

JAN GODZIMIRSKI^{1)*}, ANDRZEJ KOMOREK²⁾, MAREK ROŚKOWICZ¹⁾

Trwałość zmęczeniowa tworzywa Epidian 57

Streszczenie — Trwałość zmęczeniowa tworzyw adhezyjnych jest istotna ze względu na problem trwałości zmęczeniowej konstrukcyjnych połączeń klejowych. Obiektem badań była kompozycja Epidian 57 utwardzana za pomocą trietylenotetraaminy dwiema metodami: 7 dni w temperaturze otoczenia lub 1 h w temp. 60 °C. Badaniom poddawano próbki cylindryczne obciążane harmonicznym cyklem naprężeń ściskających. Określono przyrost temperatury spowodowany zmiennym obciążeniem oraz porównano trwałość zmęczeniową tworzywa w zależności od sposobu utwardzania. Zmierzono odkształcenia badanego materiału pod wpływem obciążenia zmęczeniowego w zależności od liczby cykli. Przeprowadzono analizę tych odkształceń za pomocą modelu Burgersa. Wykazano, że istotne znaczenie w procesie zniszczenia zmęczeniowego badanego tworzywa ma jego pełzanie w temperaturze otoczenia.

Słowa kluczowe: połączenia klejowe, tworzywa adhezyjne, trwałość zmęczeniowa, zniszczenie zmęczeniowe.

FATIGUE LIFE OF EPIDIAN 57 PLASTIC

Summary — Fatigue lives of adhesive plastics are important due to fatigue lives of constructional glue joints. Epidian 57 composition hardened with triethylenetetramine in two ways: either 7 days at ambient temperature or 1 hour at temp. 60 °C was the subject of research. Cylindrical samples loaded with harmonic cycles of compressive stresses were tested. Temperature increase caused by variable loading was determined and fatigue lives of plastics were compared dependently on hardening method. The strain of tested material under fatigue loading, dependently on the number of cycles, was measured. An analysis of strain of viscoelastic material under fatigue loading was done. It was demonstrated that the creep at ambient temperature is very important for the process of fatigue failure of the material tested.

Key words: glue joints, adhesive plastics, fatigue life, fatigue failure.

Tworzywa adhezyjne (kleje, kity klejowe, syciwa, uszczelniacze) znajdują szerokie zastosowanie w budowie oraz naprawach maszyn, pojazdów i statków powietrznych [1, 2]. Konstrukcyjne zastosowanie tych materiałów wymaga, między innymi, znajomości ich odporności na zmienne obciążenia. Konstrukcje klejone charakteryzuje wysoka trwałość zmęczeniowa, jeśli spoiny klejowe są obciążone w ograniczonym zakresie [3, 4]. Znana jest wysoka odporność zmęczeniowa połączeń mieszanych: klejowo-nitowych i klejowo-zgrzewanych [5]. Jednak „czyste” połączenia klejowe charakteryzują się ograniczoną wytrzymałością zmęczeniową [6], która nie wykazuje jednoznacznej korelacji z wytrzymałością doraźną takich połączeń. Trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych zależy od właściwości tworzywa adhezyjnego, z którego wykonano spoinę klejową.

Celem tej pracy było poznanie, na przykładzie Epidianu 57, mechanizmu niszczenia zmęczeniowego utwardzalnego tworzywa wielkocząsteczkowego.

¹⁾ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Techniki Lotniczej, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa.

²⁾ Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania, ul. Szkoły Podchorążych Lotnictwa 4, 08-521 Dęblin.

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Obiektem badań była kompozycja epoksydowa Epidian 57 utwardzana trietylenotetraaminą (TETA). Kompozycja i utwardzacz były produktami handlowymi Zakładów Chemicznych „Organika-Sarzyna” SA. Utwardzanie wykonywano dwiema metodami: w temperaturze otoczenia (ok. 20 °C) w ciągu 7 dni lub 1 h w temp. 60 °C. W obu przypadkach stosowano 10,5 cz. mas. TETA na 100 cz. mas. kleju.

Metody badań

Właściwości mechaniczne

Miarą kohezji — siły spójności wewnętrznej tworzywa — może być jego wytrzymałość doraźna określana w statycznej próbie rozciągania. W wypadku klejów powstaje problem związany z tym, że wykonane z nich próbki poddane rozciąganiu nie osiągają poziomu odkształceń występujących w cienkich spoinach. W związku z tym krzywe zależności naprężenia od odkształcenia wyznaczano w próbach ściskania próbek walcowych

o średnicy $\Phi = 12,5$ mm i długości $l = 25$ mm, w których można uzyskać znacznie większy poziom odkształceń [7]. Badania prowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej Instron stosując prędkość posuwu równą 2 mm/min. Próby takie pozwalają określić nie tylko wytrzymałość kohezyjną tworzywa, ale również wartość modułu sprężystości wzdłużnej badanego materiału. Jak wiadomo [1, 8] wytrzymałość połączeń klejowych obciążanych na ścinanie (połączeń najczęściej stosowanych) w istotny sposób zależy od tych właściwości mechanicznych spoiny.

Trwałość zmęczeniowa

Badania obejmowały określenie wpływu częstotliwości zmiany obciążenia na przyrost temperatury tworzywa Epidian 57 oraz porównanie trwałości zmęczeniowej tworzywa utwardzanego dwiema metodami.

Badania przyrostu temperatury tworzywa przeprowadzono na próbkach utwardzanych w temp. 60 °C (1 h). Próbkę miały kształt cylindrów o średnicy $\Phi = 12,4$ mm i dwu różnych długościach $l = 21,7$ oraz 31,5 mm. W środku długości próbek wzdłuż ich osi zamocowano (wklejono) termopary. Próbkę obciążano z różną częstotliwością identycznym obciążeniem — jednostronnym ściskającym o wartości średniej $F_m = 1,6$ kN i amplitudzie $F_a = 1,2$ kN. W trakcie badań rejestrowano przyrost temperatury w funkcji liczby cykli obciążeń.

Próbki do badań wpływu metody utwardzania na trwałość zmęczeniową również miały kształt cylindrów o średnicy $\Phi = 12,4$ mm i długości $l = 25$ mm. Obciążano je cyklem odzerowo-tętniącym o wartości obciążenia maksymalnego równej 0,35 maksymalnego obciążenia uzyskanego w próbie statycznego ściskania (zasadniczo, jednostronnym o małej wartości, równej najczęściej 0,1 kN wartości obciążenia minimalnego). W celu ograniczenia nagrzewania się materiału stosowano częstotliwość cyklu 20 Hz.

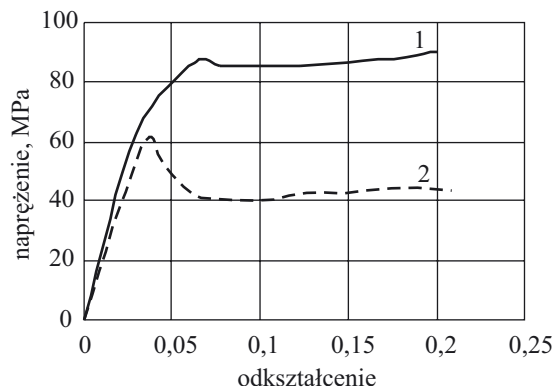
Odkształcenia próbek pod obciążeniem zmęczeniowym

Cylindryczną próbkę o średnicy $\Phi = 12,4$ mm i długości $l = 25$ mm odlaną z tworzywa Epidian 57 utwardzanego w temp. 60 °C obciążono liczbą 76 000 cykli w zakresie 0,2–5 kN (wartość maksymalna obciążenia równa około 0,5 obciążenia niszczącego w badaniach statycznych). W trakcie badań po każdym tysiącu cykli rejestrowano położenie ruchomej trawersy maszyny wytrzymałościowej przy maksymalnej i minimalnej wartości obciążenia cyklu zmęczeniowego.

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Właściwości mechaniczne

Wyniki prób ściskania tworzywa utwardzanego dwiema metodami przedstawiono na rys. 1. Stwierdzono, że właściwości mechaniczne kleju Epidian 57 istotnie



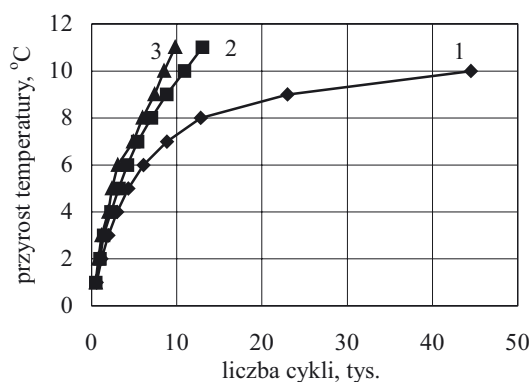
Rys. 1. Krzywe ściskania kleju Epidian 57 utwardzanego w temp. 60 °C w czasie 1 h (1) oraz utwardzanego 7 dni w temperaturze otoczenia (2)

Fig. 1. Compression curves of Epidian 57 glue, hardened at temp. 60 °C for 1 hour (1) or for 7 days at ambient temperature (2)

zależą od sposobu utwardzania. Klej utwardzany w temp. 60 °C w porównaniu z klejem utwardzanym w temperaturze otoczenia (ok. 20 °C) charakteryzuje większa wytrzymałość na ściskanie wynosząca ok. 85 MPa oraz większa wartość modułu sprężystości rzędu 2000 MPa.

Trwałość zmęczeniowa

Wyniki badań zmiany temperatury tworzywa obciążanego zmęczeniowo przedstawiono na rys. 2. Stwierdzono istotny przyrost temperatury zależny zarówno od częstotliwości, jak i od liczby cykli. Wykonane dla porównania pomiary temperatury spoin, w których spajano elementy ze stopu aluminiowego klejem Epidian 57, wykazały nieistotne przyrosty temperatury rzędu jednego stopnia, nawet po zastosowaniu większych częstotliwości obciążeń.



Rys. 2. Zależność przyrostu temperatury w próbce o długości 21,7 mm od liczby cykli i częstotliwości: 1 — 20 Hz, 2 — 30 Hz, 3 — 35 Hz

Fig. 2. Dependence of temperature rise in the sample of length 21.7 mm on number of cycles and frequency: 1 — 20 Hz, 2 — 30 Hz, 3 — 35 Hz



Rys. 3. Odształcenia cylindrycznej próbki Epidianu 57 utwardzonego jednostopniowo w temperaturze otoczenia spowodowane obciążeniem cyklicznym

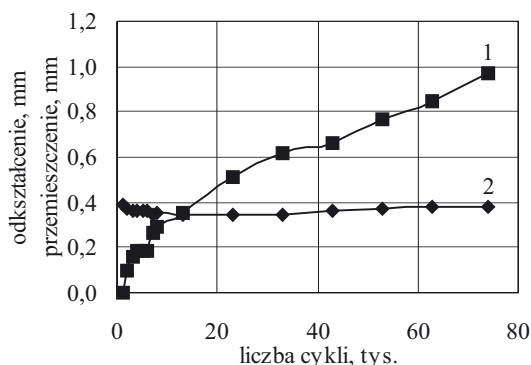
Fig. 3. Strain of cylindrical sample made of Epidian 57, one-step hardened at ambient temperature, caused by cyclic loading

Badania wykazały również istotną różnicę trwałości zmęczeniowej badanego tworzywa w zależności od sposobu jego utwardzania. Próbki utwardzane w temp. 60 °C przetrwały po 2 500 000 cykli, a utwardzane w temperaturze otoczenia jedynie 13 395 do 15 829 cykli.

Zniszczenie próbek utwardzanych w temperaturze otoczenia polegało na narastaniu trwałych odkształceń w połowie ich wysokości w płaszczyźnie występowania maksymalnych naprężeń stycznych (rys. 3). Wydaje się, że przyczyną uszkodzenia próbek utwardzanych w temperaturze otoczenia nie było zmęczenie, a pełzanie spowodowane sumującym się działaniem obciążenia i podwyższeniem temperatury próbek obciążonych cyklicznie. Potwierdzałoby to niską odporność na pełzanie Epidianu 57 utwardzanego jednostopniowo w temperaturze otoczenia [9].

Odształcenia próbek pod obciążeniem zmęczeniowym

Wykonane pomiary pozwoliły określić wartość zakresu odkształceń (podwojonej amplitudy odkształceń)



Rys. 4. Przemieszczenia trawersy (zmiana wysokości próbki) (1) i zmiana zakresu cyklicznych odkształceń próbki (2) w zależności od liczby cykli w trakcie badań zmęczeniowych tworzywa Epidian 57

Fig. 4. Cross-bar dislocation (sample height change) (1) and change of the range of cyclic strains of a sample (2), dependently on the number of cycles, during fatigue tests of Epidian 57 plastic



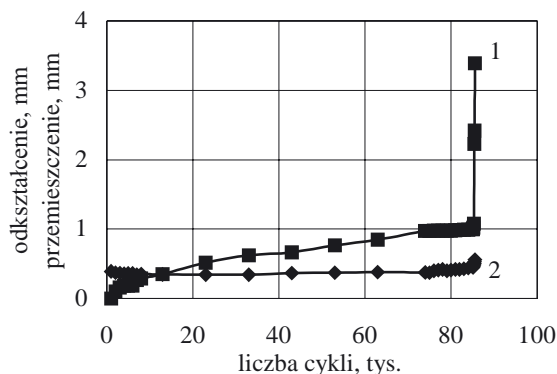
Rys. 5. Charakter zniszczenia zmęczeniowego próbki wykonanej z Epidianu 57 utwardzanego w czasie 1 h w temp. 60 °C, obciążanej cyklem 0,2–5 kN (o wartości maksymalnej równej 0,5 wytrzymałości na ściskanie)

Fig. 5. Fatigue failure nature of the sample made of Epidian 57, hardened at temp. 60 °C for 1 hour, loaded with 0.2–5 kN cycle (maximum value equal to 0.5 of compression strength)

badanej próbki, jak również zmianę jej wysokości wynikającą z przemieszczania się trawersy. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na rys. 4.

Stwierdzono niewielką zmianę amplitudy odkształceń pod obciążeniem zmęczeniowym oraz ciągle narastanie odkształceń badanej próbki, charakterystyczne dla zakresu pełzania nieustalonego. Próbkę tę poddano dalszym badaniom zmęczeniowym przy identycznym cyklu obciążeniowym. Po dodatkowych 11 570 cyklach obciążeniowych próbka uległa uszkodzeniu, które polegało na jej trwałym odkształceniu i wystąpieniu pęknięć obwodowych (wzdłuż tworzącej), co pokazano na rys. 5. Na rys. 6 przedstawiono połączone wyniki obu etapów badań zmęczeniowych tworzywa Epidian 57.

Druga próbka obciążana zmęczeniowo w zakresie 0,4–5 kN uległa podobnemu zniszczeniu po 76 869 cyklach obciążeniowych. Zakres cyklicznych odkształceń próbki wynosił około 0,0146 (0,365 mm), a zmiana jej

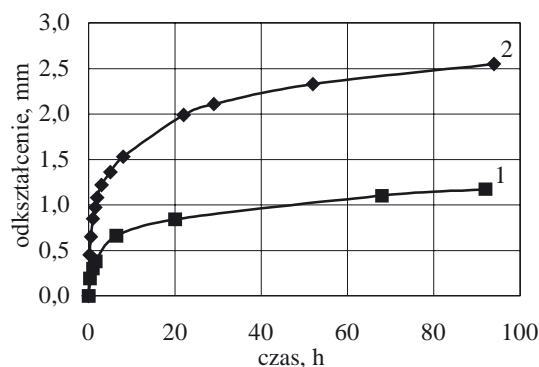


Rys. 6. Przemieszczenia trawersy (zmiana wysokości próbki) (1) i zmiana zakresu cyklicznych odkształceń próbki (2) w zależności od liczby cykli w całym zakresie badań zmęczeniowych kleju Epidian 57

Fig. 6. Cross-bar dislocation (sample height change) (1) and change of the range of cyclic strains of a sample (2), dependently on the number of cycles, during fatigue tests of Epidian 57 glue

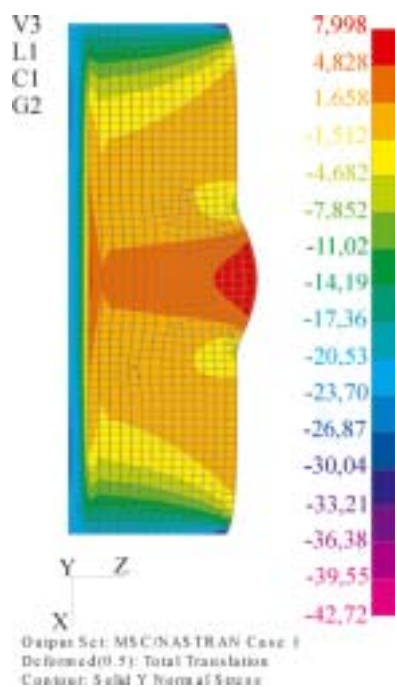
wysokości w zakresie liczby cykli obciążeniowych 0—75 000 wyniosła 0,774 mm.

Przeprowadzone badania pozwalają sądzić, że w mechanizmie zniszczenia zmęczeniowego badanych materiałów, a więc i wykonanych z nich spoin klejowych, istotną rolę odgrywa pełzanie pod wpływem obciążenia cyklem zmęczeniowym. W celu potwierdzenia tezy, że pod obciążeniem stosowanym w badaniach zmęczeniowych w temperaturze otoczenia (20—23 °C) może wystąpić pełzanie tworzywa Epidian 57, przeprowadzono odpowiednie badania. Próbkę wałeczkową obciążano



Rys. 7. Krzywe pełzania Epidianu 57 w temperaturze otoczenia (20—23 °C) (1) i 35 °C (2) pod wpływem naprężeń ściskających o wartości ok. 40 MPa

Fig. 7. Creep curves of Epidian 57 at ambient temperature (20—23 °C) (1) and 35 °C (2) under compression stresses about 40 MPa



Rys. 8. Rozkład naprężeń obwodowych w przekroju próbki wałeczkowej odkształconej na skutek pełzania

Fig. 8. Circumferential stresses distributions in a section of cylindrical sample deformed as a creep result

siłą 5 kN i mierzono jej narastające w czasie odkształcenia w temperaturze otoczenia oraz w temp. 35 °C. Uzyskane rezultaty pomiaru przedstawiono na rys. 7.

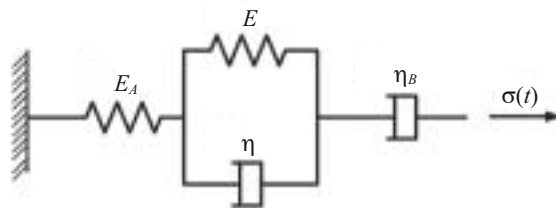
Eksperyment potwierdził pełzanie badanego tworzywa w temperaturze otoczenia oraz wyraźnie szybsze pełzanie w temp. 35 °C.

Analiza naprężeń w próbce wałeczkowej ściskanej przeprowadzona metodą elementów skończonych (MES) [7] wykazała, że rozkład naprężeń w materiale jest w przybliżeniu równomierny, a naprężenia obwodowe są praktycznie równe zero. W związku z tym należy sądzić, że powstanie pęknięć obwodowych w próbkach obciążonych zmęczeniowo było wynikiem zmiany kształtu próbek na skutek pełzania, a zmiana kształtu spowodowała powstanie naprężeń obwodowych.

W celu sprawdzenia tej tezy wykonano model numeryczny próbki odkształconej plastycznie — kształt odkształcenia przyjęto na podstawie pomiarów odkształceń rzeczywistych. Wykonane obliczenia potwierdziły (rys. 8), że odkształcenie spowodowane pełzaniem powoduje powstanie naprężeń obwodowych dodatnich (rozciągających). Ich wartość jest sześciokrotnie mniejsza od wartości maksymalnych naprężeń ujemnych (ściskających). Wynika z tego, że badane tworzywo ulega dekohezji pod wpływem naprężeń normalnych dodatnich.

Analiza odkształceń tworzywa

Tworzywa wielkocząsteczkowe wykazują właściwości lepkosprężyste. Fizycznym modelem lepkosprężystości liniowej może być model Burgersa przedstawiony na rys. 9.



Rys. 9. Model Burgersa lepkosprężystości liniowej (E_A , E , η_B i η — współczynniki)

Fig. 9. Burgers' model of linear viscoelasticity (E_A , E , η_B and η factors)

Odształcenie ciała lepkosprężystego jest funkcją naprężeń, czasu i właściwości fizycznych materiału określonych współczynnikami lepkosprężystości, których znaczenie zobrazowano na rys. 9. Wartości tych współczynników wyliczono według metody opisanej w pracy [9], wykorzystując wyznaczoną krzywą pełzania Epidianu 57 w temperaturze otoczenia (rys. 7). W przypadku tworzywa utwardzanego w temp. 60 °C miały one wartości:

$$E_A = 2000 \text{ MPa}$$

$$\eta_B = 842 \, 110 \, 000 \text{ MPa} \cdot \text{s}$$

$$E = 1266 \text{ MPa}$$

$$\eta = 23\,907\,000 \text{ MPa} \cdot \text{s}$$

Odształcenia sprężyny umieszczonej w analizowanym modelu szeregowo wynikają z prawa Hooke'a:

$$\varepsilon = \frac{\sigma(t)}{E_A} = \frac{\sigma_m + \sigma_a \sin(v \cdot t)}{E_A} \quad (1)$$

gdzie: σ_m — średnie naprężenie cyklu zmęczeniowego, σ_a — amplituda cyklu zmęczeniowego, v — częstotliwość cyklu, t — czas.

Odształcenia tłumika umieszczonego szeregowo w analizowanym modelu można wyznaczyć z równania:

$$\sigma_m + \sigma_a \sin(v \cdot t) = \eta_B \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

Odształcenia te opisuje zależność:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_m \cdot t - \sigma_a \frac{\cos(v \cdot t)}{v}}{\eta_B} \quad (3)$$

W modelu Kelvina-Voighta, składającego się ze sprężyny i tłumika umieszczonych równolegle, odkształcenia obu elementów są identyczne, a całkowite naprężenie jest sumą naprężeń sprężyny i tłumika:

$$\sigma_m + \sigma_a \sin(v \cdot t) = \sigma_s + \sigma_t \quad (4)$$

Po uwzględnieniu zależności opisujących naprężenia sprężyny i tłumika przybierze ono postać:

$$\sigma_m + \sigma_a \sin(v \cdot t) = E \cdot \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (5)$$

Rozwiązanie równania (5) ma postać:

$$\varepsilon = C_1 \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right) + \frac{\sigma_m v^2 \eta^2 + \sigma_a E^2 \sin(v \cdot t) - \sigma_a E \cdot v \cdot \eta \cos(v \cdot t)}{E(E^2 + v^2 \eta^2)} \quad (6)$$

Stałą C_1 można obliczyć z warunku początkowego, z którego wynika że dla $t = 0$ $\varepsilon = 0$:

$$C_1 = \frac{\sigma_a E \cdot \eta \cdot v - \sigma_m \eta^2 v^2}{E(E^2 + \eta^2 v^2)} \quad (7)$$

Odształcenia opisuje więc zależność:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_a E \cdot \eta \cdot v - \sigma_m \eta^2 v^2}{E(E^2 + v^2 \eta^2)} \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right) + \frac{\sigma_m v^2 \eta^2 + \sigma_a E^2 \sin(v \cdot t) - \sigma_a E \cdot v \cdot \eta \cos(v \cdot t)}{E(E^2 + v^2 \eta^2)} \quad (8)$$

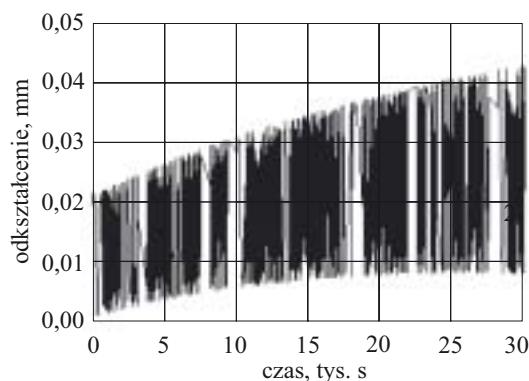
W związku z tym, że między wyznaczonymi wartościami E i η zachodzi zależność $\eta \cdot v \gg E$ równ. (8) można uprościć do postaci:

$$\varepsilon \approx \frac{\sigma_m}{E} \left[1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right) \right] - \frac{\sigma_a}{\mu \cdot v} \cos(v \cdot t) \quad (9)$$

Całkowite odkształcenia ciała lepkosprężystego o właściwościach zbliżonych do takich, jakie wykazuje Epidian 57 utwardzany w temp. 60 °C jest sumą odkształceń opisanych równ. (1), (3) i (9):

$$\varepsilon \approx \frac{\sigma_m}{E} \left[1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right) \right] - \frac{\sigma_a}{\mu \cdot v} \cos(v \cdot t) + \frac{\sigma_m + \sigma_a \sin(v \cdot t)}{E_A} + \frac{\sigma_m t}{\eta_B} - \frac{\sigma_a \cos(v \cdot t)}{v \cdot \eta_B} \quad (10)$$

Do równ. (10) podstawiono wyznaczone wartości stałych materiałowych oraz wartości naprężeń cyklu obciążeniowego stosowanego w prowadzonych badaniach zmęczeniowych i obliczono w jaki sposób zmieniały się odkształcenia badanej próbki w czasie. Wyniki przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Charakter zmian w czasie odkształceń próbki walczkowej o długości 25 mm, obciążanej zmęczeniowo (naprężenie średnie 22,1 MPa, amplituda 20,5 MPa, częstotliwość 20 Hz)
Fig. 10. Time dependence of strain of fatigue loaded cylindrical sample of length 25 mm (mean stress 22.1 MPa, amplitude 20.5 MPa, frequency 20 Hz)

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że przy obciążaniu zmęczeniowym materiału lepkosprężystego naprężeniami jednostronnymi wraz ze wzrostem liczby cykli (czasu obciążenia) wzrasta zarówno amplituda odkształceń, jak również wartość średnia odkształcenia.

WNIOSKI

— Jednostopniowe utwardzanie Epidianu 57 w temperaturze otoczenia (zalecane jako jedno z dwóch przez producenta tego kleju) prowadzi do uzyskania tworzywa o innych właściwościach mechanicznych i znacznie mniejszej trwałości zmęczeniowej, w porównaniu z tym samym tworzywem utwardzonym w temp. 60 °C.

— W mechanizmie zniszczenia zmęczeniowego tworzyw istotne znaczenie ma proces ich pełzania występujący już w temperaturze otoczenia.

— Przy obciążaniu zmęczeniowym cyklem jednostronnym wraz ze wzrostem liczby cykli wzrasta amplituda odkształceń obciążonego tworzywa i średnia wartość odkształcenia.

— Tworzywa wielkocząsteczkowe, którymi są kleje konstrukcyjne, podlegają nagrzewaniu na skutek obciążeń zmęczeniowych, co przyspiesza proces pełzania.

— Na podstawie wyników badań trwałości zmęczeniowej tworzyw adhezyjnych nie można jednoznacznie wnioskować o ich przydatności do wykonywania spoin klejowych obciążonych zmęczeniowo, między innymi, ze względu na nagrzewanie się tych materiałów pod wpływem obciążeń zmiennych, któremu nie podlegają spoiny klejowe części metalowych.

LITERATURA

1. Cagle Ch. V.: „Kleje i klejenie”, WNT, Warszawa 1977.
2. Sikora R.: „Tworzywa epoksydowe w naprawach maszyn”, WNT, Warszawa 1971.
3. Płakowska-Wyżanowicz H.: „Klejenie metali”, PWT, Warszawa 1961.
4. Świtkiewicz R.: „Trwałość zmęczeniowa elementów konstrukcji o strukturze warstwowej klejonej”, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1972.
5. Matwijenko W. A.: *Technologia i Automatyzacja Montażu* 1994, Nr 2, 33.
6. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W.: „Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 1997.
7. Tkaczuk S.: „Prognozowanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych”, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2006.
8. Godzimirski J.: „Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych”, WNT, Warszawa 2002.
9. Rośkowicz M.: „Wytrzymałość długotrwała połączeń klejowych”, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2004.

Otrzymano 9 V 2007 r.