

MODYFIKACJA WYKRESÓW ZMĘCZENIA TWORZYW TERMOPLASTYCZNYCH UWZGLĘDNIAJĄCA EFEKTY STARZENIA

MARIAN NOWAK (WROCLAW)

Określono doświadczalnie i opisano analitycznie (rozkładem noemalnym unormowanym) zmianę własności wytrzymałościowych wybranych tworzyw sztucznych wskutek starzenia w naturalnych warunkach laboratoryjnych. Na tej podstawie przedstawiono własną koncepcję budowy zmodyfikowanych wykresów zmęczenia (Haigha) według schematyzacji równoległej oraz według schematyzacji maksymalnego naprężenia rozciągającego i wytrzymałości na pełzanie. Zalecono stosować schematyzację równoległą.

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- B_i stała równania empirycznego [MPa], $i = \sigma, Z, R$ [równanie (2.1), (2.2) oraz (3.2)],
- N_G baza próby zmęczeniowej (10^7) dla granicznej częstotliwości obciążeń ($f_G = 15$ Hz),
- $R_{z/200}$ czasowa wytrzymałość na pełzanie dla $\tau = 200$ h (albo wytrzymałość na pełzanie [MPa]), [1],
- u zmienna losowa unormowana,
- Z_τ granica zmęczenia [MPa]
- σ_τ maksymalne naprężenie rozciągające } w czasie τ ,
- R_τ wytrzymałość na pełzanie MPa }
- $Z_{j\tau}$ granica zmęczenia przy próbie jednostronnego odzerowo, tętniącego zginania w czasie τ [MPa],
- Z_∞ trwała wytrzymałość zmęczeniowa } ze względu na
- σ_∞ trwałe max. naprężenie rozciągające } czas starzenia
- R_∞ trwała wytrzymałość na pełzanie } $\tau = \tau_\infty$,
- Z_{G0} (10^7) granica zmęczenia przy próbie wahadłowego zginania na bazie $N_G = 10^7$ cykli,
- η_s współczynnik wrażliwości materiału na starzenie [MPa] [2],
- σ odchylenie standardowe [miesiące],

- σ_z (50) maksymalne naprężenie rozciągające przy prędkości badania 50 mm/min [3],
- σ_r naprężenie zrywające [MPa], [3],
- τ czas starzenia (ekspozycji) w naturalnych warunkach, laboratoryjnych (temperatura 293 ± 3 K, wilgotność względna otoczenia od 30 do 90%),
- $\bar{\tau}$ wartość średnia rozkładu normalnego [miesiące],
- τ_u czas nieustalonego starzenia (czas do zakończenia szybkich zmian wytrzymałości zmęczeniowej) [mies.],
- τ_∞ czas starzenia w pełnym cyklu badań, tj. czas do osiągnięcia przez materiał asymptotycznej równowagi termodynamicznej [mies.],
- τ_E czas eksploatacji elementu konstrukcyjnego,
- v_σ prędkość starzenia wg siecznej [MPa/ σ],
- $\varphi(u)$ gęstość rozkładu normalnego.

WSTĘP

Tworzywa sztuczne są już co najmniej od czterdziestu lat stosowane w konstrukcjach inżynierskich i w budowie maszyn [4 i 5]. Stanowią one ważne uzupełnienie konwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych, a zwłaszcza w ostatnich dwudziestu pięciu latach, gdy konstruktorzy otrzymali do dyspozycji tworzywa termoplastyczne zbrojne (wzmocnione) krótkimi, ciętymi włóknami szklanymi i mikrokulkami [6 i 7].

Spośród czynników i efektów, które mają wpływ na własności wytrzymałościowe osnowy i kompozytów (np. efekt kapilarny [8]) dotąd mało zbadany — to efekt starzenia [9]. Dlatego jest on celem niniejszych badań doświadczalnych i rozważań analitycznych.

W pracy przedstawiono problem materiałoznawczo-konstrukcyjny według następującego schematu.

Pierwszy etap analizy — to zbadanie i opisanie zmian własności wytrzymałościowych materiału w czasie starzenia w naturalnych warunkach laboratoryjnych.

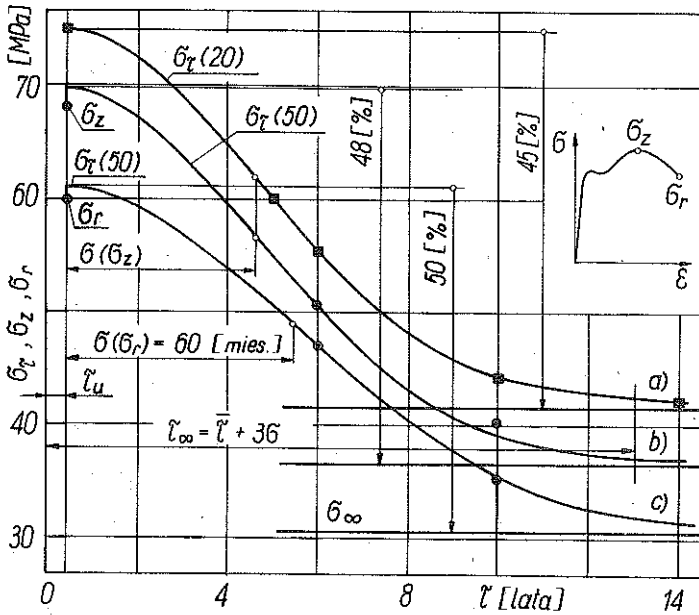
Drugi etap — to uwzględnienie skutków starzenia w budowie zbiorczych wykresów zmęczenia Haigha i w obliczeniach zmęczeniowego współczynnika bezpieczeństwa.

Koncepcja budowy zbiorczego wykresu zmęczenia, uwzględniająca starzenie materiału, polega na tym, że zamiast jednej prostej, zostaje wbudowany w konwencjonalny wykres Haigha ($\sigma_a - \sigma_m$) pęk prostych w przedziale czasu eksplozji $0 \leq \tau \leq \tau_\infty$. Prostej oznaczonej symbolem np. $\chi = 1$ odpowiada nie jedna, lecz zbiór wartości $Z_{j\tau}(\tau)$. Elementem modyfikującym wykres jest więc czas starzenia τ . Jego uwzględnienie odbywa się poprzez wykres kinetyki starzenia o równaniu (2.2).

2. WYKRES KINETYKI STARZENIA

2.1. Maksymalne naprężenie rozciągające

W trakcie próby rozciągania tworzyw znajdujących się w stanie fizycznym wysokoelastycznym ma miejsce orientacja makrocząsteczek zniekształcająca efekty starzenia (dwa a nawet trzykrotnie powstawanie szyjki). Dlatego lepszą od naprężenia zrywającego σ_r miarą tego, co zdarzyło się w strukturze polimeru podczas starzenia, jest maksymalne naprężenie rozciągające σ_z (rys. 1). Wykres kinetyki starzenia $\sigma_z(\tau)$ zależy ponadto od prędkości rozcią-

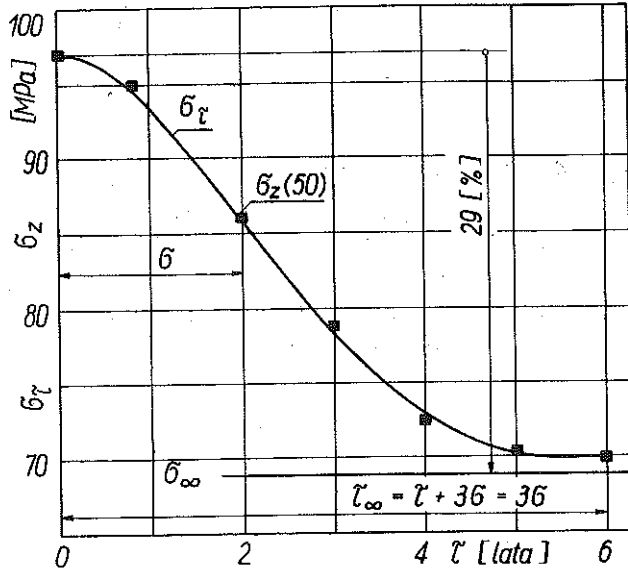


Rys. 1. Wykresy kinetyki starzenia Tarnamidu T-27:

- a) Maksymalnego naprężenia rozciągającego σ_z , $\sigma_z(20) = \sigma_\infty + B_z \varphi(u) = 41,5 + 83,9809 \varphi(u)$, prędkość badania 20 mm/min, $\sigma = 50$ mies., $\bar{\tau} = 6$ mies.
- b) Maksymalnego naprężenia rozciągającego σ_z , $\sigma_z(50) = \sigma_\infty + B_z \varphi(u) = 36,4 + 83,9809 \varphi(u)$, prędkość badania 50 mm/min., $\sigma = 50$ mies., $\bar{\tau} = 6$ mies.
- c) Naprężenia zrywającego σ_r , $\sigma_r(50) = \sigma_\infty + B_z \varphi(u) = 30,4 + 76,7109 \varphi(u)$, prędkość badania 50 mm/min., $\sigma = 60$ mies., $\bar{\tau} = 6$ mies.

Objaśnienia: 1) We wszystkich przypadkach $\tau_u = \bar{\tau}$; 2) Średnie arytmetyczne z 10 oznaczeń ■, ●, ○

gania. Spośród trzech mierzonych wielkości $[\sigma_z(20), \sigma_z(50), \sigma_r(50)]$ przyjęto do analitycznego opisu starzenia maksymalne naprężenie rozciągające, oznaczane ze znormalizowaną prędkością czyli $\sigma_z(50)$ wg normy [3].



Rys. 2. Wykres kinetyki starzenia maksymalnego naprężenia rozciągającego Tarnamidu B: $\sigma_z(50) = \sigma_\infty + B_z \varphi(u) = 69,0 + 70,1930 \varphi(u)$, $\sigma = 24$ mies., $\bar{\tau} = 0$, $\tau_n = 0$ mies., średnia arytmetyczna z 10 oznaczeń ■

Wyniki oznaczeń σ_z z uwzględnieniem czasu starzenia opisano równaniem rozkładu normalnego o parametrach $\bar{\tau}$ i σ (rys. 1 i 2) i ogólnej postaci:

$$(2.1) \quad \sigma_z = \sigma_\infty + B_\sigma \varphi(u),$$

$$u = \frac{\tau - \bar{\tau}}{\sigma}.$$

2.2. Wytrzymałość zmęczeniowa

Oznaczenie granicy zmęczenia Z_{y0} (10^7) wybranych do badań tworzyw sztucznych (tablica 1) przeprowadzono również na próbkach klimatyzowanych w naturalnych warunkach laboratoryjnych i w różnym czasie ekspozycji, który zwiera się w przedziale $0 \leq \tau \leq \tau_\infty$.

Wyniki eksperymentu (np. rys. 3 i 4) opisano z dokładnością do 5% rozkładem normalnym o równaniu

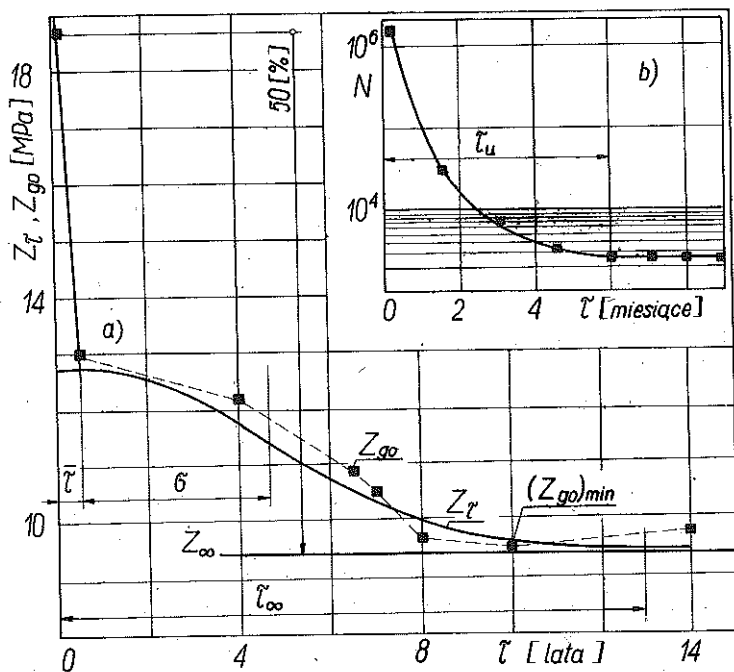
$$Z_\tau = Z_\infty + B_z \varphi(u).$$

Według ustalonych definicji [2, 10] określono ponadto η_s i v_σ (tablica 1). Są to wielkości, które pomagają konstruktorowi ocenić własności materiału na zmęczenie z uwzględnieniem starzenia ($B_i \varphi(u)$ funkcja prognozująca starzenie).

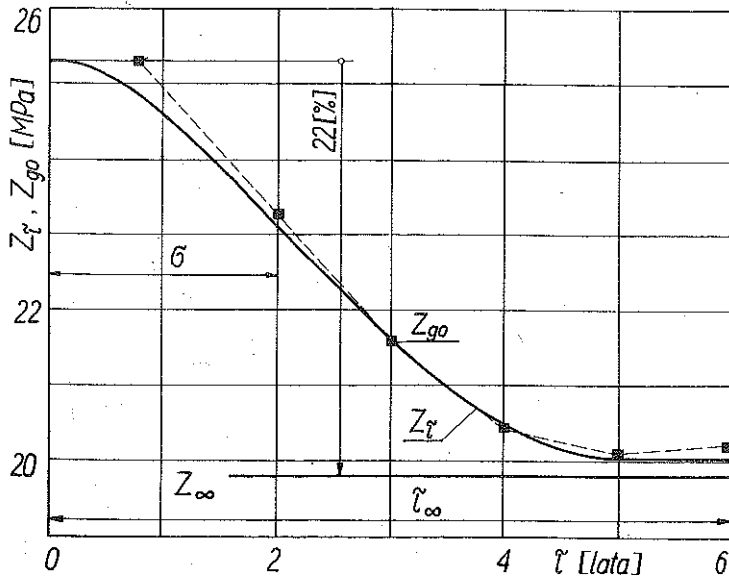
Tablica 1. Własności mechaniczne niektórych tworzyw termoplastycznych

Lp	Material	$R_{z/200}$ ($\tau = \tau_u$) [MPa]	Para- metry rozkładu [mies.]		$Z_z (10^7) =$ $= Z_\infty + B_z \varphi(u)$ [MPa]		η_s [MPa]	ν_σ [MPa] σ	τ_∞ [mies.]	τ_u [mies.]
			$\bar{\tau}$	σ	Z_∞	B_z				
1	Tarnamid T-27	36	6	50	9,4	8,3750	24,0222	0,3153	156	6
2	Tarnamid B	63	0	24	19,8	13,7879	9,6254	1,0800	72	0
3	Itamid 25	64	0	27	18,1	15,8389	20,5325	1,1014	81	10
4	Itamid 35	70	0	22	18,6	17,7531	24,2717	1,5193	66	10
5	Itamid S-2	69	10	13	28,5	27,8917	14,2864	4,6789	49	0
6	Elana 2 (PTE)	48	10	8	15,7	8,6339	1,8592	2,0319	34	0
7	Elit 25	70	16	15	19,8	15,2000	4,4735	1,9080	61	0
8	Elit 25u	76	16	15	26,3	15,2000	4,4735	1,9080	61	0
9	Elit 30EX	80	16	15	28,8	15,2000	4,4735	1,9360	61	0

Kompozyty na osnowie PA6 i PTE wykonano wg technologii opracowanej przez Instytut Chemii Przemysłowej w Warszawie i tylko z tych materiałów mogą być wykonywane elementy maszyn.



Rys. 3. Wykres kinetyki starzenia granicy zmęczenia Tarnamidu T-27 (a): $N_G = 10^7$ cykli, $f = 15$ Hz, średnica próbki $d = 12$ mm, $Z_\tau = 9,4 + 8,3750 \varphi(u)$; $\bar{\tau} = 6$, $\sigma = 50$ [%]; $\eta_s = 24,0222$ [MPa], $\nu_\sigma = 0,3153$ [MPa/ σ] oraz wykres trwałości zmęczeniowej (b): $\tau_u = 6$ [mies.], $\sigma_{max} = 24,7$ [MPa]

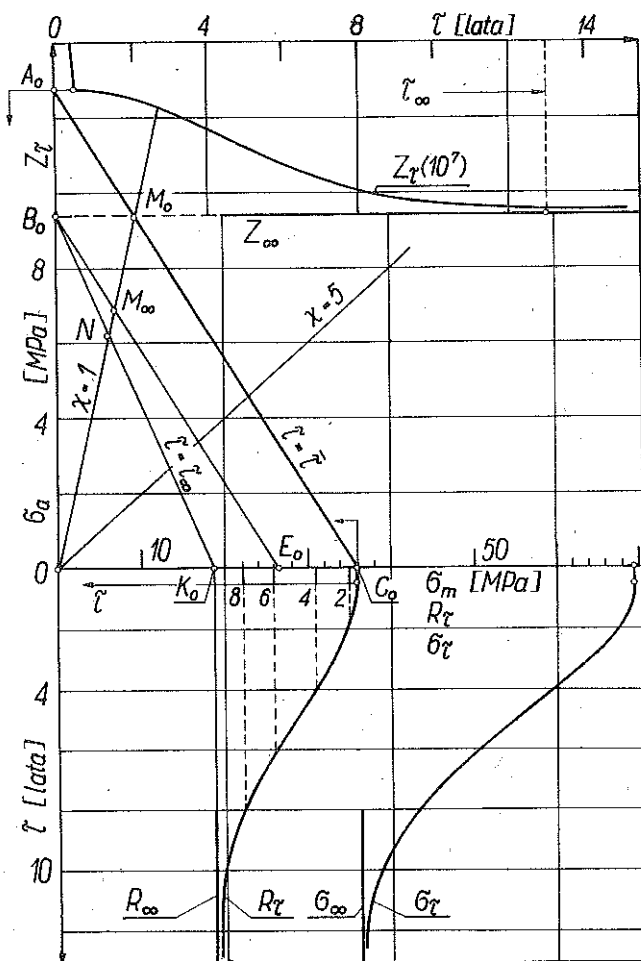


Rys. 4. Wykres kinetyki starzenia granicy zmęczenia-Tarnamidu B: $N_G = 10^7$ cykli; $f = 15$ Hz; średnica próbki $d = 8$ mm; $\tau_u = 0$ [mies.]; $Z_\tau = 19,8 + 13,7879 \varphi(u)$; $\bar{\tau} = 0$; $\sigma = 24$ [mies.]; $\eta_s = 9,6254$ [MPa]; $\nu_s = 1,0800$ [MPa/ σ]

Najważniejsze różnice własności doraźnych i zmęczeniowych tworzyw sztucznych względem materiałów konwencjonalnych można podsumować następująco: 1) wyraźnie zaznaczona zależność własności wytrzymałościowych od czasu starzenia; 2) udział w dekohezji polimeru dwóch typów wiązań (głównych i pobocznych) i zależność sił van der Waalsa od czynników atmosferycznych (np. implikacją tego zjawiska jest powstawanie kilku — jedna po drugiej — szyjek w próbkach rozciąganych); 3) niestabilna struktura wewnętrzna (cząsteczkowa i nadcząsteczkowa) w przedziale czasu ekspozycji $0 \leq \tau \leq \tau_\infty = \bar{\tau} + 3\sigma$.

3. SCHEMATYZACJA WYKRESÓW ZMĘCZENIA

Wykresy zmęczenia dla cykli niesymetrycznych i materiałów o własnościach mechanicznych niezależnych od czasu posiadają — według najprostszej schematyzacji, tj. schematyzacji Soderberga — dwa punkty (rys. 5): $A_0(0, \sigma_a)$ i $C_0(\sigma_m, 0)$. Natomiast w przypadku sztucznych tworzyw, których wytrzymałość (np. σ_z , σ_r , Z_{g0} i $R_{2/\tau}$) zależy od czasu ekspozycji, punkty A_0 i C_0 zmieniają położenie wzdłuż osi $0\sigma_m$ oraz $0\sigma_a$ (w kierunku początku układu współrzędnych).



Rys. 5. Konstrukcja zmodyfikowanego wykresu Haigha Tarnamidu T-27; schematyzacja według maksymalnego naprężenia rozciągającego σ_2 (II rodzaj)

Schematyzację wykresów zmęczenia podzielono na trzy rodzaje, zależnie od stopnia uproszczenia eksperymentu, tj. od wielkości nanoszonych na oś $0\sigma_m$.

3.1. Schematyzacja równoległa

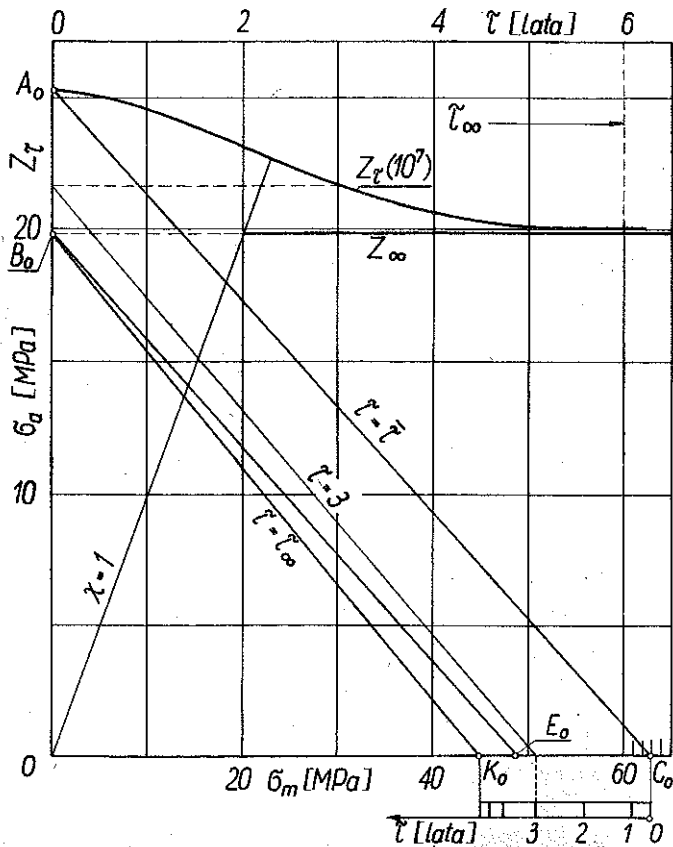
Najprostszą konstrukcję zbiorczych wykresów zmęczenia (Haigha) nazwano schematyzacją równoległą $B_0 E_0 \parallel A_0 C_0$. Powstaje ona na podstawie następujących danych (rys. 5): a) wykres kinetyki starzenia granicy zmęczenia

o równaniu (2.2) — punkty A_0 , B_0 ; b) wytrzymałość na pełzanie $R_{z/\tau}(\tau_u)$ określoną w czasie eksplozji $\tau = \tau_u$ (punkt C_0) albo w czasie $\tau = \tau_\infty$ (punkt K_0).

3.2. Schematyzacja według maksymalnego naprężenia rozciągającego

Podstawą konstrukcji zbiorczych wykresów zmęczenia wg tej schematyzacji są następujące dane (rys. 5 i 6): a) wykres kinetyki starzenia granicy zmęczenia o równaniu (2.2); b) wykres kinetyki starzenia maksymalnego naprężenia rozciągającego o równaniu (2.1); c) wytrzymałość na pełzanie określona w czasie $\tau = \tau_u$.

W związku z dużą zmianą σ_z w pełnym cyklu badań (około 50%, rys. 1) i brakiem zależności $R_t(\tau)$ lub wartości $R_{z/\tau}(\tau_\infty) = R_\infty$ założono, że



Rys. 6. Konstrukcja zmodyfikowanego wykresu Haigha Tarnamidu B; schematyzacja według maksymalnego naprężenia rozciągającego σ_z (II rodzaj)

Tablica 2. Błąd Δ schematyzacji równoległej względem schematyzacji wg maksymalnego naprężenia rozciągającego

Materiał	$\tau = \tau_u$, [mies.]		C	$ \Delta = 100 \frac{\overline{OM_\infty} - \overline{ON}}{\overline{ON}}$, [%] (rys. 5)	
	$\sigma_z(50)$	$R_{z/\tau}$		$\chi = 1$	$\chi = 5$
	[MPa]				
Tarnamid T-27	69,7	36	1,9361	11,0	28,2
Tarnamid B	97,0	63	1,5238	2,6	6,2

Tablica 3. Zestawienie obliczeń do konstrukcji wykresu R_t albo skali czasu na osi σ_m dla Tarnamidu T-27

τ [mies.]	0	12	24	36	48	60	72	120	168	106
$u = \frac{\tau-6}{\sigma}$	-0,12	0,12	0,36	0,6	0,84	1,08	1,32	2,28	3,24	2
$\varphi(u)$	0,3961	0,3961	0,3739	0,3332	0,2803	0,2227	0,1669	0,0297	0,0021	0,0539
$\sigma_z(50)$	69,665	69,665	67,800	64,382	59,939	55,067	50,416	38,894	36,576	40,927
R_t [MPa]	35,982	35,982	35,019	33,254	30,959	28,442	26,039	20,089	18,892	21,139
$\sigma_z(50) = 36,4 + 83,9809 \varphi(u)$; $C = 1,9361$, $R_t = 18,8 + 43,3763 \varphi(u)$ — wg (3.2)										

wytrzymałość na pelzanie zmienia się procentowo w czasie ekspozycji τ analogicznie jak maksymalne naprężenie rozciągające σ_z (tablica 2):

$$(3.1) \quad R_t = \frac{\sigma_t}{c}, \quad c = \frac{\sigma_z(50, \tau_u)}{R_{z/\tau}(\tau_u)}$$

Jest to założenie dokładniejsze niż przyjęte w pracy [11], ponieważ proces niszczenia wiązań głównych i pobocznych w trakcie pelzania (jednoosiowe rozciąganie) jest bardziej zbliżony do tego, który ma miejsce w trakcie rozciągania niż zmęczenia. Ponadto powyższe założenie wspiera termofluktuacyjna teoria ŻURKOVA [12], według której przyczyną procesu termodestrukcji polimerów, są fluktuacje drgań cieplnych atomów w makrocząsteczce.

Równanie kinetyki starzenia wytrzymałości na pelzanie R_t określają więc następujące wzory:

$$R_{\infty} = \frac{\sigma_{\infty}}{c}, \quad B_R = \frac{B_{\sigma}}{c}, \quad \varphi(u) = \varphi(u_R) = \varphi(u_{\sigma}),$$

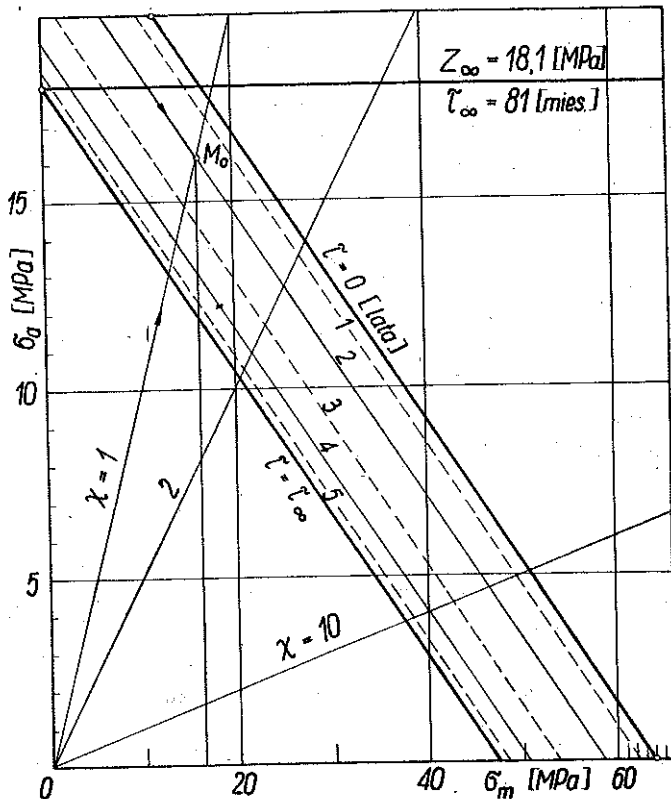
$$(3.2) \quad R_t = R_{\infty} + B_R \varphi(u).$$

Przykład obliczeń zawiera tablica 3, a przykład konstrukcji wykresu R_t — rys. 5.

3.3. Schematyzacja według wytrzymałości na pełzanie

Podstawą konstrukcji zbiorczego wykresu zmęczenia są następujące dane:
 a) wykres zmiany granicy zmęczenia w wyniku starzenia, równanie (2.2),
 b) wykres zmiany wytrzymałości na pełzanie, równanie (3.2).

Konstrukcja wykresu kinetyki starzenia wytrzymałości na pełzanie R_t jest bardziej czasochłonna i eksperymentalnie trudniejsza, niż konstrukcja wy-



Rys. 7. Zmodyfikowany wykres Haigha Itamidu 25 (przykład schematyzacji równoległej ze skokową skalą czasu)

kresu σ_τ . Dlatego spośród trzech opisanych schematyzacji racjonalną ze względu na pomiary (czas, dokładność, wyposażenie laboratorium i technika eksperymentu) jest schematyzacja równoległa, albo o większej dokładności, a tym samym i większych trudnościach doświadczalnych — schematyzacja według maksymalnego naprężenia rozciągającego σ_z . W przypadku stosowania schematyzacji równoległej korzystanie ze zbiorczych wykresów zmęczenia jest wskazane ograniczyć do $\chi \leq 1$, a to ze względu na ograniczenie wartości błędu (tablica 2).

Zamiast łączenia wykresów kinetyki starzenia (Z_τ i σ_τ) z konwencjonalnym wykresem Haigha ($\sigma_m - \sigma_a$) (rys. 5) można uprościć konstrukcję zmodyfikowanego wykresu zbiorczego przez wprowadzenie na odcinku $A_0 B_0$ i $K_0 C_0$ skali czasu (rys. 6) według parametrów rozkładu normalnego, albo przez wpisanie w wykres ($\sigma_m - \sigma_a$) skali skokowej (rys. 7).

Kształt i wymiary próbek, stosowanych w badaniach zmęczeniowych tworzyw sztucznych, nie są znormalizowane i aby nie naruszać istniejącej standaryzacji przy oznaczaniu $R_{z/\tau}$ [1] wskazanym jest przeprowadzenie pomiaru wytrzymałości na pełzanie na próbkach płaskich przy jednoosiowym rozciąganiu, z wykorzystaniem wyników również do wahadłowego, obrotowego zginania.

3.4. Analityczne określenie Z_{jt}

Wprowadzając oznaczenia pomocnicze

$$\tau = 0 \Rightarrow Z_\tau = Z_0 \quad \text{oraz} \quad \sigma_m = R_{z/\tau},$$

otrzymamy równanie prostej przechodzącej przez punkty A_0 i C_0 (rys. 5):

$$(3.3) \quad \sigma_a = -\sigma_m \frac{Z_0}{R_{z/\tau}} + Z_\infty + B_z \varphi(u),$$

oraz równanie prostej przechodzącej przez początek układu dla $\chi = 1$:

$$(3.4) \quad \sigma_a = \sigma_m.$$

Rozwiązując równania (3.3) i (3.4) otrzymamy współrzędne punktu M_0 :

$$\sigma_m = \frac{Z_\tau}{1 + \frac{Z_0}{R_{z/\tau}}}, \quad \sigma_a = -\frac{Z_\tau}{1 + \frac{Z_0}{R_{z/\tau}}} \cdot \frac{Z_0}{R_{z/\tau}} + Z_\tau.$$

Stąd granica zmęczenia Z_{jt} wynosi

$$Z_{jt} = 2 \cdot \left(-\frac{Z_\tau}{1 + \frac{Z_0}{R_{z/\tau}}} \cdot \frac{Z_0}{R_{z/\tau}} + Z_\tau \right).$$

Tablica 4. Wartości współczynników M , δ i ε

Lp	Material	M	δ	ε
1	Tarnamid T-27	0,7386	0,3539	0,3230
2	Tarnamid B	0,7135	0,4015	0,2992
3	Itamid 25	0,7238	0,3815	0,3092
4	Itamid 35	0,7316	0,3668	0,3165
5	Itamid S-2	0,6521	0,5335	0,2332
6	Elana 2 (PTE)	0,7354	0,3598	0,3200
7	Elit 25	0,7506	0,3322	0,3338
8	Elit 25u	0,7189	0,3910	0,3044
9	Elit 30EX	0,7129	0,4027	0,2986

Podstawiając za $Z_0/(R_{z/\tau}) = K$ oraz $1/(1+K) = M$ otrzymamy po odpowiednich przekształceniach

$$(3.5) \quad Z_{jt} = 2MZ_{\tau}$$

Wielkość M (tablica 4) nazwano stałą materiałową, gdyż nie zależy od czasu starzenia τ .

PRZYKŁAD. Wyznaczyć granicę zmęczenia Z_{jt} Itamidu 25 po czasie starzenia $\tau_E = 24$ [mies.]. Z tablicy 1 odczytano: $\bar{\tau} = 0$; $\sigma = 27$ [mies.]; $Z_{\infty} = 18.1$ [MPa]; $B_z = 15,8389$ [MPa] oraz z tablicy 4: $M = 0,7238$.

WYNIKI OBLICZEŃ:

$$\text{Zmienna losowa unormowana } u = \frac{\tau_E - \bar{\tau}}{\sigma} = 0,89.$$

Gęstość rozkładu normalnego $\varphi(u) = 0,2685$.

Granica zmęczenia Z_{τ} określona z równania kinetyki starzenia (2.2)

$$Z_{\tau}(\tau_E) = Z_{\infty} + B_z \varphi(u) = 22,3527 \text{ [MPa]}.$$

Granica zmęczenia przy próbie jednostronnego odzerowo tętniącego zginania

$$Z_{jt} = 2MZ_{\tau}(\tau_E) = 32,36 \text{ [MPa]}.$$

Granica zmęczenia odczytana z wykresu (rys. 7)

$$Z_{jt} \approx 32,4 \text{ [MPa]}.$$

4. ZMĘCZENIOWY WSPÓŁCZYNNIK BEZPIECZEŃSTWA

W algorytmie obliczeń na zmęczenie uwzględniono fakt, że 1) wykresy zmęczenia tworzyw sztucznych nie są opisane przez poziomy odcinek we

współrzędnych σ_{max} , $\log N$ [13], czyli nie wykazują trwałej wytrzymałości zmęczeniowej; 2) granica zmęczenia tworzyw sztucznych wyraźnie zależy od czasu ekspozycji τ (rys. 3, 4) i przerw w obciążeniu [2 i 13].

W związku z tym w równaniu na zmęczeniowy współczynnik bezpieczeństwa x_z (tablica 5) występuje wielkość Z_τ oraz $Z_{j\tau}$ i warunek dodatkowy

Tablica 5. Zmęczeniowy współczynnik bezpieczeństwa x_z w jednoosiowym stanie naprężenia dla cykli symetrycznych i niesymetrycznych z uwzględnieniem starzenia

Nr	Rodzaj cyklu naprężeń		x_z (Nr 2 i 3: dla dowolnego χ)	x_z dla $\chi = 1$
1	Ciął symetryczny		$\frac{Z_\tau \lambda}{\beta \gamma \sigma_a}$	—
2	Ciął niesymetryczny	$\frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \text{const}$	$\frac{Z_\tau \lambda}{\beta \gamma \sigma_a + \sigma_m \left(\frac{2Z_\tau}{Z_{j\tau}} - 1 \right)}$	$\frac{Z_\tau \lambda}{\beta \gamma \sigma_a + \delta \sigma_m}$
3		$\sigma_m = \text{const}$	$\frac{Z_\tau \lambda + 2\sigma_m \left(1 - \frac{Z_\tau}{Z_{j\tau}} \right)}{\beta \gamma \sigma_a + \sigma_m}$	$\frac{Z_\tau \lambda + 2\epsilon \sigma_m}{\beta \gamma \sigma_a + \sigma_m}$
4	Warunek dodatkowy		$N_E \leq N_G(f_G)$	[2]

λ — współczynnik przerw w obciążeniu [2]; inne oznaczenia wg PN [14] oraz [15].

(Nr 4), który uwzględnia także częstotliwość obciążeń f_G (samorozgrzewanie) i przerwy w obciążeniu. O toku obliczeń wytrzymałościowych decyduje więc założony przez konstruktora czas eksploatacji τ_E konstrukcji lub odpowiadająca mu eksploatacyjna liczba cykli N_E .

Podstawiając wielkość (3.5) oraz stałą materiałową M do wzoru na zmęczeniowy współczynnik bezpieczeństwa x_z (tablica 5), otrzymamy dwie nowe stałe δ i ϵ (tablica 4):

$$\delta = \frac{1 - M}{M} = \frac{2Z_\tau}{Z_{j\tau}} - 1,$$

$$\epsilon = \frac{2M - 1}{2M} = 1 - \frac{Z_\tau}{Z_{j\tau}},$$

które upraszczają budowę wzorów x_z dla $\chi = 1$ oraz technikę obliczeń z uwzględnieniem starzenia.

5. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Zmiana maksymalnego naprężenia rozciągającego σ_z i granicy zmęczenia Z_{g0} sięga dla badanych tworzyw konstrukcyjnych do 50% i uzasadnia celowość konstruowania wykresów kinetyki starzenia i uwzględnienia ich w budowie zbiorczych wykresów zmęczenia, obliczeniach wytrzymałościowych, badaniach i porównywaniu materiałów oraz ocenie ich wartości konstrukcyjnej.

Wytrzymałość zmęczeniowa Z_{g0} zależy (ilościowo) inaczej od czasu starzenia niż maksymalne naprężenie rozciągające σ_z . W związku z tym schematyzacja zbiorczego wykresu zmęczenia według maksymalnego naprężenia rozciągającego σ_z jest dokładniejsza od schematyzacji równoległej. Z drugiej strony schematyzacja równoległa opiera się na prostszej konstrukcji wykresu i dlatego może być uprzywilejowaną w zastosowaniach.

W obliczeniach zmęczeniowego współczynnika bezpieczeństwa x_z należy korzystać ze wzorów, które uwzględniają reologiczne własności polimerów, tj. wykresy kinetyki starzenia, a w przypadku cykli niesymetrycznych zmodyfikowane wykresy Haigha wg wybranej schematyzacji.

Tworzywa sztuczne są strukturą złożoną oraz czułą na wpływy środowiska i ich wartości konstrukcyjne należy oceniać nie tylko na podstawie standardowych wskaźników, lecz przede wszystkim wielkości wprowadzonych do analizy wytrzymałościowej przez autora takich jak funkcja starzenia $B_i \varphi(u)$, współczynnik wrażliwości na starzenie η_s , równanie kinetyki starzenia (σ_t, Z_t, R_t), zmodyfikowanego, zbiorczego wykresu zmęczenia ($\sigma_m - \sigma_a$) itp.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. PN-72/C-89041 Tworzywa sztuczne. Oznaczanie pełzania przy rozciąganiu.
2. M. NOWAK, *Obliczanie i badanie na wytrzymałość zmęczeniową konstrukcyjnych tworzyw sztucznych*, Arch. Budowy Maszyn, **30**, 3—4, 187—201, 1983.
3. PN-81/C-89034 Tworzywa Sztuczne. Oznaczanie cech wytrzymałościowych przy statycznym rozciąganiu (obowiązując od 1982.01.01; wcześniej PN-68).
4. A. THUM, A. GRETH, H. R. JACOBI, *Dauerbiegeversuche mit Kunstharzpressstoffen*, Kunst und Pressstoffe, **16**, 2, 16—24, 1937.
5. W. SUROWIAK, S. CHUDZYŃSKI, *Tworzywa sztuczne w budowie maszyn*, PWT, Warszawa 1960.
6. K. OBERBACH, *Unverstärkte und glasfaserverstärkte Polyamide als Konstruktionswerkstoffe*, Plastverarbeiter, **17**, 12, 769—778, 1966.
7. W. ZIELIŃSKI, *Polimery wzmocnione włóknem szklanym*, Polimery — Tworzywa Wielko-cząsteczkowe, **11**, 3, 107—109, 1966.
8. M. NOWAK, *Über den Einfluss der Wasseraufnahme auf die Ermüdungsgrenze von verstärkten Polyamiden*, Plaste und Kautschuk, **28**, 4, 221—224, 1981.
9. M. NOWAK, *Analityczny opis starzenia poliamidu 6 niszczonego zmęczeniowo*, Mech. Teoret. Stos., **19**, 3, 435—454, 1981.

10. М. НОВАК, Усталостные характеристики полиамидов, армированных стеклом, Мех. Ком. Материалов, 3, 439—445, 1983.
11. М. NOWAK, *Ermüdungskurven für Plaste und Sicherheitskoeffizienten bei unsymmetrischen Beanspruchungen*, Maschinenbautechnik, 32, 11, 507—511, 1983.
12. С. Н. ЖУРКОВ, *Проблема прочности твердых тел*, Вестник АН СССР, 11, 78—82, 1957.
13. М. NOWAK, *Zgięcia i nieciągłości wykresów zmęczenia tworzyw sztucznych*, Arch. Budowy Maszyn, 29, 2, 139—155, 1982.
14. PN-74/H-04325 Badanie metali na zmęczenie.
15. М. Е. NIEZGODZIŃSKI, Т. NIEZGODZIŃSKI, *Obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn*, PWN Warszawa 1973.

РЕЗЮМЕ

МОДИФИКАЦИЯ ДИАГРАММ УСТАЛОСТИ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ СТАРЕНИЯ

Определены экспериментально и описаны аналитически (нормальным нормированным распределением) изменение разрушающего напряжения при растяжении и предела выносливости избранных полимеров вследствие старения в естественных лабораторных условиях. На этой основе предложена собственная концепция построения модифицированных диаграмм усталости по параллельной схематизации, а также по схематизации разрушающего напряжения при растяжении и разрушающего напряжения при ползучести. В экспериментах рекомендуется применять параллельную схематизацию.

SUMMARY

MODIFICATION OF FATIGUE DIAGRAMS OF THERMOPLASTICS ACCOUNTING FOR THE EFFECTS OF AGEING

The variation of mechanical properties of selected plastics due to ageing under natural laboratory conditions has been experimentally determined and analytically described (by normal normed distribution). On this basis author's concept has been presented concerning the construction of modified fatigue diagrams (Haigh) in accordance with the parallel schematization and the maximum tensile stress and creep strength schematization. Application of parallel schematization in experiments is recommended.

POLITECHNIKA WROCLAWSKA

Praca została złożona w Redakcji dnia 14 marca 1985 r.