

Magdalena Urbaniak¹, Karol Grudziński²

Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

WPLÝW TEMPERATURY NA CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE TWORZYWA EPOKSYDOWEGO EPY® PODDANEGO OBCIĄŻENIOM ŚCISKAJĄCYM

Przedmiotem badań, opisanych w tej pracy, było specjalne tworzywo epoksydowe o nazwie handlowej EPY®, stosowane na podkładki fundamentowe maszyn i urządzeń okrętowych, a ostatnio także wielu innych ciężkich maszyn i urządzeń lądowych. Odlewanie z tego tworzywa podkładek fundamentowych na gotowo, bezpośrednio pod odpowiednio ustawionym obiektem (np. silnikiem napędu głównego statku), znacznie upraszcza montaż ciężkich maszyn i urządzeń, dając w efekcie wiele korzyści techniczno-ekonomicznych i eksploatacyjnych. Należy jednakże przy tym brać pod uwagę fakt, że właściwości mechaniczne powstałych w ten sposób podkładek fundamentowych zależą nie tylko od składu tworzywa polimerowego, ale także w dużym stopniu od technologii ich wytwarzania i warunków eksploatacji, głównie temperatury i szybkości odkształcania. Celem prac, przedstawionych w tym artykule, było zbadanie procesu dotwardzania tworzywa EPY® oraz określenie wpływu temperatury i szybkości odkształcania na właściwości mechaniczne tego tworzywa jako materiału konstrukcyjnego w zastosowaniu na podkładki fundamentowe maszyn i urządzeń. Badania procesu dotwardzania tworzywa przeprowadzono metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC). Wyniki badań obrazują termogramy przedstawione na rysunku 1. Charakterystyki mechaniczne tworzywa przy obciążeniu ściskającym, w różnych temperaturach (od 22 do 160°C) i przy różnych szybkościach odkształcania (od 0,0208 do 20,8 min⁻¹), oraz wartości wybranych wskaźników wytrzymałościowych wyznaczono za pomocą skomputeryzowanej maszyny wytrzymałościowej INSTRON. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 2-5. Analiza uzyskanych wyników badań eksperymentalnych wykazała dobrą ich zgodność z równaniem Eyringa (2). Wynika z tego, że wytrzymałość na ściskanie dotwardzonego tworzywa rośnie liniowo wraz z logarytmem szybkości jego odkształcania (rys. 6). Natomiast wzrost temperatury pomiaru (w zakresie od 22 do 100°C) badanego tworzywa powoduje, że jego wrażliwość na zmianę szybkości odkształcania maleje (rys. 6). Uzyskano także dobrą zgodność wyników badań doświadczalnych z empirycznym równaniem Lessera (4), co umożliwia prognozowanie wytrzymałości na ściskanie dotwardzonego tworzywa EPY® w zależności od temperatury pomiarowej (rys. 7). Przeprowadzone badania umożliwiają pełniejszą ocenę zasadniczych właściwości mechanicznych badanego tworzywa EPY® jako materiału konstrukcyjnego, stosowanego w montażu ciężkich maszyn i urządzeń, eksploatowanych w różnych warunkach termicznych, przy różnych obciążeniach statycznych i dynamicznych.

Słowa kluczowe: tworzywo epoksydowe, właściwości wytrzymałościowe, szybkość odkształcania, temperatura

THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE COMPRESSIVE BEHAVIOUR OF EPOXY COMPOUND EPY®

The object of the investigations described in this article was a special epoxy material, known under its trade name EPY®, which is applied to foundation chocks of ships' machinery and installations, and also in many other heavy land-based machines. Casting of foundation chocks from this material on the spot, directly under an installed object (e.g. a ship's main engine) considerably simplifies the assembling technology of heavy machines and gives a lot of technical, economic and maintenance advantages. However, it must be taken into account that mechanical properties of foundation chocks obtained in this way depend not only on the chemical composition of the polymer but also on the production technology and operating conditions of the chocks - and particularly on the temperature and the strain rate. The aim of the studies presented in the article was to investigate the postcuring process for the EPY® material and the effect of the temperature and strain rate on the mechanical properties of this material too. The postcuring process of the EPY® material was investigated by DSC method. The obtained DSC thermograms are shown in Figure 1. The mechanical characteristics and the values of some selected compressive strength parameters for the EPY® material subjected to load at various temperatures (from 22 to 160°C) and various strain rates (from 0.0208 to 20.8 min⁻¹) were determined by means of a computerized testing machine INSTRON. The results of these investigations are shown in Figures 2 to 5. The results of the tests showed their good fit to the Eyring equation (2). Consequently, the compressive strength of the postcured EPY® material increases lineally together with the logarithm of strain rate (Fig. 6). However, elevated test temperatures (in the range from 22 to 100°C) of the material led to a decrease of its sensitivity to strain rate changes (Fig. 6). The results of the tests proved to be in good fit with the results calculated using the Lesser empirical equation (4) which allows compressive strength forecasting of the postcured EPY® material depending on the temperature of measurement (Fig. 7). The performed investigations make it possible to carry out a more comprehensive evaluation of the essential mechanical properties of the EPY® material treated as a structural material used for assembling of heavy machines and installations which work in various thermal and loading conditions.

Keywords: epoxy compound, mechanical properties, compressive strain rate, temperature effects

¹ dr inż., ² prof. dr hab. inż.

WSTĘP

Fundamentowanie maszyn i urządzeń na podkładkach ze specjalnego tworzywa epoksydowego EPY[®], odlewanych na gotowo bezpośrednio pod posadawianym obiektem, znacznie upraszcza ich montaż i daje w efekcie wiele korzyści techniczno-ekonomicznych i eksploatacyjnych [1]. Ta nowoczesna technologia montażu maszyn znalazła zastosowanie w okrętownictwie i przemyśle maszynowym, w górnictwie i energetyce, w budownictwie przemysłowym, budowie mostów itp. [1]. Pomimo różnych warunków eksploatacyjnych maszyn i urządzeń podkładki fundamentowe odlane z tego tworzywa, po odpowiednim jego dotwardzeniu, zachowują wymagane właściwości wytrzymałościowe, są trwałe i niezawodne w praktyce.

Właściwości mechaniczne tworzyw polimerowych są jednakże silnie zależne od temperatury i szybkości odkształcania [2], zwłaszcza gdy temperatura zbliża się do rejonu temperatury zeszklenia. W rejonie tym wpływ zmian szybkości odkształcania staje się bardzo wyraźny, a odporność na odkształcania materiału zależy od zachodzących tu zmian topologii i gęstości usieciowania polimeru [3]. Czynniki te muszą być brane pod uwagę w praktycznych zastosowaniach tych materiałów na elementy konstrukcyjne.

Wpływ stanu utwardzenia tworzywa epoksydowego EPY[®] oraz szybkości jego odkształcania na charakterystyki mechaniczne i wartości wybranych wskaźników wytrzymałościowych przy ściskaniu, istotnych dla praktycznych zastosowań tego materiału, omówiono w [4]. W tym artykule przedstawiono wyniki badań procesu dotwardzania tworzywa EPY[®] oraz badań wytrzymałościowych tego tworzywa, poddanego ściskaniu z różną szybkością odkształcania, w różnych temperaturach, odpowiadających warunkom eksploatacyjnym podkładek fundamentowych maszyn i urządzeń okrętowych.

Oprócz określenia wpływu temperatury pomiarowej i szybkości odkształcania na charakterystyki mechaniczne badanego tworzywa, celem tej pracy było także podanie wzorów umożliwiających prognozowanie wytrzymałości na ściskanie dotwardzonego tworzywa EPY[®], w zależności od temperatury nagrzania się podkładek fundamentowych maszyn oraz od szybkości odkształcania tego materiału. Próby ściskania przeprowadzono nie tylko przy standardowej dla tworzyw polimerowych prędkości posuwu tłoka maszyny wytrzymałościowej ($v = 1,3 \pm 0,3$ mm/min według normy ASTM D 695-96), ale i przy prędkościach pozastandardowych, odpowiadających różnym szybkościom odkształceń, występującym w praktycznych warunkach obciążeń dynamicznych podkładek fundamentowych maszyn i urządzeń okrętowych.

PRACE DOŚWIADCZALNE

Materiały

Bazę surowcową badanego tworzywa epoksydowego o nazwie handlowej EPY[®] (firmy Marine Service Jaroszewicz) stanowią dwie krajowe żywice epoksydowe i utwardzacz alifatyczny. System epoksydowy uzupełniają napelniacze i specjalne dodatki nadające tworzywu odpowiednie właściwości technologiczne i użytkowe.

Metodyka badań

Przebieg procesu dosieciowania tworzywa epoksydowego EPY[®] badano za pomocą różnicowego kalorymetru skaningowego DSC 910 firmy Du Pont. Pomiary DSC przeprowadzono na próbce dotwardzonej w temperaturze 80°C przez 2 h (po uprzednim utwardzeniu w 22°C przez 24 h).

Próbkę (ok. 20 mg) umieszczono w zamkniętym naczynku Al-50 μ l i poddano trzem cyklom ogrzewania w DSC, z szybkością 10°C/min, od temperatury -50°C (w atmosferze azotu). Pierwszy cykl ogrzewania, z uwagi na ukazujący się pik endotermiczny, przerwano tuż za nim i następnie po schłodzeniu próbki do temperatury początkowej (-50°C) ogrzewano ją po raz drugi, aby określić dokładną wartość temperatury zeszklenia T_g . Drugi cykl ogrzewania próbki prowadzono do temperatury 250°C, aby wyznaczyć także entalpię resztkową ΔH_{res} reakcji dosieciowania. Po drugim cyklu ogrzewania w DSC próbkę schłodzono z powrotem do temperatury początkowej (-50°C) i poddano trzeciemu cyklowi ogrzewania do temperatury 250°C z tą samą szybkością. W trzecim cyklu ogrzewania nie zaobserwowano już resztkowej entalpii sieciowania i wyznaczono tylko temperaturę zeszklenia prawie w pełni usieciowanego tworzywa.

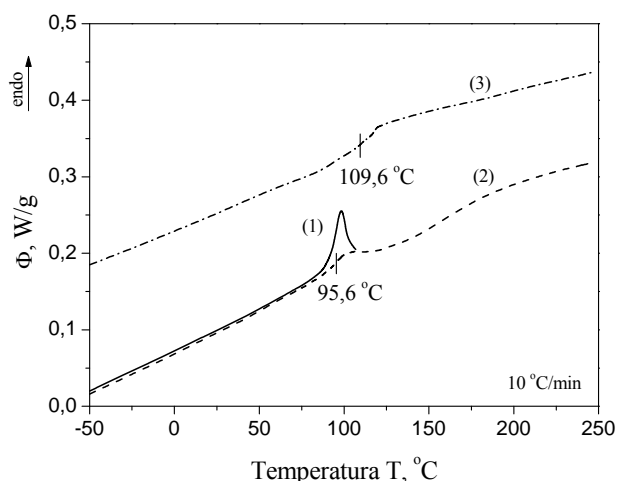
Charakterystyki mechaniczne przy ściskaniu tworzywa, w różnych temperaturach i z różnymi szybkościami odkształceń, wyznaczono przy użyciu skomputeryzowanej maszyny wytrzymałościowej INSTRON 8501 Plus, wyposażonej w komorę grzejną. Badania wykonano na próbkach walcowych ($\phi 20 \times 25$ mm), dotwardzonych przez 2 h w temperaturze 80°C, po uprzednim ich utwardzeniu w temperaturze $22 \pm 1^\circ\text{C}$ przez 24 h. Próby ściskania, w zakresie temperatur od 40 do 160°C, przeprowadzono na próbkach wygrzewanych w komorze grzejnej maszyny przez 0,5 h, w każdej temperaturze z przyjętego zakresu, zwiększanej kolejno o 20°C. Zapewniało to nagrzanie próbki w całej jej objętości przed rozpoczęciem próby ściskania. Tak przygotowane serie próbek (po 5 szt.) poddano (w komorze) jednoosiowemu ściskaniu aż do ich zniszczenia, z różniącymi się o rząd wielkości szybkościami odkształceń $\dot{\epsilon}$, od 0,0208 do 20,8 min^{-1} (co odpowiada prędkościom

posuwu tłoka maszyny wytrzymałościowej od 0,13 do 130 mm/min).

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Proces dosieciowania tworzywa

Termogramy DSC przebiegu procesu dosieciowania tworzywa epoksydowego EPY[®], uzyskane podczas pierwszego, drugiego i trzeciego cyklu ogrzewania z szybkością 10°C/min, pokazano na rysunku 1. Temperatura zeszklenia dotwardzonego (w temperaturze 80°C przez 2 h) tworzywa EPY[®] wynosi $T_g = 95,6^\circ\text{C}$, a jego resztkowa entalpia reakcji wyniosła $\Delta H_{res} = 3,2 \text{ J/g}$ (rys. 1). Tworzywo EPY[®], dotwardzone w temperaturze 80°C przez 2 h, osiąga stopień usieciowania $\alpha = 0,988$.



Rys. 1. Termogramy DSC dotwardzonego (w 80°C przez 2 h) tworzywa EPY[®] uzyskane w pierwszym (1), drugim (2) i trzecim (3) cyklu ogrzewania z szybkością 10°C/min

Fig. 1. DSC thermograms of EPY[®] material (postcured at 80°C for 2 h) obtained during the first (1), the second (2) and the third (3) heating cycle at the rate of 10°C/min

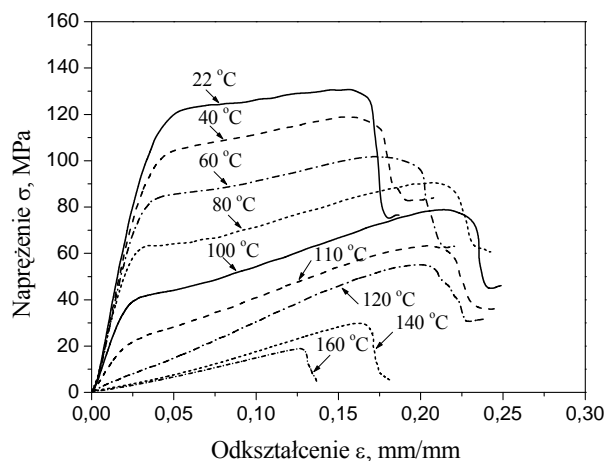
Stopień usieciowania (α) tworzywa obliczono według wzoru [5]

$$\alpha = \frac{\Delta H_T - \Delta H_{res}}{\Delta H_T} \quad (1)$$

gdzie: ΔH_{res} - entalpia resztkowa częściowo usieciowanej próbki tworzywa, ΔH_T - całkowita entalpia reakcji, odpowiadająca próbce „w stanie zmieszania”, bez wcześniejszego przeprowadzenia sieciowania ($\Delta H_T = 273,8 \text{ J/g}$) [4].

Charakterystyki mechaniczne tworzywa w funkcji temperatury i szybkości odkształcania

Na rysunku 2, w układzie współrzędnych: naprężenie-odkształcenie względne, przedstawiono charakterystyki obrazujące zachowanie się próbek dotwardzonego (w 80°C przez 2 h) tworzywa EPY[®] podczas próby ściskania (ze standardową prędkością posuwu tłoka maszyny wytrzymałościowej 1,3 mm/min, tj. z szybkością odkształcania $0,208 \text{ min}^{-1}$) w zależności od temperatur pomiaru z zakresu od 22 do 160°C. Na podstawie badań, których wyniki przedstawiono na tym rysunku, stwierdzono, że ogólny przebieg krzywych naprężenie-odkształcenie względne, uzyskanych w temperaturach pomiarowych do ok. 110°C, zachowuje swój typowy kształt. Po początkowym ostrym wzniesieniu (stadium liniowo-sprężyste) krzywa ściskania „zagina się” i przechodzi w stadium lekko wznoszącego się plateau (stadium „plastycznego” płynięcia z niewielkim umocnieniem), kończącego się łagodnym pikiem, który wyznacza maksymalne naprężenie ścisające, zwane wytrzymałością na ściskanie (σ_M). Po tym pikie następuje gwałtowny spadek krzywej (stadium zniszczenia).



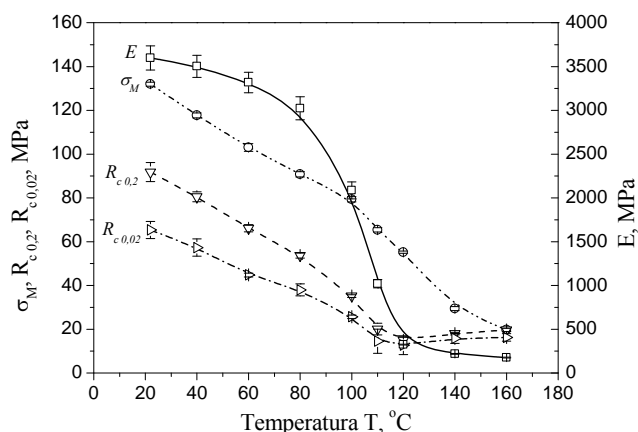
Rys. 2. Krzywe naprężenie-odkształcenie względne uzyskane podczas próby ściskania w różnych temperaturach pomiaru dotwardzonego tworzywa EPY[®]

Fig. 2. Stress-strain curves obtained during compression test at various temperatures for the postcured EPY[®] material

Nieco inny charakter mają przebiegi krzywych ściskania, wyznaczone w temperaturach powyżej 110°C. Wyróżnić na nich można ogólnie tylko obszerne stadium w przybliżeniu liniowego wzrostu odkształcenia do osiągnięcia pik, wyznaczającego wytrzymałość na ściskanie (σ_M), po którym bezpośrednio następuje stadium zniszczenia (brak stadium płynięcia). Uzyskane wyniki wskazują, że wytrzymałość badanego materiału na ściskanie (σ_M), w warunkach podwyższonej temperatury pomiaru, wyraźnie się zmniejsza.

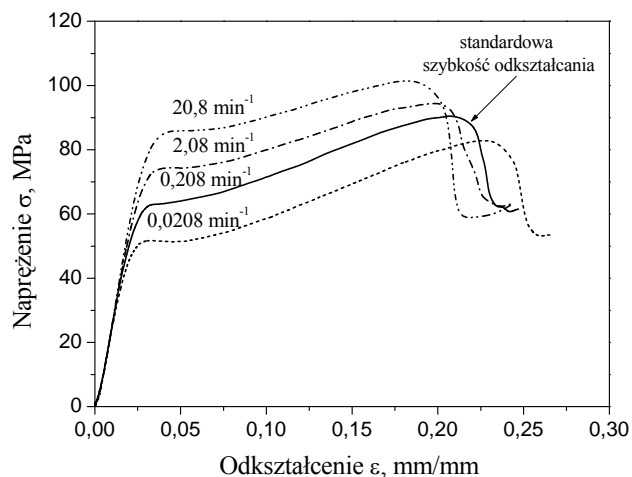
Wartości wybranych wskaźników wytrzymałościowych (σ_M , $R_{c0,2}$, $R_{c0,02}$ i E), wyznaczone podczas próby ściskania ze standardową szybkością odkształcania $0,208 \text{ min}^{-1}$, próbek dotwardzonego (w 80°C przez 2 h) tworzywa w podwyższonych temperaturach pomiaro-

wych (od 40 do 160°C), przedstawiono na rysunku 3. Jak oczekiwano, moduł sprężystości Younga (E) maleje wyraźnie wraz ze wzrostem temperatury pomiaru (rys. 3). Na poziomie temperatury zeszklenia ($T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$) [4] jego wartość jest ponad 3-krotnie mniejsza od wartości w temperaturze 22°C. Spowodowane jest to rozpadem wiązań drugorzędowych w tworzywie podczas ogrzewania [6]. Wraz ze wzrostem temperatury pomiaru maleją także wyraźnie wartości pozostałych wskaźników wytrzymałościowych (rys. 3), tj. wytrzymałości na ściskanie (σ_M), umownej granicy plastyczności ($R_{c0,2}$) i umownej granicy sprężystości ($R_{c0,02}$).



Rys. 3. Wartości wybranych wskaźników wytrzymałościowych dla dotwardzonego tworzywa EPY[®] wyznaczone w próbach ściskania w różnych temperaturach

Fig. 3. Values of some selected strength parameters for the postcured EPY[®] material determined in compression tests conducted at various temperatures

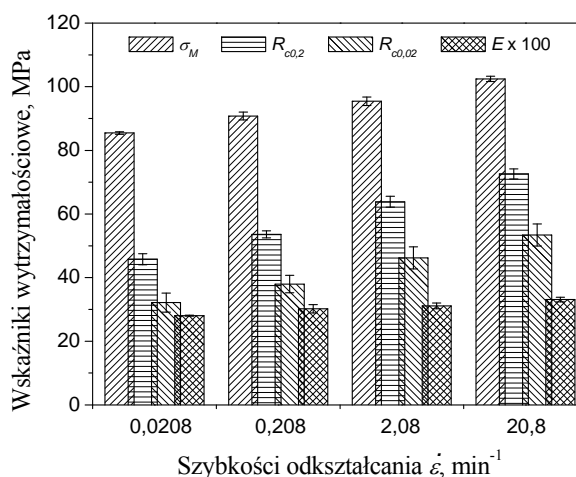


Rys. 4. Krzywe naprężenie-odkształcenie względne dla dotwardzonego tworzywa EPY[®] wyznaczone w próbach ściskania w temperaturze 80°C przy różnych szybkościach odkształcania

Fig. 4. Stress-strain curves for the postcured EPY[®] material determined in compression tests at 80°C for various strain rates

Zachowanie się w temperaturze pomiaru 80°C próbek dotwardzonego tworzywa EPY[®], w układzie współrzędnych: naprężenie-odkształcenie względne, przy czterech różnych szybkościach odkształcania $\dot{\epsilon} = 0,0208$;

0,208; 2,08 i 20,8 min^{-1} , odpowiadających prędkościom posuwu tłoka maszyny wytrzymałościowej od 0,13 do 130 mm/min, prezentuje rysunek 4. Przebieg krzywych wskazuje wyraźną wrażliwość badanego tworzywa na szybkość odkształcania; zwiększenie szybkości odkształcania daje w efekcie wzrost wytrzymałości na ściskanie (σ_M) materiału. Bardziej szczegółowo przedstawiono to na rysunku 5. Pokazuje on wyznaczone wartości wybranych wskaźników wytrzymałościowych (σ_M , $R_{c0,2}$, $R_{c0,02}$ i E) badanego tworzywa dla czterech różnych szybkości odkształcania $\dot{\epsilon}$. Z badań tych wynika, że wraz ze wzrostem szybkości odkształcania $\dot{\epsilon}$ wartości wskaźników: σ_M , $R_{c0,2}$ i $R_{c0,02}$ zwiększają się znacząco, natomiast wartość modułu Younga (E) wykazuje niewielką tylko zależność od szybkości odkształcania.



Rys. 5. Wartości wybranych wskaźników wytrzymałościowych dla dotwardzonego tworzywa EPY[®] wyznaczone w próbach ściskania w temperaturze pomiaru 80°C przy różnych szybkościach odkształcania

Fig. 5. Values of some selected strength parameters for the postcured EPY[®] material determined in compression tests at 80°C for various strain rates

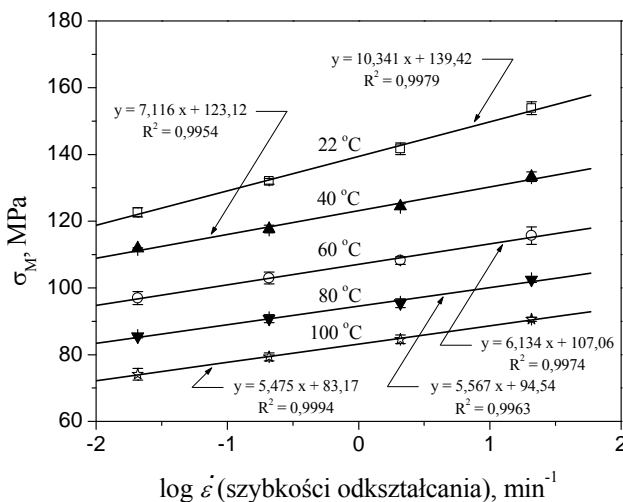
Obserwowane na krzywych naprężenie-odkształcenie (rys. 2) uplastycznienie materiału próbki zachodzi, według teorii Eyringa [7-10], wskutek aktywowanych naprężeniami przeskoków segmentów molekularnych, nazywanych jednostkami przepływu. Naprężenia obniżają barierę aktywacji dla przeskoków tych jednostek i wywołują ich skoordynowany ruch - przepływ układający się w tzw. pasma ścinania, w których następują względnie duże odkształcenia plastyczne. Wraz z narastaniem takich pasm powiększa się odkształcenie całkowite [6].

W teorii Eyringa [8, 9] zakłada się, że ścinanie (τ) i jednoosiowe naprężenia uplastyczniające (σ) są logarytmicznie związane z szybkością odkształcania postaciowego przy ścinaniu ($\dot{\gamma}$) następującym równaniem:

$$\tau = \frac{\sigma}{2} = \frac{\Delta H}{\nu_f} - \frac{kT}{\nu_f} \ln\left(\frac{\dot{\gamma}_o}{\dot{\gamma}}\right) \quad (2)$$

gdzie: ν_f - objętość aktywacji (lub objętość jednostki przepływu), ΔH - energia aktywacji, k - stała Boltzmana, T - temperatura bezwzględna, $\dot{\gamma}$ - szybkość odkształcania postaciowego, $\dot{\gamma}_o$ - wartość stała szybkości odkształcania postaciowego, która według Padmanabha [11] wynosi ok. 10^{13} s^{-1} .

Zbiornicze wyniki badań przedstawione na rysunku 6 pokazują, że wytrzymałość na ściskanie (σ_M) w różnych temperaturach pomiaru (od 22 do 100°C) dotwardzonego tworzywa EPY[®] rośnie liniowo wraz z logarytmem szybkości jego odkształcania w całym badanym zakresie. Uzyskane wyniki badań wykazują ich dobrą zgodność z wynikami obliczeń według równania Eyringa (2) (rys. 6). Warto zwrócić uwagę na fakt, że nachylenia linii $\sigma_M = f(\dot{\epsilon})$ maleją (rys. 6) ze wzrostem temperatury badań tworzywa, co wskazuje, że jego wrażliwość na zmianę szybkości odkształcania maleje.



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie (σ_M) dotwardzonego tworzywa EPY[®] w funkcji logarytmu szybkości odkształcania wyznaczona w różnych temperaturach wraz z dopasowanymi do niej równaniami Eyringa (2)

Fig. 6. Compressive strength (σ_M) of the postcured EPY[®] material versus the logarithm of strain rate determined at various temperatures and presented together with the Eyring equations (2) fitted to it

Prognozowanie wytrzymałości na ściskanie tworzywa w funkcji temperatury

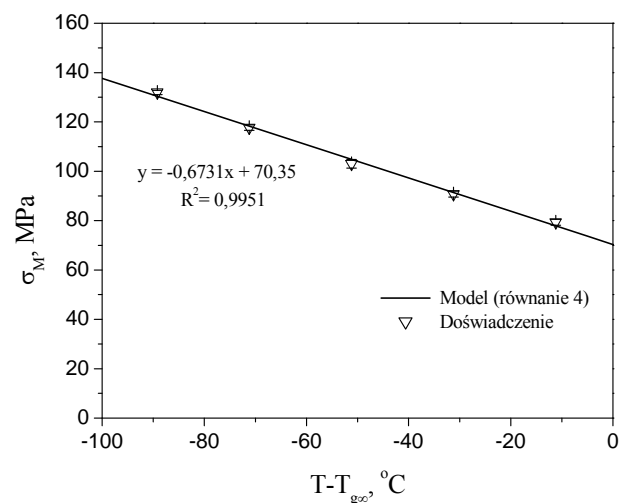
Wytrzymałość na ściskanie (σ_M) w funkcji temperatur pomiaru (T), niższych od temperatury zeszklenia całkowicie usieciowanego tworzywa ($T_{g\infty}$), aproksymować można następującym równaniem empirycznym [12]:

$$\sigma_M = a(T - T_{g\infty}) + \sigma_M^{T_{g\infty}} \quad \text{dla } T < T_{g\infty} \quad (3)$$

gdzie: $\sigma_M^{T_{g\infty}}$ - wytrzymałość na ściskanie przy $T_{g\infty}$, natomiast a - współczynnik opisujący liniowy spadek σ_M , gdy $T < T_{g\infty}$.

Wyniki prac doświadczalnych wytrzymałości na ściskanie (σ_M) w różnych temperaturach pomiaru dotwardzonego tworzywa EPY[®] (rys. 3), jak i wyznaczona metodą DSC temperatura zeszklenia całkowicie usieciowanego tworzywa $T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$ [4] pozwoliły na sprowadzenie równania (3) do postaci

$$\sigma_M = -0,6731(T - 111,2) + 70,35 \quad (4)$$



Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie (σ_M) dotwardzonego tworzywa EPY[®] w funkcji ($T - T_{g\infty}$) wyznaczona doświadczalnie oraz obliczona według przyjętego modelu (wzór (4))

Fig. 7. Compressive strength (σ_M) of the postcured EPY[®] material versus ($T - T_{g\infty}$) determined experimentally and calculated according to the assumed model (equation (4))

Dobra zgodność wyników badań doświadczalnych z wynikami obliczeń (rys. 7) pozwala w praktyce wykorzystać równanie (4) do prognozowania wytrzymałości na ściskanie tworzywa EPY[®] w zależności od temperatury jego eksploatacji.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania dotwardzonego (w 80°C przez 2 h) tworzywa EPY[®], w aspekcie jego zastosowania na podkładki fundamentowe maszyn i urządzeń okrętowych, wykazały istotny wpływ podwyższonej temperatury pomiaru (od 40 do 160°C) oraz szybkości odkształcania (w zakresie od 0,0208 do 20,8 min^{-1}) na jego charakterystyki i wybrane wskaźniki wytrzymałościowe.

Ze wzrostem temperatury pomiaru wartości wyznaczonych wskaźników wytrzymałościowych (σ_M , $R_{c0,2}$, $R_{c0,02}$ i E) tworzywa EPY[®] maleją intensywnie do temperatury zeszklenia ($T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$). Uzyskane wyniki

badania wytrzymałościowych posłużyły także do utworzenia empirycznego równania, które w praktyce może być wykorzystane do prognozowania wytrzymałości na ściskanie badanego tworzywa w zależności od temperatury nagrzania się podkładek fundamentowych maszyn.

Tworzywo EPY[®] cechuje też pewna wrażliwość na zmianę szybkości odkształcania. Jego wytrzymałość na ściskanie w różnych temperaturach pomiaru (niższych od $T_{g\infty}$) rośnie liniowo wraz z logarytmem szybkości odkształcania w kolejnych rzędach jego wartości. Jednakże ze wzrostem temperatury pomiaru tworzywa jego wrażliwość na zmianę szybkości odkształcania maleje.

LITERATURA

- [1] Grudziński K., Jaroszewicz W., Posadawianie maszyn i urządzeń na podkładkach fundamentowych odlewanych z tworzywa EPY, Wydawnictwo ZAPOL, Szczecin 2005, 19-32.
- [2] Harismendy I., Miner R., Valea A., Llano-Ponte R., Mujika F., Mondragon I., Strain rate and temperature effects on the mechanical behaviour of epoxy mixtures with different cross-link densities, *Polymer* 1997, 38, 5573-5577.
- [3] Min B.-G., Hodgkin J.H., Stachurski Z.H., The dependence of fracture properties on cure temperature in a DGEBA/DDS epoxy system, *J. Appl. Polym. Sci.* 1993, 48, 1303-1312.
- [4] Urbaniak M., Grudziński K., Wpływ szybkości odkształcania na charakterystyki mechaniczne tworzywa epoksydowego EPY poddanego obciążeniom ściskającym, *Kompozyty (Composites)* 2006, 6.
- [5] Karkanis P.I., Partridge I.K., Cure modeling and monitoring of epoxy/amine resin systems. II. Network formation and chemoviscosity modeling, *J. Appl. Polym. Sci.* 2000, 77, 2178-2188.
- [6] Ashby M.F., Jones D.R., *Materiały inżynierskie, Kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów*, tom 2, WNT, Warszawa 1996, 290-309.
- [7] Eyring H., Viscosity, plasticity, and diffusion as examples of absolute reaction rates, *J. Chem. Phys.* 1936, 4, 283-291.
- [8] Mayr A.E., Cook W.D., Edward G.H., Yielding behaviour in model epoxy thermosets - I. Effect of strain rate and composition, *Polymer* 1998, 39, 3719-3724.
- [9] Cook W.D., Mayr A.E., Edward G.H., Yielding behaviour in model epoxy thermosets - II. Temperature dependence, *Polymer* 1998, 39, 3725-3733.
- [10] Ward I.M., Review: The yield behaviour of polymers, *J. Mater. Sci.* 1971, 6, 1397-1417.
- [11] Padmanabhan K., Time - temperature failure analysis of epoxies and unidirectional glass/epoxy composites in compression, *Composites: Part A*, 27A, 1996, 585-596.
- [12] Lesser A.J., Kody R.S., A generalized model for the yield behavior of epoxy networks in multiaxial stress states, *J. Polym. Sci. Polym. Phys.* 1997, 35, 1611-1619.

Recenzent
Izabella Hyla