталостных повреждений, опирающегося на линиях постоянных усталостных повреждений. Это описание учитывает переход к разным областям усталостного разрушения и вытекающие из этого последовательности. Принятый, опирающийся на это описание, метод расчетов усталостной долговечности проведен результатами исследований образцов, изготовленных из Итамида 35. Констатируется, что он приводит к получению результатов расчетов, лежащих в безопасной стороне диаграмм усталостной прочности, более близких экспериментальным, чем согласно гипотезе Пальмгрена-Минера и сравнимых с гипотезой Браутмана-Саги.

## SUMMARY

## FATIGUE LIFE EVALUATION OF ITAMIDE 35 BASED ON THE HYPOTHESIS OF THE CONSTANT FATIGUE DAMAGE LINES

A modified description of the damage cumulation process is presented in the paper, based on the notion of lines of constant fatigue damage. The description takes into account the passage to various fatigue damage regions. The fatigue life evaluation method is verified by comparison with experiments in which Itamide 35 specimen were tested. The method was found to yield results lying at the safe side of the fatigue life diagram, closer to the experimental data than those following from the Palmgren-Miner hypothesis and comparable with the Brautman-Sahu results.

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA  
WYDZIAŁ MECHANICZNY, BYDGOSZCZ

Praca została złożona w Redakcji dnia 16 października 1989 r.