

JAN GODZIMIRSKI, MAREK ROŚKOWICZ\*

## TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA TWORZYW ADHEZYJNYCH

---

### FATIGUE LIFE OF ADHESION PLASTICS

#### Streszczenie

W badaniach wykazano, że w mechanizmie zniszczenia zmęczeniowego połączeń klejowych istotne znaczenie ma proces pełzania ich spoin występujący już w temperaturze otoczenia.

*Słowa kluczowe: tworzywa adhezyjne, kleje konstrukcyjne, trwałość zmęczeniowa*

#### Abstract

It was demonstrated that creep at ambient temperature is very important for the process of fatigue failure of the adhesive joints.

*Keywords: adhesive plastics, structural adhesive, fatigue life*

---

\* Prof. dr hab. inż. Jan Godzimirski, dr inż. Marek Rośkowicz, Instytut Techniki Lotniczej, Wydział Mechatroniki, Wojskowa Akademia Techniczna.

## 1. Wstęp

Tworzywa adhezyjne w postaci: klejów, kitów klejowych, uszczelniaczy i osnów materiałów kompozytowych znajdują szerokie zastosowanie w budowie [1] i naprawach [2] maszyn, pojazdów, statków powietrznych i innych urządzeń technicznych. Klejenie konstrukcyjne stanowi obecnie cenne uzupełnienie innych metod łączenia materiałów.

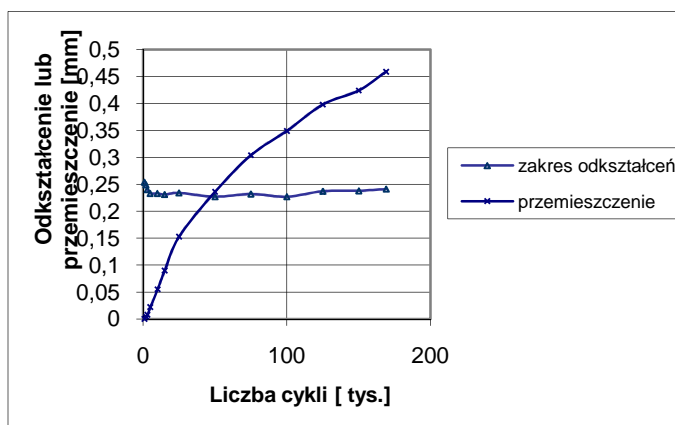
Racjonalne stosowanie klejenia konstrukcyjnego wymaga często uwzględnienia wytrzymałości zmęczeniowej projektowanego połączenia.

Jak wykazują prowadzone badania [3] nie ma korelacji między wytrzymałością doraźną połączeń klejowych, a ich trwałością zmęczeniową, jak również nie ma korelacji między trwałością zmęczeniową tworzyw adhezyjnych a trwałością zmęczeniową połączeń wykonywanych za pomocą tych tworzyw.

Celem prowadzonych badań było lepsze poznanie mechanizmu niszczenia zmęczeniowego tworzyw adhezyjnych.

## 2. Badania eksperymentalne

W badaniach stosowano próbki o średnicy 12,5 mm i długości 25 mm odlewane z tworzyw adhezyjnych: Belzony 1111 i Epidianu57/Z1. Obciążano je na ściskanie cyklem odzerowotętniającym, (ściślej jednostronnym o małej wartości naprężeń minimalnych) i maksymalnej wartości równej połowie ich wytrzymałości doraźnej. W trakcie obciążenia zmęczeniowego rejestrowano położenie ruchomej trawersy maszyny wytrzymałościowej przy minimalnej i maksymalnej wartości obciążenia cyklu zmęczeniowego w funkcji liczby cykli. Pozwoliło to określać wartość amplitudy odkształceń badanej próbki, jak również zmianę jej wysokości wynikającą z przemieszczania się trawersy (rys. 1).



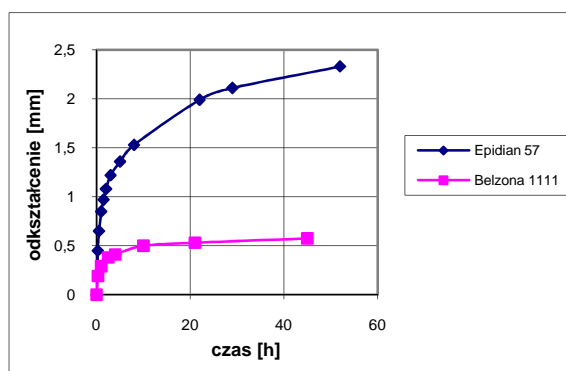
Rys. 1. Zmiana zakresu odkształceń próbki wałeczkowej i jej wysokości w trakcie badań zmęczeniowych klejowej masy regeneracyjnej Belzona 1111

Fig. 1. Change of the range of cyclic strains and height of sample during fatigue test of Belzona 1111

Stwierdzono niewielkie zmiany amplitudy odkształceń i ciągle narastanie całkowitych odkształceń (wysokości próbek) charakterystyczne dla pełzania materiałów. Pomimo, że próbka wykonana z Epidianu 57/Z1 była obciążona mniejszym naprężeniem, amplituda jej odkształceń była większa niż Belzony 1111, co wynika z mniejszej (około dwukrotnie) wartości modułu sprężystości materiału Epidian 57/Z1 w porównaniu z materiałem Belzona 1111. Również zmiana wysokości w funkcji liczby cykli obciążeniowych próbki wykonanej z Epidianu 57/Z1 była bardziej intensywna niż próbki wykonanej z materiału Belzona 1111.

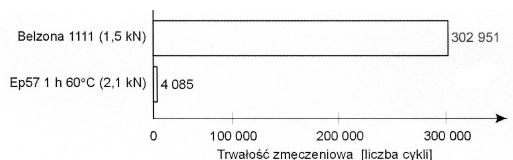
W celu potwierdzenia tezy, że pod obciążeniem zmęczeniowym może w temperaturze otoczenia wystąpić pełzanie badanych tworzyw przeprowadzono odpowiednie badania. Próbki wałeczkowe o wymiarach stosowanych w badaniach zmęczeniowych obciążono siłą 5 kN i mierzono ich narastające w czasie odkształcenie w temperaturze otoczenia 20..23°C i podwyższonej 35°C (rys. 2).

Przeprowadzone badania potwierdziły tezę, że badane tworzywa mogą podlegać pełzaniu w trakcie obciążeń zmęczeniowych cyklem jednostronnym oraz, że pełzanie tworzywa Epidian57/Z1 jest bardziej intensywne niż tworzywa Belzona 1111.



Rys. 2. Krzywe pełzania tworzyw Epidian 57/Z1 i Belzona 1111 w temperaturze 35 °C pod naprężeniami ściskającymi około 40 MPa

Fig. 2. Creep curves of Epidian 57/Z1 and Belzona 1111 at temperature 35°C under compression stresses about 40 MPa



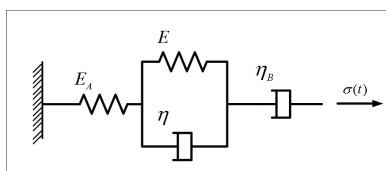
Rys. 3. Względna trwałość zmęczeniowa na ścinanie (maksymalne obciążenie cyklu zmęczeniowego równe ~ 0,66 wytrzymałości na ścinanie) badanych tworzyw adhezyjnych

Fig. 3. Shear relative fatigue life (maximum load of fatigue cycle equal ~ 0,66 shear strength) of testing adhesive plastics

Przeprowadzone badania porównawcze trwałości zmęczeniowej połączeń jednozakładowych wykazały większą trwałość względną (rys. 3) połączeń wykonanych materiałem Belzona 1111 oraz porównywalną trwałość bezwzględną obu badanych materiałów.

### 3. Analiza odkształceń badanych tworzyw

Tworzywa wielkocząsteczkowe wykazują właściwości lepkosprężyste. Fizycznym modelem lepkosprężystości liniowej może być model Burgersa (rys. 4).



Rys. 4. Model Burgersa,  $E_A$ ,  $E$ ,  $\eta_B$  i  $\eta$  – współczynniki lepkosprężystości

Fig. 4. Burgers' model,  $E_A$ ,  $E$ ,  $\eta_B$  and  $\eta$  - factors of viscoelasticity

Odkształcenie ciała lepkosprężystego jest funkcją naprężeń, czasu i właściwości fizycznych materiału określonych współczynnikami lepkosprężystości.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_o}{E_A} + \frac{\sigma_o}{\eta_B} t + \frac{\sigma_o}{E} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t \cdot E}{\eta}\right) \right) \quad (1)$$

Całkowite odkształcenia ciała lepkosprężystego o właściwościach zbliżonych do takich, jakie wykazuje Epidian 57/Z1 utwardzany w temperaturze 60°C pod cyklicznym obciążeniem można opisać zależnością [4]:

$$\varepsilon \cong \frac{\sigma_m}{E} \left( 1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right) \right) - \frac{\sigma_a}{\eta \cdot \nu} \cos(\nu \cdot t) + \frac{\sigma_m + \sigma_a \sin(\nu \cdot t)}{E_A} + \frac{\sigma_m t}{\eta_B} - \frac{\sigma_a \cos(\nu \cdot t)}{\nu \cdot \eta_B} \quad (2)$$

gdzie:

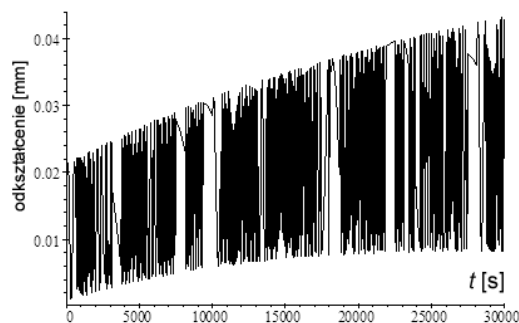
$\sigma_m$  – średnie naprężenie cyklu zmęczeniowego,

$\sigma_a$  – amplituda cyklu zmęczeniowego,

$\nu$  - częstotliwość cyklu,

$t$  – czas.

Z przeprowadzonych obliczeń (rys. 5) wynika, że przy obciążeniu zmęczeniowym naprężeniami jednostronnymi materiału lepkosprężystego, którego właściwości opisuje model Burgera, wraz ze wzrostem liczby cykli (czasu obciążenia) wzrasta zarówno amplituda odkształceń, jak również ich wartość średnia. Wynika z tego, że ograniczona trwałość zmęczeniowa połączeń klejowych spowodowana jest, między innymi, pełzaniem spoin.



Rys. 5. Zmiana w czasie odkształceń próbki wałeczkowej o długości 25 mm, obciążonej zmęczeniowo (napężenie średnie 22,1 MPa, amplituda 20,5 MPa, częstotliwość 20 Hz), opisaną modelem Burgera

Fig. 5. Dependence of strain changes of fatigue loaded cylindrical sample 25mm in length on time (mean stress 22,1 MPa, stress amplitude 20,5 MPa, frequency 20 Hz) described by Burgers' model

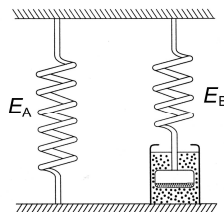
Badania wykazują, że spoiny obciążone w ograniczonym zakresie może cechować wysoka trwałość zmęczeniowa. Wynika z tego, że w tym przypadku przyrost odkształceń powinien zaniknąć po upływie określonej liczby obciążeń.

Modelem ciała lepkosprężystego, które odkształca się pod wpływem stale działającego obciążenia, lecz odkształcenia te ustalają się po upływie określonego czasu może być model Zenera (rys. 6). Odkształcenia modelu Zenera w czasie opisuje zależność:

$$\varepsilon = \sigma \frac{\eta + t \cdot E_B}{\eta \cdot E_A + \eta \cdot E_B + E_A \cdot E_B \cdot t} \quad (3)$$

z której wynika, że wraz z upływem czasu działania obciążenia odkształcenia dążą do wartości:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_A} \quad (4)$$



Rys. 6. Model Zenera ciała liniowo lepkosprężystego

Fig. 6. Zeners' model of linear viscoelasticity

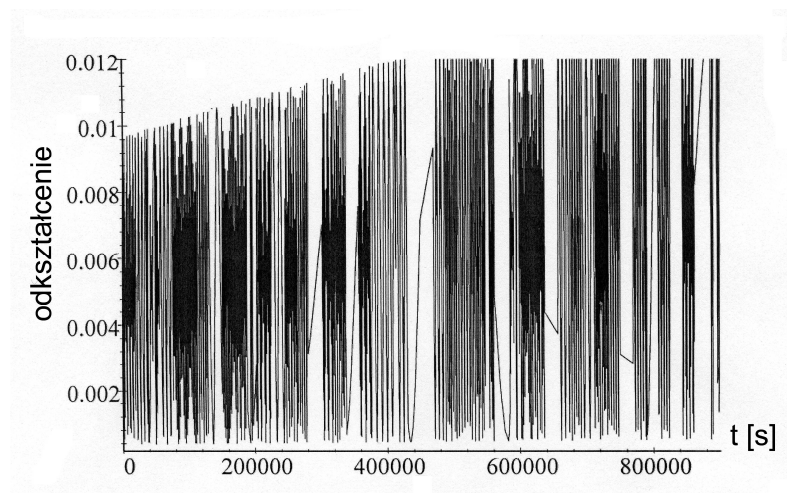
Odształcenia ciała opisanego modelem Zenera, obciążonego cyklem sinusoidalnym opisuje zależność:

$$\varepsilon = [\sigma_m + \sigma_a \sin(\nu \cdot t)] \frac{\eta + t \cdot E_B}{\eta \cdot E_A + \eta \cdot E_B + E_A \cdot E_B \cdot t} \quad (5)$$

Z graficznego obrazu takich odkształceń (rys. 7) wynika, że wraz z upływem czasu działania obciążenia maksymalne odkształcenia materiału dążą do stałej wartości.

#### 4. Wnioski

1. W mechanizmie zniszczenia zmęczeniowego połączeń klejowych istotne znaczenie ma proces pełzania ich spoin występujący już w temperaturze otoczenia, a którego intensywność rośnie wraz ze wzrostem temperatury.
2. Modelem Burgersa można z przybliżeniem opisywać liniową lepkosprężystość spoin o ograniczonej trwałości zmęczeniowej. Przy obciążeniu zmęczeniowym cyklem jednostronnym wraz ze wzrostem liczby cykli wzrasta amplituda i średnia wartość odkształceń obciążonego tworzywa (spoiny).
3. Do opisu liniowych właściwości lepkosprężystych spoin o nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej bardziej właściwy wydaje się być model Zenera. Przy obciążeniu zmęczeniowym cyklem jednostronnym wraz ze wzrostem liczby cykli maksymalne odkształcenia spoiny dążą do ograniczonej wartości.



Rys. 7. Zmiana w czasie odkształceń próbki wałeczkowej o długości 25 mm, obciążonej zmęczeniowo (napężenie średnie 22,1 MPa, amplituda 20,5 MPa, częstotliwość 20Hz), opisaną modelem Zenera

Fig. 7. Dependence of strain changes of fatigue loaded cylindrical sample 25 mm in length on time (mean stress 22,1 MPa, stress amplitude 20,5 MPa, frequency 20 Hz) described by Zeners' model

## Literatura

- [1] Cagle C., *Kleje i klejenie*, WNT, Warszawa 1977.
- [2] Sikora R., *Tworzywa epoksydowe w naprawach maszyn*, WNT, Warszawa 1971.
- [3] Godzimirski J., Komorek A., *Badania trwałości zmęczeniowej tworzyw i połączeń adhezyjnych*, Czasopismo Techniczne Mechanika z. 6-M/2006, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
- [4] Godzimirski J., Komorek A., Rośkowicz M., *Trwałość zmęczeniowa tworzywa Epidian 57*, Polimery LIII (2008) 10.