

1. OPISY TRWAŁOŚCI I CHARAKTERYSTYK ZMĘCZENIOWYCH TERMO- PLASTÓW PRZY ZGINANIU.

1. Wstęp.

Złożony wpływ wielu czynników, przy specyficznych własnościach reologicznych i cieplnych polimerów, utrudnia ilościowe oszacowania skutków zmęczenia tych materiałów. Przy obecnym stanie zagadnienia brakuje przede wszystkim ujednoczonych metod badań zmęczeniowych tworzyw i kryteriów dla porównywania wyników badań realizowanych w różnych warunkach. Badania takie nie mogą więc być ograniczone do określania użytkowej, na ogół umownej, wytrzymałości zmęczeniowej tworzyw sztucznych. Przy ich stosowaniu w konstrukcjach wynikałaby stąd konieczność każdorazowego przeprowadzania dużej liczby eksperymentów dla różnych warunków zmęczeniowego obciążania i parametrów obiektów. Dlatego dąży się do wyjaśnienia fizycznych mechanizmów procesu zmęczenia oraz do określania wpływu warunków zewnętrznych na owe mechanizmy. Tworzone na tej drodze modele matematyczne procesu dostarczają coraz bardziej uniwersalnych charakterystyk własności zmęczeniowych tworzyw. Dla określenia użytkowych trwałości zmęczeniowych szczególnie uzasadnionymi mogą być opisy wynikające z tzw. teorii niecek potencjalnych [2,7] dla zrywania i rekombinacji wiązań chemicznych w makromolekułach polimerów. Wywodząca się z tej teorii formuła Żurkowa [1] jest przedstawiona wzorem (1.12). Jednak dotychczasowe opisy zmęczenia tworzone na bazie tej formuły [3,5,6] obarczone są nieścisłościami natury fizycznej. Najogólniej, nieścisłości te polegają na podstawianiu funkcji widma naprężeń w cyklu zmęczeniowym $G(t)$ wprost do wzorów typu (1.12). W pracy [4] wykazano, że funkcja widma naprężeń winna być uwzględniona w wyjściowym równaniu dla spadku liczby czynnych wiązań chemicznych polimeru. W najprostszej postaci może ono być wyrażone zależnością:

$$dW = -W \cdot \dot{\nu}_0 \cdot p dt \quad (1.1)$$

gdzie: W - bieżąca liczba czynnych wiązań, t - czas, $\nu_0 = 10^{13}$ 1/sek - częstość drgań własnych atomów, p - sumaryczne prawdopodobieństwo zrywania i rekombinacji wiązań. Funkcja p wyrażona za $[i]$ wzorem (1.8), oprócz widma naprężeń i temperatury, winna uwzględniać zmiany strukturalnych parametrów U_p i γ_p polimeru w trakcie zmęczenia. Zagadnienie to nie jest jednak dotychczas dostatecznie rozpoznane, próbę jego oceny przedstawiono w rozdziale 4 pracy. Dlatego w pkt. 1.2. przyjęto uproszczony opis trwałości zmęczeniowej polimerów, przedstawiając w pkt. 1.3. wyniki jego doświadczalnej weryfikacji. Dla rozwiązania zagadnienia dokonano korelacji wyników badań zmęczeniowych i badań wytrzymałości długotrwałej statycznej dla 14 termoplastycznych tworzyw krajowej produkcji. Badane tworzywa występujące w podstawowych dla polimerów stanach fizycznych o różnym stopniu krystaliczności struktury. Zastosowanie jednakowych próbek i warunków obciążania zapewnia porównywalność wyników pomiarów dla wszystkich tworzyw.

1.2. Przyjęty opis trwałości zmęczeniowej polimerów.

Uproszczenia zastosowane w tym opisie wynikają przede wszystkim z faktu, że dysponowano charakterystykami zmęczeniowymi dla cyklu wahadkowego i odzerowo-tętniącego. W związku z tym istniała możliwość wykorzystania 4 parametrów wpływu obciążeń zmęczeniowych na przebieg zniszczenia struktury w porównaniu do obciążeń statycznych, dla których opis zniszczenia wyrażono za pomocą 2 własności struktury polimeru. Założono, że po etapie wstępnej zaprawy przyrosty parametrów strukturalnych są stałe i liniowo zależne od wartości naprężeń i parametrów cyklu wymuszenia zmęczeniowego. Założenie to jest uzasadnione tym, że teoria niecek potencjalnych uwzględnia liniowe zależności przyrostów bariery aktywacji wiązań od wartości naprężeń oraz faktem, że analizuje się trwałość na etapie inkubacji zniszczenia zmęczeniowego. Przy tych uproszczeniach, przebieg uszkodzenia struktury polimerów przy zmęczeniu wyrażono zmodyfikowanym w porównaniu do (1.1) równaniem różniczkowym:

$$dW = - W \nu_0 t_z p_z dn \quad (1.2)$$

gdzie: n - liczba cykli cykli zmęczeniowych; t_z - zastępczy okres cyklu zmęczeniowego związany z okresem zmian obciążeń t_0 zależnością:

$$t_z = t_0 \cdot g = t_0/2 \quad (1.3)$$

Funkcja $g = g(t_0, C_n, S_m)$ - uwzględniająca wpływ częstotliwości obciążeń $f_0 = 1/t_0$, szczegółowych warunków prób (C_n) i cech struktury tworzywa (S_m) - jest współczynnikiem intensywności niszczenia wiązań chemicznych przy obciążeniach sinusoidalnie zmiennych w porównaniu do obciążeń statycznych. W dalszym ciągu rozpatrywana będzie również jej odwrotność $z = 1/g$, nazwana wskaźnikiem zmęczeniowego umocnienia struktury polimeru. Wynikająca z uproszczeń stałość prawdopodobieństwa p_z pozwala na całkowanie równania (1.2) i prowadzi, po wyznaczeniu jego stałych, do zależności:

$$W = W_0 \exp(- p_z \nu_0 t_z n) \quad (1.4)$$

gdzie W_0 - wyjściowa liczba czynnych wiązań.

Przyjmując analogiczny jak w hipotezie Żurkowsa warunek wykorzystania żywotności polimeru $W = W_0/e$ (e - podstawa logarytmów naturalnych), można określić liczbę cykli $n = N$ oznaczającą trwałość zmęczeniową, skąd:

$$N = (p_z \nu_0 t_z)^{-1} \quad (1.5)$$

Funkcję sumarycznego prawdopodobieństwa przyrostu zerwanych wiązań chemicznych p_z uzależniono od naprężeń maksymalnych zapisując cykl zmęczeniowy widmem:

$$\sigma(t) = \sigma_g [m + a \sin(\omega t)] \quad (1.6)$$

$$\text{gdzie: } m = \sigma_m / \sigma_g ; a = \sigma_a / \sigma_g \quad (1.7)$$

σ_g , σ_m , σ_a kolejno naprężenia; maksymalne, średnie, amplituda cyklu (analizuje się tylko przypadki, w których naprężenia największe algebraicznie są zarazem bezwzględnie największymi).

Przy obciążeniach statycznych prawdopodobieństwo to dla

naprężenia $\sigma_0 = \text{const}$ określa zależność [1] :

$$p = \exp \left[- (U_p - \gamma_p \sigma_0) / (RT) \right] \quad (1.8)$$

Dla obciążeń zmęczeniowych przyjęto analogiczną zależność:

$$P_z = \exp \left\{ - \left[U_p (1 - \sigma a) - \beta \gamma_p \sigma_g (m + \alpha a) \right] / (RT) \right\} \quad (1.9)$$

Użyte we wzorach (1.8) i (1.9) wielkości oznaczają:

U_p - wyjściowa bariera energetyczna mechanizmu zrywania wiązań przy obciążeniach statycznych, zwana dalej barierą aktywacji zniszczenia przy pełzaniu;

γ_p - parametr strukturalny wpływu naprężenia na obniżenie bariery energetycznej mechanizmu zniszczenia, zwany dalej jednostką kinetyczną zniszczenia przy pełzaniu;

R - stała gazowa, T - temperatura;

σ - współczynnik osłabienia bariery aktywacji zniszczenia przy zmęczeniu pod wpływem cyklicznej składowej naprężenia maksymalnego,

β - parametr strukturalnej intensywności zniszczenia zmęczeniowego,

α - współczynnik oddziaływania amplitudy naprężenia na jednostkę kinetyczną zniszczenia.

Aby uniknąć jawnej zależności trwałości zmęczeniowej od częstotliwości obciążeń wprowadzono wielkość n_0 nazwaną ogólnym współczynnikiem trwałości zmęczeniowej tworzywa przy czym:

$$n_0 = (\gamma_0 t_z)^{-1} \quad (1.10)$$

Podstawiając powyższe do wzoru (1.5) otrzymuje się:

$$N = n_0 \exp \left\{ \left[(1 - \sigma a) U_p - \beta \gamma_p (m + \alpha a) \sigma_g \right] / (RT) \right\} \quad (1.11)$$

Warto porównać zależność (1.11) z opisem żywotności τ_p przy pełzaniu wg Żurkova:

$$\tau_p = \tau_0 \exp (U_p - \gamma_p \sigma_0) / (RT) \quad (1.12)$$

gdzie:

$$\tau_0 = 1/\nu_0 = 10^{-13} \text{ sek.} - \text{okres drgań własnych atomów.}$$

Formuły (1.11) i (1.12) są uzasadnione doświadczalnie o tyle,

że dla większości polimerów charakterystyki trwałości zmęczeniowych i żywotności przy pełzaniu w półlogarytmicznych układach współrzędnych, można z zadowalającym przybliżeniem estymować liniami prostymi bądź ich odcinkami. Aby się o tym przekonać wystarczy dla stałej temperatury T zapisać:

$$\lg N = A_z - B_z \sigma_g \quad (1.13)$$

$$\lg \tau_p = A_p - B_p \sigma_0 \quad (1.14)$$

$$A_z = \lg n_0 + (1 - \sigma_a) U_p / (2,3 RT); \quad B_z = \beta(m + \alpha a) \sigma_p' / (2,3 RT) \quad (1.15)$$

$$A_p = \lg \tau_0 + U_p / (2,3 RT); \quad B_p = \sigma_p' / (2,3 RT) \quad (1.16)$$

Dysponując doświadczalnie uzyskanymi współczynnikami A_p i B_p prostych regresji żywotności przy pełzaniu (rys.1.1), można wyznaczyć wartości wielkości U_p i σ_p' dla polimeru. Następnie, dysponując doświadczalnie uzyskanymi współczynnikami A_z i B_z prostych regresji trwałości zmęczeniowych (rys.1.2) dla 2 przypadków asymetrii cyklu (np: dla wahadłowego jest $m = 0$ i $a = 1$, dla odzerowo-tętniącego jest $a = m = 0,5$), można uzyskać dla opisu zmęczenia parametry strukturalne: $n_0, \sigma, \beta, \alpha$.

W dalszym ciągu pracy parametry te wykorzystano przy ocenie przydatności różnych tworzyw na elementy obciążane zmęczeniowo. Przewiduje się badania możliwości wyrażania poprzez te parametry wpływu na trwałość zmęczeniową takich czynników jak: kształt i wielkość obiektu, postać cyklu i zmienność jego parametrów, częstotliwość obciążeń oraz temperatura. pozwoliłoby to na prognozowanie eksploatacyjnych własności zmęczeniowych gotowych wyrobów z tworzyw w oparciu o badania na próbkach. Na obecnym etapie podstawowe znaczenie praktyczne może mieć wykorzystanie zależności (1.11) bądź (1.13) i (1.15) do określania trwałości (stąd i wytrzymałości) zmęczeniowej tworzyw przy różnej asymetrii cyklu, dla zastosowanych próbek i częstotliwości oraz przy pokojowych temperaturach prób. Należy bowiem pamiętać, że wartości użytych do

opisu zmęczenia wielkości fizycznych i parametrów zależą od warunków eksperymentów przy których zostały wyznaczone. Opis trwałości wzorem (1.11) jest przewidziany dla zakresu tzw. zmęczenia mechanicznego przy względnie słabych i stabilnych efektach samorozgrzewania tworzywa. Praktycznie dotyczy to ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej średnio i wysokocyklowej. Przyjęta interpretacja fizyczna nie pozwala na stosowanie tego opisu dla zmęczenia niskocyklowego, ze złomami przeciążeniowymi i cieplnymi, przy wystąpieniu dużych odkształceń plastycznych. Można natomiast stosować wówczas analogiczne formuły matematyczne dla empirycznego opisu zmęczenia. Zależności (1.11) nie wyjaśnia również, rzadko skądinąd występującego, zjawiska nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej polimerów. Podkreślenia wymaga jednak formalna elastyczność przyjętego opisu trwałości zmęczeniowej. Przy odpowiedniej kombinacji składników strukturalnych zależność (1.11) można różnie przekształcać do postaci np.:

$$N = d \cdot \exp(-c \cdot \sigma); N = d(\sigma, T) \cdot \exp[c(T) \cdot \sigma]; \lg N = d + c/T; (1.17)$$

które są często empirycznie formułowane zarówno dla trwałości zmęczeniowych polimerów jak i ich żywotności przy długotrwałych obciążeniach statycznych.¹

1.3. Metodyka i kryteria oznaczania charakterystyk zmęczeniowych.

Obciążenia zmęczeniowe realizowano na 6-cio gniazdowym stanowisku własnej konstrukcji, zadając amplitudę naprężeń przez zginanie z wymuszeniem kinematycznym oraz naprężenie średnie w cyklu przez rozciąganie próbek wymuszone sprężynami. Badane korelacje i dokonywane dalej oceny własności wymagały zastosowania jednakowych próbek wiósełkowych do zmęczenia, quasistatycznego rozciągania oraz do pełzania, przy którym uzyskano charakterystyki wytrzymałości długotrwałej statycznej (rys.1.1.). Ujednolicone warunki badań obejmują ponadto: częstotliwość $f_0 = 11$ Hz

temperaturę otoczenia $T_0 = 293 \pm 3$ K, pomiar temperatur samowzbudnych ΔT_w za pomocą termopar Cu-Co oraz pomiar momentów gnących i sił rozciągających w miejscu utwierdzenia próbek za pomocą przekładników tensometrycznych. Przy zastosowanych warunkach obciążania, własności reologiczne i samorozgrzewanie się tworzyw powodują zmiany naprężeń w trakcie zmęczenia, na ogół jak na rys. 1.3. Pokazano tam zasadę przyjmowania wartości naprężeń maksymalnych w cyklu do konstrukcji zmodyfikowanych wykresów Wohlera i Haigha. W przebiegu zmęczenia polimerów można wyróżnić 3 etapy : W - wstępnej zaprawy tworzywa, U - ustalonego przebiegu zmęczenia (zwany też, łącznie z "W", etapem inkubacji zniszczenia), Z - rozwoju zniszczenia zmęczeniowego i kształtowania złomu finalnego. Jak wykazują badania, na tym ostatnim etapie polimery na ogół istotnie tracą nośność konstrukcyjną i zmieniają wyjściowe własności użytkowe wykazując między innymi : spadek modułu sprężystości, wzrost kruchości, silne nieodwracalne uszkodzenia struktury. Dlatego liczbę cykli do końca etapu inkubacji zniszczenia przyjmowano jako efektywną trwałość zmęczeniową N_e tworzywa przy umownym poziomie naprężenia σ_{max} . Odpowiadają temu kryteria zniszczenia praktycznego opisane w tab.1.1. gdzie zestawiono także występujące postacie i przyjmowane kryteria zniszczenia końcowego.

Jakkolwiek trwałość na etapie rozwoju zniszczenia zmęczeniowego (N_k) nie była uwzględniana przy konstrukcji charakterystyk zmęczeniowych to jednak zachowanie się tworzywa na tym etapie należy uwzględniać przy przyjmowaniu współczynnika bezpieczeństwa zmęczeniowego. Dlatego w pracy (rozdz. 2 i 3) stosuje się wskaźnik nazwany względną trwałością podkrytyczną n_k przy czym :

$$n_k = N_k/N_e \quad (1.18)$$

W tab. 1.2. zestawiono cechy fizyczne badanych tworzyw oraz rodzaje wykazywanych przez nie charakterystyk wytrzymałościowych przy zmęczeniu, doraźnym rozciąganiu i zginaniu

próbek z naciętymi korbami V.

Oznaczone tam stany fizyczne termoplastów określono wg temperatur zeszklenia T_g [8] i wykresów quasistatycznego rozciągania tworzyw (rys. 2.1). Przyjęty w tab. 1.3. podział stanów fizycznych lepiej uwzględnia rodzaje zachowań się termoplastów przy zmęczeniu i pękaniu niż podziały dotychczasowe [2,7]. Najogólniej własności i zachowanie się termoplastów przy obciążeniach zmęczeniowych charakteryzują typy znormalizowanych (odniesionych do wytrzymałości doraźnej) wykresów Wohlera przedstawione na rys. 1.4. Szczegółowe wartości wytrzymałości zmęczeniowych poszczególnych tworzyw podano w pkt. 2.4. W tym miejscu ograniczono się do podania w tab. 1.2, charakterystycznych dla poszczególnych stanów fizycznych, przedziałów wartości parametrów przyjętego opisu trwałości zmęczeniowych tworzyw. Nie wykazano wartości U_p i σ (pkt. 1.2) ponieważ ich różnice dla poszczególnych tworzyw są niewielkie i przypadkowe ($U_p = 29,7 \div 32,9$ kcal/mol, $\sigma = 0,01 \div 0,08$) dlatego trudno je analizować przy towarzyszącej badaniom dokładności pomiarów. Jakościowy wpływ parametrów opisu trwałości na wykresy zmęczeniowe Wohlera i Haigha zilustrowano na rys. 1.4.

1.4. Wnioski

a) Badane tworzywa wykazały w przybliżeniu stałą wartość os 30 kcal/mol bariery aktywacji zniszczenia U_p przy długotrwałych obciążeniach statycznych-mało zmieniającą przy obciążeniach zmęczeniowych -wobec $70 \div 130$ kcal/mol energii aktywacji wiązań chemicznych rozpatrywanych termoplastów.

Wobec przyjętej interpretacji procesów może to świadczyć o tym, iż przy obciążeniach długotrwałych w szerokim zakresie stanów fizycznych działa pewien wspólny do wielu polimerów mechanizm zniszczenia ich struktury molekularnej. Wartości U_p pozwalają sądzić, że tym dominującym mechanizmem jest albo zrywanie wiązań fizycznych (międzycząsteczkowych), albo przebiegające niejednorodnie

w strukturze polimeru zrywanie wiązań chemicznych, albo też sprzężone występowanie obu tych zjawisk. Należy podkreślić, że wobec kryterium trwałości efektywnej (tak przy zmęczeniu jak i przy pełzaniu), powyższe spostrzeżenie dotyczy mechanizmów inkubacji zniszczenia tworzyw. Nie dotyczy zaś mechanizmów intensywnego rozwoju uszkodzeń struktury, które jak wskazują wartości względnej trwałości podkrytycznej i rodzaje złomów, są istotnie różne dla poszczególnych tworzyw.

b) Wartości ogólnego współczynnika trwałości zmęczeniowej n_0 , a tym samym wskaźnika zmęczeniowego umocnienia struktury ρ (wzory 1.3 i 1.10) są najwyższe dla tworzyw występujących w stanach szklistym lepkosprężystym i kauczukopodobnym lepkosprężystym, obniżają się natomiast zarówno dla tworzyw w stanie szklistym kruchym jak i kauczukopodobnym. Może wynikać z dwóch powodów. W polimerach występujących w pobliżu temperatury zeszklenia (stany SL i KL) zjawiska relaksacyjne zachodzą z większą intensywnością niż w przypadkach gdy różnice między temperaturą eksperymentu a temperaturą podstawowej przemiany relaksacyjnej polimeru są duże. Zaś zjawiska relaksacyjne umożliwiające lokalną orientację makromolekuł, blokowanie rozwoju i zabliznianie nieciągłości struktury powodują umocnienie tworzywa. Po drugie, badane tworzywa występujące w stanach SL i KL cechuje częściowo-kryształiczna struktura nadmolekularna. Wynikająca stąd niejednorodność własności sąsiadujących faz może sprzyjać efektom umocnienia szczególnie na skutek wstępnej zaprawy polimeru. Przede wszystkim istnieją wówczas korzystne warunki blokowania rozwoju mikrouszkodzeń struktury tworzywa.

c) Dla tworzyw o coraz niższej temperaturze zeszklenia względem temperatury badań, rosną wartości parametru γ_p wpływu naprężenia na obniżenie bariery energetycznej mechanizmów zniszczenia przy pełzaniu. Jest to spójne z dotychczasowymi ustaleniami odnośnie wpływu temperatury na zmiany energii wiązań chemicznych i fizycznych.

Natomiast parametr strukturalnej intensywności zniszczenia zmęczeniowego β , wówczas monotonicznie maleje. Na obecnym etapie badań wyjaśnia się to wzrostem giętkości molekularnej polimeru i wynikającym stąd spadkiem efektów koncentracji naprężeń wokół nieciągłości struktury. Współczynnik α oddziaływania amplitudy naprężenia na jednostkę kinetyczną zniszczenia wykazuje najwyższe wartości dla bezpostaciowych tworzyw w stanie szklistym kruchym, najniższe dla częściowo krystalicznych w stanie szklistym lepkosprężystym, rosnące następnie dla wysokokrystalicznych tworzyw w stanie kauczukopodobnym.

Wyjaśniając taki efekt przyjmuje się, że pewien stopień niejednorodności struktury może ułatwiać dostosowywanie się ugrupowań nadmolekularnych polimeru do zmiennego pola naprężeń a przez to powiększać korzystne oddziaływanie wstępnej zaprawy tworzywa. Jeśli temu towarzyszą warunki sprzyjające zjawiskom relaksacyjnym na granicach faz (np. temperatura) to sumarycznie obniżają się efekty niszczącego oddziaływania cyklicznej składowej naprężeń w strukturze polimeru.

Literatura

- [1.] G.M.Bartieniev, Ju.W.Zeleniev - Relaksacjonnyje Jawlenija w Polimerach - Izdatielstwo "Chimija", Leningrad 1972.
- [2.] J.D.Ferry - Viscoelastic Properties of Polymers, New York - London, J.W. 1961.
- [3.] W.Je.Gul, W.N.Kulezniew - Struktura i Mechničeskije Swojstwa Polimerov - Izdatielstwo "Wysšaja Škoła", Moskwa 1972.
- [4.] A.Litak - Ocena własności zmęczeniowych wybranych tworzyw sztucznych - Praca doktorska w redakcji końcowej, Politechnika Krakowska
- [5.] M.Nowak, G.Nowicka, J.Zawadzki - Fenomenologiczna ocena porównawcza wpływu starzenia poliamidu na jego trwałość zmęczeniową - Prace Naukowe IMiMT Politech. Wrocław. nr 25, Studia i Materiały nr 16, Wrocław 1974.
- [6.] S.B.Ratner - O kryteriach samorozgrzewania i złomu tworzyw termoplastycznych przy cyklicznych obciążeniach - Prace Naukowe IMiMT Politech. Wrocław. nr 20, Studia i Materiały 12, Wrocław 1974.
- [7.] I.M.Ward - Mechaniczne Własności Polimerów Jako Tworzyw Konstrukcyjnych - PWN, Warszawa 1975.

- [8.] Praca zbiorowa - Katalog "Własności Konstrukcyjne i Eksploatacyjne Krajowych Tworzyw Termoplastycznych" - Dąbrowa Górnicza, 1979.

Tab.1.1. Zastosowane kryteria zniszczenia zmęczeniowego.

A. Zniszczenia praktycznego (trwałości efektywnej).

a) Zasadnicze

- 1z- Złom próbki - w przypadku zniszczenia kruchego nie poprzedzonego innymi dalej wymienionymi objawami trwającymi dłużej niż 3 % czasu życia próbki.
- 2z- Początek przyspieszonego spadku naprężeń - po ich ustalonym przebiegu poprzedzający: propagację szczeliny magistralnej, ustalenie naprężeń na niższym poziomie (przegub plastyczny), przewężenie próbki.
- 3z- Początek spadku temperatury samowzbudnej - przy równoczesnym powstaniu siatki mikrouszkodzeń tworzywa.

b) Pomocnicze - stosowane przy rozstrzygnięciu wątpliwości w ocenie wystąpienia kryteriów zasadniczych.

- 1p- Powstanie widocznych pęknięć na powierzchni próbki.
- 2p- Zmiana dotychczas ustalonego przebiegu temperatury samowzbudnej; w kierunku jej spadku (na ogół w zakresie zmęczenia mechanicznego) bądź wzrostu (często w zakresie zmęczenia cieplnego).
- 3p- Zbielenie bądź zmatowienie tworzywa.
- 4p- Zmiana własności fizykomechanicznych tworzywa - w szczególności wzrost jego kruchości.

B. Zniszczenia końcowego

- 1k- złom próbki przy podkrytycznej propagacji szczeliny,
- 2k- przewężenie próbki równomiernie lub z szykowaniem,
- 3k- powstanie przegubu plastycznego.

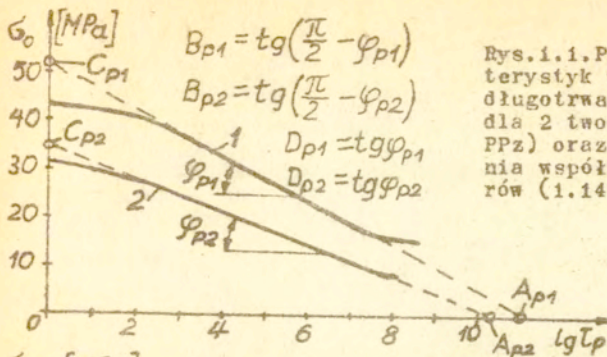
Tab.1.2. Stany fizyczne i struktura oraz odpowiadające im zakresy wartości parametrów opisu trwałości zmęczeniowej termoplastów.

Uwagi: -Typy wykresów rozciągania oznaczono wg rys.2.1.
-OS - oznaczenia stanów fizycznych w tab.1.3.

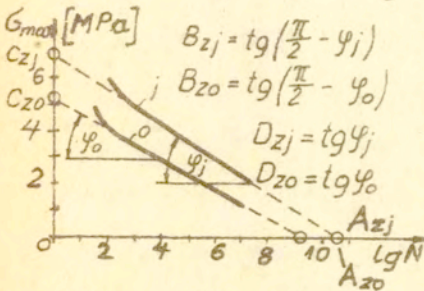
Wykres roz.	Stan fizyczny i jego podstan	Struktura nadmolekularna	γ_p $10^{-27} m^3$	$lg n_0$	β	α
1,2	SK Szklisty	Bezpostaciowa	1,0-1,3	~-13,0	1,1-1,8	0,6-1,2
3,4	SW Szklisty wymuszonej elastyczności		1,3-1,5	~-13,0	0,8-1,1	0,06-0,3
4,5	SL Szklisty lepko-sprężysty	Częściowo krystaliczna (30-55)%	1,5	~-10,6	1,1	0,1
6	KL Kauczukopodobny lepko-sprężysty	Wysoko krystaliczna (65-90)%	1,6-1,9	~-10,5	1,0-1,2	0,04-0,2
7	K Kauczukopodobny		2,5-3,3	~-11,0	1,0-1,1	0,01-0,2
8			4,7-7,5	~-12,0	0,6-0,9	0,2-0,35

Tab.1.3. Cechy fizyczne i typy charakterystyk wytrzymałościowych termoplastów: (WR)-wykresy rozciągania wg rys.2.1, (RP)-rodzaje pęknięcia wg rys.3.3.1, (WZ)-wykresy Wöhlera wg rys.1.4, (X_k)-orientacyjny stopień krystaliczności (podano większe od 10%).

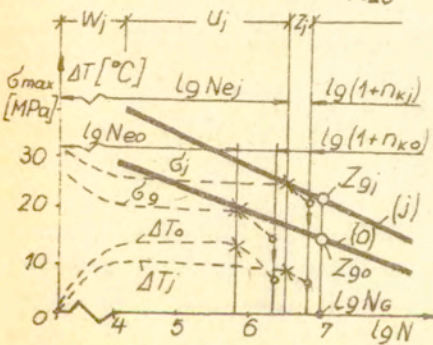
Nazwa tworzywa i jego odmiana		Sym-bol	Lp.	Stan fiz.	X_k %	WR	RP	WZ
Poli- metakrylan metylu	wtryskiwany	PMW	1	SK	-	1	K	1
	plytowy	PMp	2	SK	-	1	K	1
	lotniczy	PMl	3	SK	-	1	K	1
Polichlorek winylu twardy		PCW	4	SK	-	2	Q	1
Polistyren zwykly		PSo	5	SK	-	2	Q	2
Polistyren wysokoudarowy		PSw	6	SK	-	2	Cn	2
Kopolimer styrenu i butadienu		KSB	7	SW	-	4	Co	3
Poli- amid PA 6	zwykly, starzony	T-27	8	SL	40	6	B	4
	drobnokrystaliczny	T-30	9	SL	40	6	B	4
	blokowy	T-B	10	SL	35	5	Co	4
Polipropylen zwykly		PP	11	KL	75	7	B	5
Kopolimer propylenu i etylenu		KEP	12	KL	60	7	Np	5
Polietylen malej gęstości		PE	13	KP	65	8	Np	5
Policzterofluoroetylen		PFE	14	KP	85	8	Np	5
Kopolimer na bazie acetalu		KPD	15	SW	50	3	Cn	3
PA6 wzmoc. włóknem szklanym		I-25	16	SW		3	Q	4



Rys. 1.1. Przykłady charakterystyk wytrzymałości długotrwałej przy pełzaniu dla 2 tworzyw (1-T27, 2-PP2) oraz zasada określania współczynników do wzorów (1.14) i (1.16).

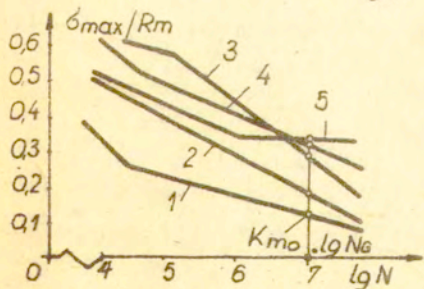


Rys. 1.2. Określenie współczynników regresji wykresów Wöhlera do wzorów (1.13) i (1.15).



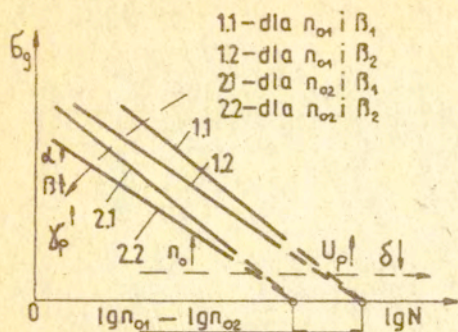
Rys. 1.3. Przykład wykresów Wöhlera w cyklu wahadłowym (o) i odzerowo-tętniącym (j) oraz zasada określania trwałości zmęczeniowych.

σ_0 i σ_j - zmiany naprężeń maksymal. w cyklu
 ΔT_0 i ΔT_j - przyrosty temperatur w próbie
 N - trwałości zmęczeniowe
 W, U, Z - etapy zmęczenia wg p. 1.3.



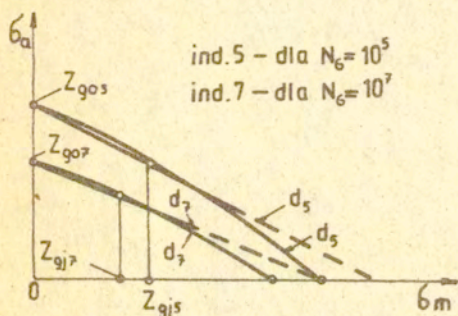
Rys. 1.4. Typy znormalizowanych wykresów Wöhlera termoplastów przy wahadłowym zginaniu w zakresie zmęczenia średniocyklowego i wysokocyklowego.

N_g - graniczna liczba cykli
 K_{mo} - wg wzoru (2.1).

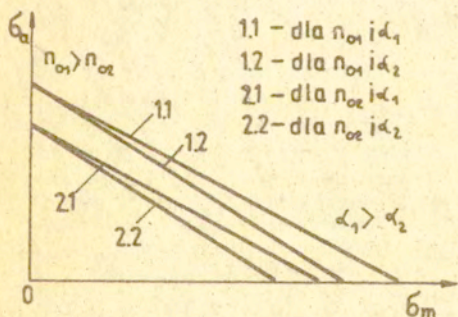


- a) Wpływ n_0 i β na wykresy Wöhlera przy tych samych: U_p , γ_p , δ i α .
Wpływ:
 U_p - analogiczny jak n_0
 δ - przeciwnie, γ_p i α - analogiczny jak β .

n_{01} n_{02} , β_1 β_2



- b) Wykresy Haigha uproszczone na podstawie doświadczeń (d) i określone w oparciu o zależność (1.11) - (t).



- c) Wpływ n_0 i α na uproszczone (zlinearyzowane) wykresy Haigha przy tych samych: N_G , U_p i δ , (β i γ nie wpływają na te wykresy).

Rys. 1.5. Odzworowanie wpływu parametrów strukturalnych opisu trwałości (umocnienia i zniszczenia zmęczeniowego) na użytkowe charakterystyki wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera i Haigha dla termoplastów.