

## ANALITYCZNO-WYKREŚLNA METODA WYZNACZANIA CZASU PREDYSPOZYCJI TWORZYW SZTUCZNYCH DO OBCIĄŻEŃ STAŁYCH I ZMIENNYCH

MARIAN NOWAK (WROCLAW)

Przeprowadzono oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie i wytrzymałości na zmęczenie dziesięciu rodzajów konstrukcyjnych tworzyw sztucznych w różnym czasie ekspozycji próbek. Wyniki pomiarów opisano równaniami empirycznymi. Skonstruowano wykresy we współrzędnych „czas starzenia — współczynnik odporności na zmęczenie”, które uwzględniają różną w czasie wrażliwość materiału na rozciąganie i zmęczenie. Odciętą punktu wykresu o maksymalnej wartości funkcji nazwano czasem predyspozycji i zaproponowano go jako kryterium stosowania stałych lub zmiennych obciążeń.

### OZNACZENIA

- $B_i$  stała równania empirycznego [MPa],  $i = \sigma, Z$ ,
- $E_g$  moduł sprężystości przy zginaniu [MPa], [1],
- $K_t$  współczynnik odporności na zmęczenie,
- $R_{s/200}$  wytrzymałość na pełzanie [MPa] dla czasu trwania obciążenia 200 h,
- $u$  zmienna losowa unormowana,
- $Z_t$  granica zmęczenia [MPa] w czasie  $\tau$ ,
- $\sigma_t$  maksymalne naprężenie rozciągające [MPa] w czasie  $\tau$ ,
- $Z_\infty$  trwała wytrzymałość zmęczeniowa [MPa] ze względu na czas starzenia ( $\tau = \tau_\infty$ ),
- $\sigma_\infty$  trwałe maksymalne naprężenie rozciągające [MPa] ze względu na czas starzenia,
- $Z_{g0}$  granica zmęczenia przy próbie wahadłowego zginania [MPa],
- $\sigma_z$  maksymalne naprężenie rozciągające [MPa],
- $\tau$  czas starzenia (ekspozycji) w naturalnych warunkach laboratoryjnych (temp.  $293 \pm 3K$ , wilgotność względna otoczenia od 30 do 90%), [mies.]; czas życia próbek w równaniu (2.4),
- $\tau_E$  czas eksploatacji elementu konstrukcyjnego [mies.],
- $\tau_{pre}$  czas predyspozycji [mies.],
- $\varphi(u)$  gęstość unormowana zmiennej losowej normalnej.

### 1. WSTĘP

Tworzywa sztuczne coraz powszechniej stosowane są do produkcji części maszyn obciążonych zmęczeniowo lub statycznie w długim czasie. Może być

Tablica 1. Współczynniki materiałowe

Materiał	$K_p$	$K_T$	$K_w$	$K_{CO}$	$K_\beta$	Układ według $(Z_{zas})_{min}$	
						Materiał	$Z_{g0}$
Tarnamid T-27	1,20	0,883	0,740	1,26	1,02	Elit 30 EX	18,4
Tarnamid B	1,15	0,540	0,770	1,08	1,05	Bistan AS-20	13,2
Itamid 25	1,07	0,645	0,609	1,27	1,13	Tarnamid B	10,2
Itamid 35	1,10	0,596	0,588	1,24	1,14	Itamid 25	9,7
Bistan AS-20	1,10	0,931	0,703	1,09	1,45	Tarnamid T-27	9,3
Elit 30 EX	1,09	0,566	0,941	1,10	1,06	Itamid 35	8,9

Definicje:

Współczynnik przerw w obciążeniu  $K_p = \frac{Z_{g0} \text{ (obciążenie przerywane)}}{Z_{g0} \text{ (obciążenie ciągłe)}}$

Współczynnik odporności cieplnej  $K_T = \frac{Z_{g0} \text{ (358 K)}}{Z_{g0} \text{ (298 K)}}$

Współczynnik sorpcji wody  $K_w = \frac{Z_{g0} \text{ (próbki po 12 mies. sorpcji)}}{Z_{g0} \text{ (próbki naturalne klimat)}}$

Współczynnik obróbki cieplnej  $K_{CO} = \frac{Z_{g0} \text{ (próbki cieplnie obrobione)}}{Z_{g0} \text{ (próbki natural. klimatyzowane)}}$

Współczynnik karbu  $K_\beta = \frac{Z_{g0} \text{ (próbki gładkie)}}{Z_{g0} \text{ (próbki z karbem)}}$

Zastępcza granica zmęczenia  $Z_{zas} = Z_\tau \cdot K_p \cdot K_T \cdot K_w \cdot K_{CO} \cdot K_\beta$

kilka, równocześnie branych pod uwagę, kryteriów wyboru rodzaju materiału do danych warunków eksploatacji. Np. metoda przetwórstwa, wielkość serii, granica zmęczenia w czasie  $\tau$ , wytrzymałość na pęczanie, wrażliwość na starzenie, współczynnik tarcia, obrabialność cieplna, chłonność wody, odporność na wpływy atmosferyczne, itd.

Z grupy wstępnie wytypowanych materiałów wybieramy ten (np. do obciążeń zmęczeniowych), którego zastępcza granica zmęczenia  $Z_{zas}$  jest największa w danych warunkach eksploatacji (tablica 1).

Kryterium wyboru może być także stosunek wytrzymałości zmęczeniowej do wytrzymałości na rozciąganie, a więc współczynnik uwzględniający starzenie i różną w czasie wrażliwość tworzyw sztucznych na zmęczenie i rozciąganie. W tym przypadku, ze zbioru tworzyw sztucznych o zbliżonych własnościach na zmęczenie, np. Tarnamid B–Itamid 25 (tablica 2) korzystniej jest wybrać ten,

Tablica 2. Zbiór badanych materiałów utworzony w kolejności malejącej wartości  $(K_{\tau})_{\max}$ 

Materiał	$(K_{\tau})_{\max}$	$\tau_{\text{pre}}$ [mies.]	$Z_{\tau}(\tau_{\text{pre}})$ [MPa]	$R_{z/200}$ [MPa]	$\tau_{\infty}$ [mies.]
Itamid 58-D	0,600	$\tau_{\infty}$	15,90	30	42
Itamid 58-C	0,334	$\tau_{\infty}$	21,70	50	42
Tarnamid T-27	0,325	50	11,67	36	156
Itamid 58-B	0,323	20	37,81	90	53
Tarnamid B	0,287	$\tau_{\infty}$	19,80	63	72
Itamid 58-A	0,263	18	39,81	115	49
Elit 30 EX	0,249	21	34,58	86	61
Bistan AS-20	0,239	0	22,00	77	51
Itamid 25	0,216	36	20,71	64	81
Itamid 35	0,178	20	23,28	70	66

Wartości  $\tau_{\infty}$  dotyczą badań na zmęczenie.

który ma większy współczynnik  $K_{\tau}$  oraz dłuższy czas predyspozycji  $\tau_{\text{pre}}$ , tj. Tarnamid B.

Celem niniejszej pracy jest: a) opis metody wyboru najkorzystniejszego materiału do obciążeń stałych lub zmiennych ze względu na różne zmiany w czasie granicy zmęczenia  $Z_{\tau}$  i maksymalnego naprężenia rozciągającego  $\sigma_{\tau}$ , b) opis właściwości materiału takimi wskaźnikami, które informują kiedy i w jakich warunkach materiał nadaje się do obciążeń stałych, a kiedy do obciążeń zmiennych.

## 2. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

Badano wytrzymałość na rozciąganie (maksymalne naprężenie rozciągające  $\sigma_z$ ) i granicę zmęczenia  $Z_{\tau}$  (tablica 3) z uwzględnieniem czasu ekspozycji  $\tau$ . Na podstawie otrzymanych wyników pomiaru zbudowano wykresy kinetyki starzenia (rys. 1 i 2) o równaniach empirycznych w postaci

$$(2.1) \quad \sigma_{\tau} = \sigma_{\infty} + B_{\sigma} \cdot \varphi(u),$$

$$(2.2) \quad Z_{\tau} = Z_{\infty} + B_z \cdot \varphi(u).$$

Ponieważ współczynnik odporności na zmęczenie, zdefiniowany wzorem

$$(2.3) \quad K_{\tau}^0 = \frac{Z_{\tau}(10^7)}{\sigma_{\tau}(50)} = \frac{Z_{\infty} + B_z \cdot \varphi(u)}{\sigma_{\infty} + B_{\sigma} \cdot \varphi(u)}$$

Tablica 3. Własności badanych tworzyw

Nr	Materiał	Zawartość napelniacza [%] — wag.	$\sigma_z(50,1)$ [MPa]	$Z_{90}(10^7, 1)$ [MPa]	$E_g$ [MPa]	Chłonność wody (296 K 65%)
1	Tarnamid T-27	—	71	19,8	2400	3,5
2	Tarnamid B	—	97	25,3	2200	—
3	Itamid 25	25	156	27,8	6600	2,3
4	Itamid 35	35	188	31,4	7400	2,1
5	Itamid 58-A	58	200	43,3	10000	1,39
6	Itamid 58-B	58	158	39,1	7600	1,57
7	Itamid 58-C	58	93	29,5	5400	1,64
8	Itamid 58-D	58	59	24,1	3000	1,27
9	Bistan AS-20	20	92	22,0	5900	0,30
10	Elit 30 EX	30	148	32,5	8300	0,20

Napelniaczem jest krótkie, cięte włókno szklane typu E (Itamid 25, Itamid 35, Itamid 58-A, Bistan AS-20, Elit 30 EX), mikrokulki szklane (Itamid 58-D) oraz mieszanina włókien i mikrokulek szklanych w stosunku 38,5:19,5 (Itamid 58-B) oraz 19,5:38,5 (Itamid 58-C).

$\sigma_z(50,1) \equiv \sigma_z$  (prędkość rozciągania 50 mm/min, czas starzenia 1 mies.).  $Z_{90}(10^7, 1) \equiv Z_{90}$  (baza  $10^7$  cykli, czas starzenia 1 mies.), częstotliwość 15 Hz, temperatura badania 298 K.

zmienia się również w czasie  $\tau$ , zbudowano dla materiałów badanego zbioru wykresy  $K_\tau$  (rys. 3) w następującej postaci:

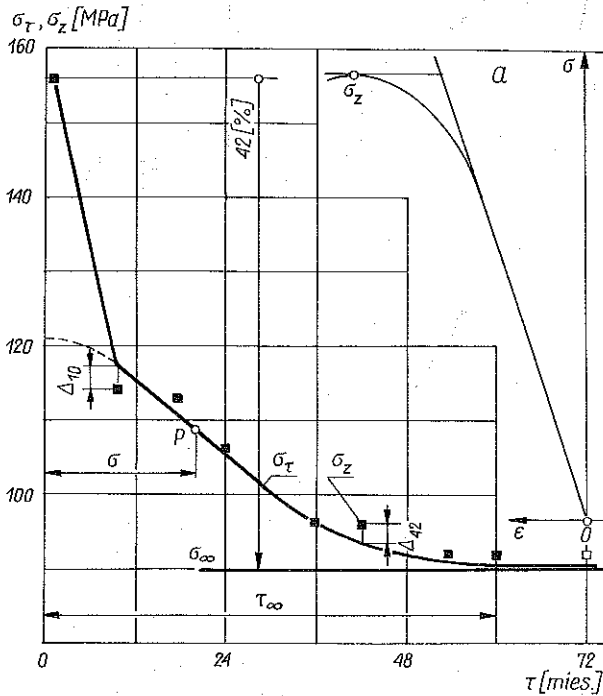
$$K_\tau = K_\infty \pm B_K \cdot \varphi(u).$$

Wynika z nich (rys. 4), że funkcja  $K_\tau$  ma maksimum o odciętej  $\tau = \tau_{pre}$ , która może być użyta jako kryterium wyboru tworzyw sztucznych nie tylko ze względu na wartość liczbową  $K_\tau$ , ale również ze względu na rodzaj obciążenia — stałe (statyczne) lub zmienne.

Jeżeli czas eksploatacji  $\tau_E > \tau_{pre}$ , to zalety materiału w większym stopniu ujawniają się wówczas, gdy będzie stosowany do obciążeń stałych, czyli materiał ma większe predyspozycje do obciążeń stałych niż zmiennych ze względu na mechanizm dekohezji.

Metoda wyboru rodzaju tworzywa do danych warunków eksploatacji lub opis predyspozycji materiału do odpowiednich obciążeń, oparty na wykresach współczynnika odporności na zmęczenie, składa się z następujących instrukcji.

1. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie i zmęczenie w przedziale czasu eksploatacji  $0 \leq \tau \leq \tau_\infty$ .



Rys. 1. Wykres kinetyki starzenia maksymalnego naprężenia rozciągającego  $\sigma_z$  Itamidu 25:  $\sigma_\tau = 90 + 76,68 \cdot \varphi(u)$ , wartość średnia rozkładu normalnego  $\bar{\tau} = 0$ , odchylenie standardowe  $\sigma = 20$  mies.;  $P$  – punkt przegięcia wykresu; a) wykres rozciągania; ■ – średnie arytmetyczne z 8÷10 oznaczeń;  $\Delta_\tau$  – względny błąd aproksymacji ( $\Delta_{10} = +2,6\%$ ,  $\Delta_{42} = -2,7\%$ ); czas starzenia w pełnym cyklu badań  $\tau_\infty = 60$  mies.

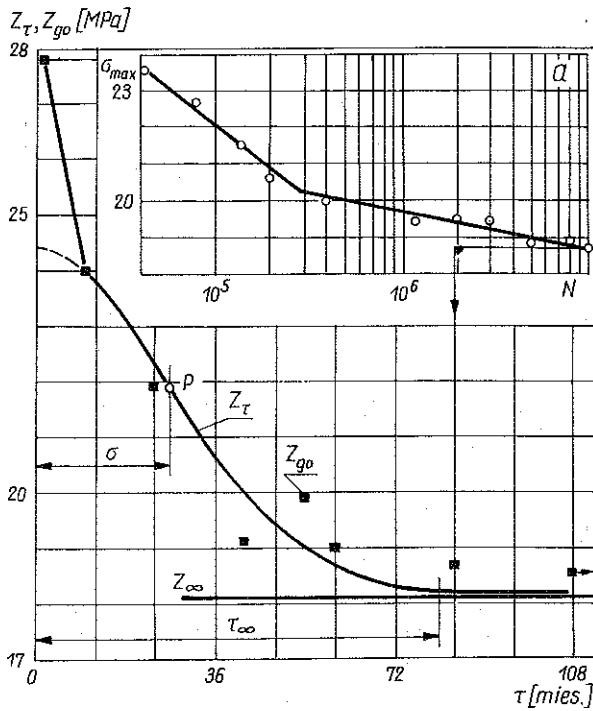
2. Ukonstytuowanie równań kinetyki starzenia  $\sigma_\tau$  i  $Z_\tau$  (rys. 1 i 2 oraz tablica 4).

3. Graficzne opracowanie wyników obliczeń  $K_\tau^0 = Z_\tau/\sigma_\tau$  (rys. 3).

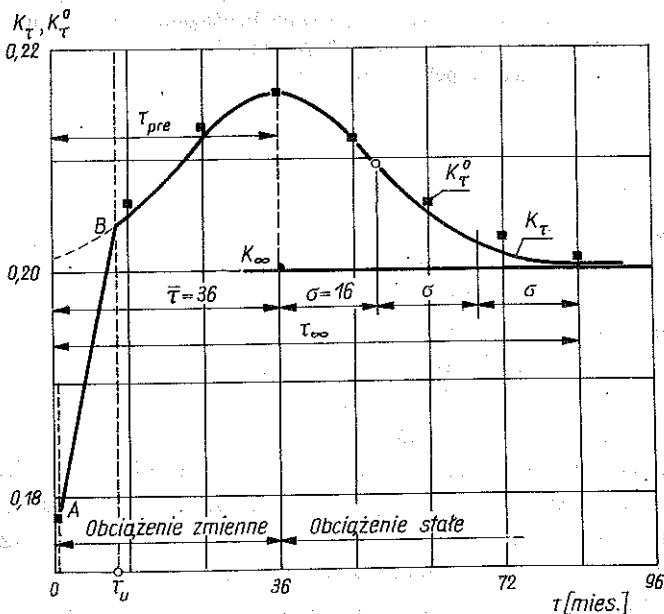
Jeżeli czas ekspozycji do osiągnięcia quasirównowagi termodynamicznej jest długi ( $\tau_\infty$ , tabl. 2), to analityczne sformułowanie równań kinetyki starzenia można przeprowadzić metodą skróconą lub przybliżoną [2 i 3].

Do powyższego należy dodać uwagę, precyzyjnie sformułowaną przez Kocańdę dla metali: „miejmy jednak na uwadze fakt braku fizycznego uzasadnienia związku pomiędzy tymi wielkościami” [4, s. 15], tn. pomiędzy  $R_m$  i  $Z_{g0}$ .

W przypadku tworzyw sztucznych należy podejść odmiennie do zależności  $R_m(\sigma_z)$  i  $Z_{g0}$  ze względu na strukturę cząsteczkową i nadcząsteczkową oraz ze względu na aktualne poglądy w sprawie dekohezji polimerów. Przyjmuje się, że złom próbki następuje w wyniku zerwania wiązań chemicznych [5–7] oraz, że w procesie tym bierze udział energia kohezji cząsteczkowej  $U_K$ , a szczególnie długość makrocząsteczki, stopień rozgałęzienia lub usieciowania, orientacja, napętniacze, wiązania wodorowe, wiązania przez elektrony  $\pi$ , itp. W obu



Rys. 2. Wykres kinetyki starzenia granicy zmęczenia  $Z_{g0}(10^7)$  Itamidu 25:  $Z_{\tau} = 18,1 + 15,8389 \cdot \varphi(u)$ , wartość średnia rozkładu normalnego  $\bar{\tau} = 0$ , odchylenie standardowe  $\sigma = 27$  mies.; a) wykres zmęczenia dla  $\tau = 84$  mies.; czas starzenia w pełnym cyklu badań  $\tau_{\infty} = 81$  mies.



Rys. 3. Wykres współczynnika odporności na zmęczenie Itamidu 25;  $K_{\tau} = 0,2 + 0,0401 \cdot \varphi(u)$ , wartość średnia rozkładu normalnego  $\bar{\tau} = 36$  mies., odchylenie standardowe  $\sigma = 16$  mies., czas predyspozycji  $\tau_{pre} = 36$  mies.

przypadkach, tj. rozciągania i zmęczenia, elementarne akty dekohezji są te same – rozrywanie wiązań chemicznych. Na tej płaszczyźnie można umiejscowić fizyczne związki pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie i wytrzymałością zmęczeniową. Różnice w wartościach szczegółowych  $R_m(\sigma_z)$  i  $Z_{g0}$ , zależne także i od czasu ekspozycji  $\tau$ , wynikają natomiast z różnej prędkości propagacji pęknięć pod działaniem statycznych lub zmiennych obciążeń.

Podstawą teoretyczną fizycznego związku pomiędzy  $R_m(\sigma_z)$  i  $Z_{g0}$  może być termomechaniczna teoria ŻURKOWA [8], a analityczną formą – równanie na czas życia próbki  $\tau$  przy statycznym rozciąganiu lub zginaniu obrotowo-giętym:

$$(2.4) \quad \tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U - \gamma \cdot \sigma}{kT}\right)$$

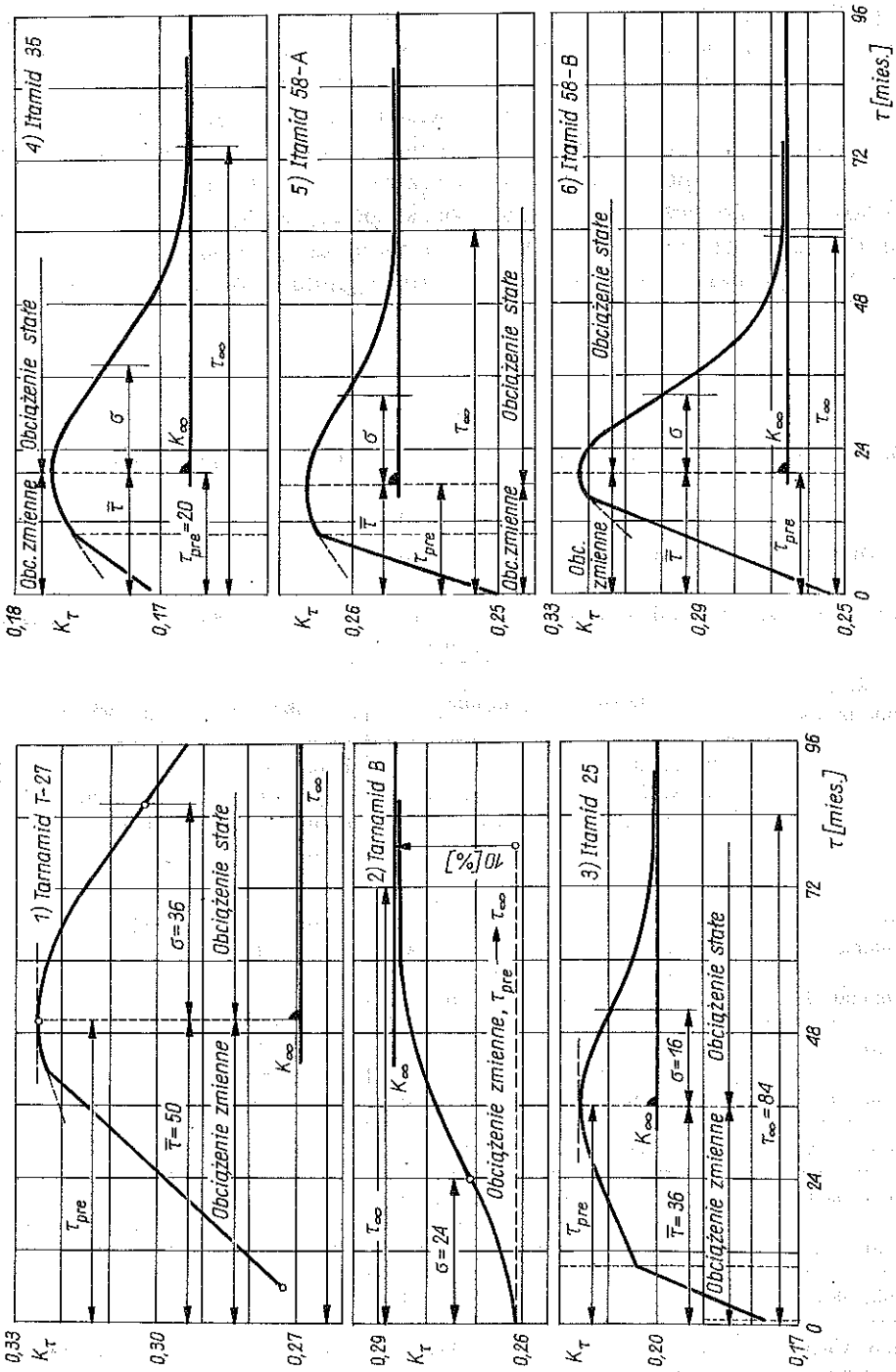
oraz przybliżone równanie bariery energetycznej wiązań głównych

$$U \approx U_d + U_K,$$

w których  $\tau_0$  oznacza okres drgań własnych atomu,  $\gamma$  – współczynnik

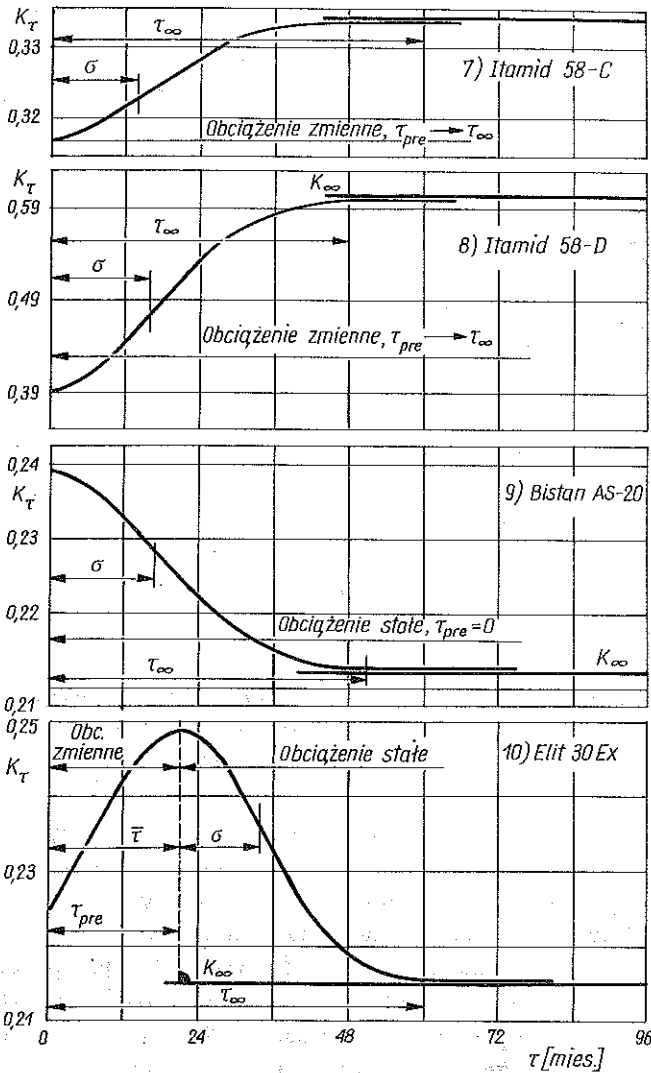
Tablica 4. Równania kinetyki starzenia wytrzymałości na rozciąganie  $\sigma_z(50)$  i granicy zmęczenia  $Z_{g0}(10^7)$

Rodzaj obciążenia →	Statyczne rozciąganie				Zginanie obrotowo-giętne			
	Parametry rozkładu normalnego [mies.]		$\sigma_z = \sigma_\infty + B_\sigma \cdot \varphi(u)$ [MPa]		Parametry rozkładu normalnego [mies.]		$Z_c = Z_\infty + B_z \cdot \varphi(u)$ [MPa]	
	$\bar{\tau}$	$\sigma$	$\sigma_\infty$	$B_\sigma$	$\bar{\tau}$	$\sigma$	$Z_\infty$	$B_z$
Tarnamid T-27	0	24	34,6	31,300	6	50	9,4	8,3750
Tarnamid B	0	24	69,0	70,193	0	24	19,8	13,7879
Itamid 25	0	20	90,0	76,680	0	27	18,1	15,8389
Itamid 35	0	20	110,0	91,000	0	22	18,6	17,7531
Itamid 58-A	0	11	128,0	170,000	4	15	33,2	25,5436
Itamid 58-B	0	11	106,0	126,000	8	15	28,5	32,1383
Itamid 58-C	0	14	65,0	64,000	0	14	21,7	17,6633
Itamid 58-D	0	13	26,7	83,200	0	14	15,9	18,8442
Bistan AS-20	0	20	78,0	35,640	0	17	16,8	13,0936
Elit 30 EX	0	15	133,0	37,690	16	15	28,8	15,200

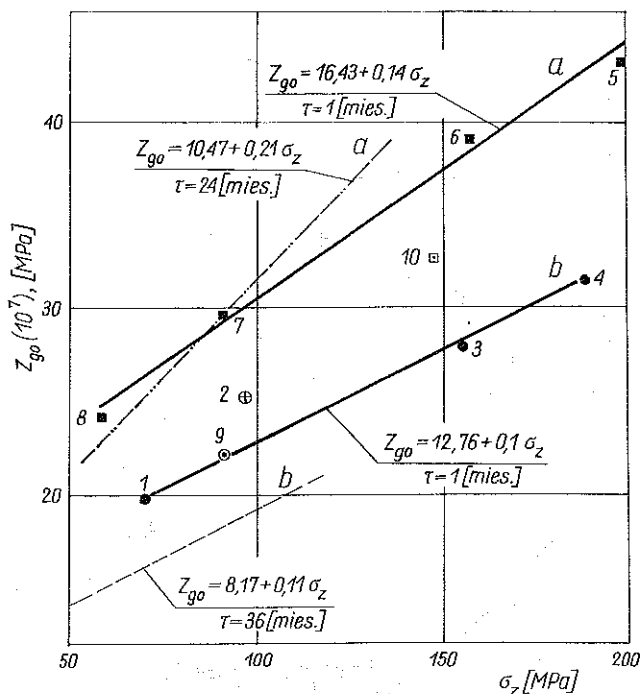


[Rys. 4]





Rys. 4. Wykresy współczynnika odporności na zmęczenie dla badanych materiałów (analityczno-wykreslna metoda wyznaczania  $\tau_{pre}$ ): 1) Tarnamid T-27 (poliamid 6 produkcji Zakładów Azotowych w Tarnowie), 2) Tarnamid B (poliamid 6, produkcji ZAT, otrzymany metodą polimeryzacji anionowej o średniej masie makrocząsteczki  $\bar{M} = 45000$ ), 3) Itamid 25 (kompozyt produkowany przez Spółdzielnię Pracy Chemików „XENON” w Łodzi); 4) Itamid 35; 5) Itamid 58-A; 6) Itamid 58-B; 7) Itamid 58-C; 8) Itamid 58-D; 9) Bistan AS-20; 10) Elit 30 EX (PET + 30% wag. włókien szklanych + stabilizator + modyfikator, termoplastyczny elastomer)



Rys. 5. Wykresy zależności granicy zmęczenia  $Z_{g0}(10^7)$  od maksymalnego naprężenia rozciągającego  $\sigma_z(50)$  dla dwóch rodzin poliamidu wzmocnionego: a) stałą zawartością szkła (punkty 5, 6, 7, 8), b) zmienną zawartością włókien szklanych (punkty 1, 3, 4) Nazwy materiałów w tablicy 3

strukturalny, zależny od parametrów budowy cząsteczkowej i nadcząsteczkowej oraz rodzaju obciążenia,  $\sigma$  – naprężenie,  $T$  – temperaturę,  $U_d$  – energię dysocjacji wiązań głównych oraz  $U_K$  – energię kohezji cząsteczkowej.

Teoria Żurkowa objaśnia dekohezję jako fluktuację energii cieplnej ( $kT$ ), zaś naprężenie  $\sigma$  – traktuje jako wielkość wspomagającą proces dekohezji przez zmniejszenie energii wiązań [5 i 8]. Energię wiązań zmniejsza nie tylko naprężenie  $\sigma$ , lecz i temperatura  $T$  (tu samowzbudna), która przy zginaniu obrotowo-giętnym jest znacznie wyższa niż przy statycznym rozciąganiu. Równanie (2.4) ma zatem sens fizyczny, wynikający z kinetycznej koncepcji dekohezji. Koncepcja ta oparta jest na rozrywaniu wiązań chemicznych oraz rozrywaniu i odbudowie wiązań międzycząsteczkowych, niezależnie od rodzaju obciążenia.

Przykładem zależności pomiędzy  $R_m(\sigma_z)$  i  $Z_{g0}$  są wykresy rodziny tworzyw na osnowie poliamidu (matrycy polimerowej PA6) wzmocnionego (rys. 5): a) stałą zawartością szkła, tj. Itamid 58 – A – B – C – D (tablica 3), b) zmienną zawartością włókien szklanych – Itamid 25 oraz Itamid 35.

Inne badane tworzywa nie mają wspólnego rdzenia i zaznaczono je pojedynczymi punktami (Tarnamid B, Bistan AS-20 i Elit 30 EX, rys. 5).

3. PRZYKŁAD BUDOWY WYKRESU  $K_\tau$  DLA ITAMIDU 25

Na znormalizowanych próbkach [9] przeprowadzono oznaczanie maksymalnego naprężenia rozciągającego  $\sigma_z(50)$  po czasie starzenia  $\tau = 1 - 60$  mies. (tablica 5, rys. 1a). Wartość średnią  $\bar{\sigma}_z$ , obliczoną na podstawie  $8 \div 10$  oznaczeń, naniesiono na układ o współrzędnych  $\tau - \sigma_z$  i opisano równaniem empirycznym (2.1). Równanie asymptoty obliczono wg wzoru sformułowanego na podstawie własności rozkładu normalnego [10]

$$\sigma_\infty = 0,989 \cdot (\sigma_z)_{\min} = 0,989 \cdot 92 \approx 90 \text{ MPa.}$$

Parametry rozkładu  $\bar{\tau} = 0$  i  $\sigma = 20$  mies. określono metodą jednakowych błędów ( $\Delta_{10} \approx \Delta_{42}$ , rys. 1 i tablica 5) otrzymując równanie kinetyki starzenia maksymalnego naprężenia rozciągającego

$$\sigma_\tau = \sigma_\infty + B_\sigma \cdot \varphi(\mu) = 90 + 76,68 \cdot \varphi(u).$$

Granice zmęczenia  $Z_{90}(10^7)$  określono na podstawie wykresów zmęczenia (rys. 2a) zbudowanych metodą przegrupowania GATTO [11]. Wykresy skonstruowano na podstawie 12 - 20 oznaczeń dla różnych czasów starzenia ( $\tau = 1 - 132$  mies). Stałe równania (2.2) oraz parametry funkcji  $\varphi(u)$  określono metodą jednakowych błędów [10], otrzymując  $\bar{\tau} = 0$ ,  $\sigma = 27$  mies. oraz równanie kinetyki starzenia granicy zmęczenia

$$Z_\tau = Z_\infty + B_z \cdot \varphi(u) = 18,1 + 15,8389 \cdot \varphi(u).$$

Punkty o współrzędnych  $\tau$  i  $K_\tau^0 = Z_\tau / \sigma_\tau$  opisano równaniem

$$K_\tau = K_\infty \pm B_K \cdot \varphi(u) = 0,200 + 0,0401 \cdot \varphi(u),$$

w którym  $\bar{\tau} = 36$ ,  $\sigma = 16$  mies. oraz  $K_\infty = 0,989 \cdot 0,202 \approx 0,200$ . Względny błąd aproksymacji nie przekracza 1%. W zakresie czasu starzenia  $0 \leq \tau \leq \tau_u = 10$  mies., tj. starzenia nieustalonego wykres współczynnika odporności na zmęczenie Itamid 25 jest prostą (AB), natomiast dla  $\tau > \tau_u$  (starzenie ustalone [12]) punkty  $K_\tau^0$  opisuje funkcja odpowiadająca funkcji rozkładu normalnego o parametrach  $\bar{\tau}$  i  $\sigma$  (tablica 5).

Wykres ilorazu  $Z_\tau / \sigma_\tau$  ma wyraźnie inny kształt niż funkcje podstawowe, tj.  $\sigma_\tau$  i  $Z_\tau$  (rys. 1 i 2) i wskazuje na to, że starzenie inaczej odzwierciedla się przy statycznym rozciąganiu, a inaczej przy zginaniu obrotowo-giętnym. Gdy czas eksploatacji  $0 \leq \tau_E \leq \tau_{pre}$ , to Itamid 25 wykazuje po czasie ekspozycji  $\tau_E$  większą wrażliwość na rozciąganie (obciążenie statyczne), natomiast gdy  $\tau_E > \tau_{pre}$  jest odwrotnie, tzn. Itamid 25 wykazuje po czasie ekspozycji  $\tau_E$  większą wrażliwość na zmęczenie. Złożona postać funkcji  $K_\tau$  wskazuje również na to, że bez graficznego zapisu nie jest możliwe, nawet schematyczne ustalenie jej przebiegu. Czas  $\tau_{pre}$  odpowiadający wartości średniej rozkładu normalnego ( $\tau_{pre} = \bar{\tau}$ ) nazwano czasem predyspozycji materiału do określonego rodzaju obciążenia.

Tablica 5. Zestawienie wyników pomiaru  $\sigma_z$  i  $Z_{g0}$  oraz wyników obliczeń współczynnika odporności na zmęczenie Itamidu 25 ( $\Delta$  – względny błąd aproksymacji)

$\tau$ , [mies.]	0	1	10	12	18	24	36	42	48	54	60	72	84
$\sigma_z(50)$ , [MPa]	—	156	114	—	113	106	96	96	—	92	92	—	—
$\sigma_z$ , wzór (2.1)	120,6	—	117,0	115,5	110,4	104,9	96,1	93,4	91,7	90,8	90,3	90,04	—
$\Delta$ , [%]	—	—	+2,6	—	-2,3	-1,03	0	-2,7	—	-1,3	-1,8	—	—
$Z_{g0}(10^7)$ , [MPa]	—	27,8	24,0	—	—	21,9	—	19,1	—	19,9	19,0	—	18,7
$Z_z$ , wzór (2.2)	24,4	—	24,0	23,8	23,15	22,4	20,7	19,97	19,4	18,95	18,64	18,28	18,15
$\Delta$ , [%]	—	—	0	—	—	2,3	—	4,6	—	4,8	1,9	—	2,9
$K_t^0 = Z_z/\sigma_z$	0,202	0,178	0,205	0,206	0,210	0,213	0,216	0,214	0,212	0,209	0,206	0,203	—
$u = (\tau - 36)/16$	—	—	—	—	—	—	0	0,375	0,75	1,125	1,5	2,25	3,0
$\varphi(u)$	—	—	—	—	—	—	0,3989	0,3719	0,3011	0,2118	0,1295	0,0317	0,0044
$K_z = K_\infty + B_K \cdot \varphi(u)$	—	—	—	0,205	0,208	0,212	0,216	0,215	0,212	0,208	0,205	0,201	0,2001
$\Delta$ , [%]	—	—	—	0,5	0,95	0,47	0	0,5	0	0,5	0,5	0,99	—

## 4. UWAGI KOŃCOWE

Wykres współczynnika odporności na zmęczenie  $K_t$  informuje o możliwościach eksploatacyjnych materiału w następującej formie.

a) Gdy czas eksploatacji  $\tau_E \leq \tau_{pre} \neq 0$ , to zmiana granicy zmęczenia  $Z_t$  w czasie jest mniejsza od zmiany wytrzymałości na rozciąganie  $\sigma_t$  i korzystniejszym obciążeniem, przy innych zbliżonych zaletach, jest obciążenie zmienne.

b) Gdy  $\tau_E > \tau_{pre} \neq 0$ , to zmiana granicy zmęczenia w czasie jest większa niż zmiana wytrzymałości na rozciąganie i korzystniejszym obciążeniem jest obciążenie statyczne.

c) Gdy czas predyspozycji  $\tau_{pre} = 0$  lub  $\tau_{pre} \Rightarrow \tau_{\infty}$  (wśród badanych tworzyw własności takie ma np. Bistan AS-20 i Tarnamid B), to materiał nadaje się bardziej albo do obciążeń statycznych gdy  $K_t$  maleje, albo do obciążeń zmiennych gdy  $K_t$  rośnie w całym zakresie czasu eksploatacji  $\tau_E$ .

Zmiana własności wytrzymałościowych tworzyw sztucznych ( $\sigma_z$ ,  $Z_{g0}$  i innych) wskutek starzenia zależy nie tylko od czasu ekspozycji  $\tau$ , lecz także i od rodzaju badanej cechy wytrzymałościowej, tj. sposobu realizowania obciążenia: obciążenie rozciągające lub obciążenie zmienne. Powinno to znaleźć swój wyraz w projektowaniu odpowiedzialnych konstrukcji inżynierskich z tworzyw sztucznych.

Równoległe z badaniami zmęczeniowymi w różnym czasie ekspozycji należy prowadzić badania wytrzymałości na rozciąganie (z której łatwo obliczyć wytrzymałość na pelzanie [13]). Mierzone wielkości są podstawą obliczeń współczynnika odporności na zmęczenie  $K_t^0$  i konstrukcji wykresu  $K_t$ . Z wykresu można ustalić czas predyspozycji  $\tau_{pre}$  oraz wybrać korzystny rodzaj materiału do danego obciążenia, ponieważ  $\tau_{pre}$  wyraża różną w czasie wrażliwość materiału na rozciąganie i zmęczenie.

## LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. PN-79/C-89027 *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie cech wytrzymałościowych przy statycznym zginaniu.*
2. M. NOWAK, *Über die gekürzte und beschleunigte Methode der Alterungsversuche an Polyamid 6 unter dem Aspekt der Ermüdungsfestigkeit*, *Plaste und Kautschuk*, **28**, 9, 524-527, 1981.
3. M. NOWAK, *Wykresy kinetyki starzenia politereftalanu etylenowego wzmocnionego włóknem szklanym*, *Arch. Nauki o Materiałach*, **5**, 4, 191-203, 1984.
4. S. KOCANDA, J. SZALA, *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa 1985.
5. S. B. RATNER, *Stale fizyczne tworzywa sztuczne określające jego przydatność użytkową w wyrobach*, *Polimery - Tw. Wielk.*, **26**, 11-12, 417-425, 1981.
6. A. WŁOCHOWICZ, M. LINEK, *Wpływ temperatury i szybkości rozciągania na wytrzymałość włókien poliestrowych o niskim stopniu orientacji*, *Mech. Teoret. Stos.*, **19**, 2, 239-252, 1981.
7. A. WŁOCHOWICZ, *Zmiany fizycznej mikrostruktury włókna poliamidowego wywołane dekohezją zmęczeniową w miejscu zerwania*, *Zesz. Nauk. Politech. Łódzkiej*, **122**, Włókiennictwo, 19, 1969.

8. С. Н. ЖУРКОВ, Э. Е. ТОМАШЕВСКИЙ, *Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения*, Сборник „Некоторые проблемы прочности твердого тела”, АН СССР, 68–75, 1959.
9. PN-81/89034 *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie cech wytrzymałościowych przy statycznym rozciąganiu*.
10. M. NOWAK, *Analityczny opis starzenia poliamidu 6 niszczonego zmęczeniowo*, Mech. Teoret. i Stos., 19, 3, 435–454, 1981.
11. F. GATTO, *L'interpretazione statistica delle prove di fatica*, Alluminio, 24, 6, 543–554, 1955.
12. M. NOWAK, *Wytrzymałość tworzyw sztucznych*, Pol. Wrocławska, Wrocław 1987.
13. M. NOWAK, *Modyfikacja wykresów zmęczenia tworzyw termoplastycznych uwzględniająca efekty starzenia*, Rozpr. Inżyn., 34, 1–2, 97–111, 1986.

## РЕЗЮМЕ

**ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ  
ПРЕДРАСПОЛОЖЕНИЯ ИЛАСТМАСС ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ И ПЕРЕМЕННЫХ  
НАГРУЗОК**

Проведено определение прочности при растяжении и усталостной прочности десяти видов конструкционных пластмасс для различных времен экспозиции образцов. Результаты измерений описаны эмпирическими уравнениями. Построены графики в координатах „время старения — коэффициент усталости”. Абсциссу точки графика с максимальным значением функции называем временем предрасположения и предлагаем его в качестве критерия применения постоянных и переменных нагрузок.

## SUMMARY

**AN ANALYTICAL AND GRAPHICAL METHOD FOR DETERMINING THE  
PREDISPOSITION TIME OF PLASTICS SUBJECTED TO STATIC AND  
VARIABLE LOADS**

Tensile and fatigue strength tests are performed on ten types of structural plastics under various exposure times of the specimens. The measurement results are described by empirical equations. Diagrams of fatigue resistance coefficient versus the time of ageing are plotted, taking into account time-dependent responses of the material to tension and fatigue. Abscissa of the point of maximum of the function is called predisposition time and is proposed to represent the criterion for applying constant or variable loads.

POLITECHNIKA WROCLAWSKA

INSTYTUT MATERIAŁOZNAWSTWA I MECHANIKI TECHNICZNEJ

*Praca została złożona w Redakcji dnia 9 stycznia 1989 r.*