

Magdalena Urbaniak<sup>1</sup>, Karol Grudziński<sup>2</sup>Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn  
al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

## WPLÝW SZYBKÓCI ODKSZTAŁCANIA NA CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE TWORZYWA EPOKSYDOWEGO EPY® PODDANEGO OBCIĄŻENIOM ŚCISKAJĄCYM

Przedmiotem badań, przedstawionych w tej pracy, jest specjalne tworzywo epoksydowe o nazwie handlowej EPY®, stosowane na podkłady 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), upraszcza znacznie technologię montażu ciężkich maszyn i urządzeń, dając w efekcie wiele korzyści techniczno-ekonomicznych oraz eksploatacyjnych. Właściwości mechaniczne tego tworzywa determinowane są w dużym stopniu czynnikami związanymi z technologią wytwarzania podkładek fundamentowych, a zwłaszcza warunkami ich utwardzania, jak również z warunkami ich eksploatacji, głównie temperaturą i szybkością odkształcania. Przeprowadzono badania przebiegu procesu utwardzania tworzywa EPY® metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC), które obrazują termogramy przedstawione na rysunku 1. Za pomocą skomputeryzowanej maszyny wytrzymałościowej INSTRON wyznaczono charakterystyki mechaniczne tworzywa dla różnych jego stanów utwardzenia przy różnych szybkościach odkształcania. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 2, 3 i 6. Dokonano analizy wpływu szybkości odkształcania na charakterystyki mechaniczne i wyznaczono wartości wybranych wskaźników wytrzymałościowych przy ścisaniu, istotnych dla praktycznych zastosowań tworzywa EPY® utwardzonego w  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  (rys. 4), jak i dotwardzanego w różnych temperaturach (od  $40$  do  $100^\circ\text{C}$ ) (rys. 6). Analiza uzyskanych wyników badań właściwości mechanicznych wykazała, że mogą one być dobrze opisane za pomocą równania Eyringa (1) (rys. rys. 5 i 7). Oznacza to w efekcie, że wytrzymałość na ścisanie badanego tworzywa, w danym stanie jego utwardzenia, rośnie liniowo wraz z logarytmem szybkości jego odkształcania (rys. 5). Wzrost temperatury dotwardzania tego tworzywa (w zakresie od  $40$  do  $100^\circ\text{C}$ ) powoduje, że jego wrażliwość na zmianę szybkości odkształcania nieznacznie maleje (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, stan utwardzenia, szybkość odkształcania, właściwości wytrzymałościowe

## THE EFFECT OF STRAIN RATE ON THE COMPRESSIVE BEHAVIOUR OF EPOXY COMPOUND EPY®

The object of the investigations described in this paper is a special epoxy material of the trade name EPY® that has been applied to foundation chocks of ship's machinery and installations, and also to many other heavy land-based machines lately. Casting of foundation chocks from this material on the spot, directly under an installed and suitably positioned object (e.g. ship's main engine) considerably simplifies the assembling technology of heavy machines. This technology offers a number of technical, economic and operational advantages. The mechanical properties of this material are determined to a large extent by factors bound with the production technology of foundation chocks and especially by curing conditions as well as by operating conditions, mainly by the temperature and strain rate. The course of curing process for EPY® material was investigated by DSC method. The obtained DSC thermograms are shown in Figure 1. The mechanical characteristics of the material for its different cure states at various strain rates were determined by a computerized testing machine INSTRON. The results of these tests are shown in Figures 2, 3 and 6. Strain rate effect on the mechanical characteristics of the material was subjected to an analyse. The values of some chosen compressive strength parameters, which are essential for practical applications of EPY® material both cured at  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  (Fig. 4) and postcured at various temperatures (from  $40$  to  $100^\circ\text{C}$ ) (Fig. 6), were determined. An analysis of the results obtained from the tests showed that the mechanical properties of EPY® material can be well described by means of the Eyring equation (1) (Figs. 5 and 7). This means that compressive strength of the investigated material in a given curing state linearly increases with the logarithm of strain rate (Fig. 5). An increase of the postcuring temperature of the material (in the temperatures ranging from  $40$  to  $100^\circ\text{C}$ ) results in diminishing its sensitivity to the change of strain rate (Fig. 7). The presented paper makes it possible to better understand the essential mechanical properties of EPY® material treated as a structural material and used to assemble heavy machines and installations which operate in various thermal and loading conditions.

Keywords: epoxy compound, cure conditions, compressive strain rate, mechanical properties

## WSTĘP

<sup>1</sup> dr inż., <sup>2</sup> prof. dr hab. inż.

Rozwój chemii i inżynierii materiałowej, jaki dokonał się w ostatnich dekadach XX wieku, stworzył szerokie możliwości opracowania specjalnych materiałów konstrukcyjnych i technologii, przeznaczonych do ściśle określonych celów, których zastosowanie w praktyce może dać jednocześnie duże korzyści techniczne, ekonomiczne i eksploatacyjne. Przykładem takich materiałów są specjalne tworzywa polimerowe, produkowane na bazie żywic epoksydowych, znajdujące szerokie zastosowanie na podkładki fundamentowe maszyn i urządzeń okrętowych.

Wymagania stawiane tworzywom epoksydowym, przeznaczonym na podkładki fundamentowe maszyn i urządzeń okrętowych, a zwłaszcza silników napędu głównego, są bardzo wysokie, wielorakie i trudne do spełnienia. Dotyczy to zarówno właściwości technologicznych, wytrzymałościowych, jak i eksploatacyjnych. O skali wymagań w tym zakresie niech świadczy to, że uznanie towarzystw klasyfikacyjnych i dopuszczenie do zastosowania w budowie i remoncie statków morskich uzyskały dotąd tylko trzy takie tworzywa. Są to tworzywa o nazwach: Chockfast<sup>®</sup> (prod. amerykańskiej), Epocast<sup>®</sup> (prod. niemieckiej) i EPY<sup>®</sup> (prod. polskiej).

Tworzywo EPY<sup>®</sup> jest rezultatem wieloletnich prac naukowo-badawczych prowadzonych w Katedrze Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Szczecińskiej w ścisłej współpracy z polskim przemysłem stoczniowym i jego zapleczem badawczo-konstrukcyjnym oraz zespołami zajmującymi się montażem maszyn i urządzeń [1, 2]. Tworzywo to i nowoczesna technologia montażu maszyn z jego użyciem, opracowane na potrzeby przemysłu okrętowego, dzięki wielu zaletom, są obecnie coraz szerzej stosowane także w posadawianiu wielu różnych ciężkich maszyn i urządzeń lądowych. Tworzywo EPY<sup>®</sup> ma świadectwa uznania liczących się w świecie towarzystw klasyfikacyjnych nadzorujących budowę i remonty statków oraz certyfikaty europejskich producentów maszyn i urządzeń okrętowych, jak również certyfikaty odpowiednich instytucji, uprawniające do jego stosowania w przemyśle maszynowym, energetyce, górnictwie, budownictwie przemysłowym, budowie mostów itp. [2].

Uzyskanie odpowiednich dla danego zastosowania właściwości mechanicznych tworzyw polimerowych zależy nie tylko od składu chemicznego materiału, ale także od technologii wytwarzania wyrobu i warunków jego eksploatacji. Szczególnie duży wpływ na charakterystyki mechaniczne tych tworzyw mają: w procesie ich wytwarzania - temperatura i czas utwardzania, a podczas eksploatacji - temperatura oraz szybkość odkształcania. Wrażliwość materiału polimerowego na szybkość odkształcania staje się najbardziej wyraźna, gdy jego temperatura osiąga rejon temperatury zeszklenia [3]. Znajomość charakterystyk mechanicznych tworzywa epoksydowego EPY<sup>®</sup>, stosowanego na podkładki fundamen-

towe maszyn, uwzględniających wymienione wyżej czynniki, jest zatem niezbędna do jego racjonalnego zastosowania w różnych warunkach eksploatacyjnych maszyn.

Celem prac badawczych, przedstawionych w tym artykule, było określenie wpływu szybkości odkształcania tworzywa epoksydowego EPY<sup>®</sup> na jego charakterystyki ściskania i wartości wybranych wskaźników, określających zasadnicze właściwości mechaniczne tego tworzywa jako materiału konstrukcyjnego. Próby ściskania przeprowadzono zarówno przy standardowej dla tworzyw polimerowych prędkości posuwu tłoka maszyny wytrzymałościowej (wynoszącej  $v = 1,3 \pm 0,3$  mm/min według normy ASTM D 695-96), jak i przy prędkościach pozastandardowych, odpowiadających różnym szybkościom odkształceń, występującym w warunkach rzeczywistych obciążeń dynamicznych podkładek fundamentowych maszyn i urządzeń technicznych.

## PRACE DOŚWIADCZALNE

### Materiały

Bazę surowcową badanego tworzywa epoksydowego o nazwie handlowej EPY<sup>®</sup> (firmy Marine Service Jaroszewicz) stanowią dwie krajowe żywice epoksydowe i utwardzacz alifatyczny. System epoksydowy uzupełniają napełniacze i specjalne dodatki nadające tworzywom odpowiednie właściwości technologiczne i użytkowe.

### Metodyka badań

Przebieg reakcji utwardzania tworzywa epoksydowego EPY<sup>®</sup> badano za pomocą różnicowego kalorymetru skaningowego DSC 910 firmy Du Pont. Pomiary DSC wykonano bezpośrednio po wymieszaniu składników systemu. Naważkę systemu (ok. 10 mg) umieszczono w zamkniętym naczyniu Al-50  $\mu$ l i ogrzewano w zakresie temperatur od  $-100$  do  $250^{\circ}\text{C}$  w atmosferze azotu, z szybkością  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Następnie schłodzono ją do temperatury  $-100^{\circ}\text{C}$  i ponownie ogrzewano do  $250^{\circ}\text{C}$ , z tą samą szybkością, w celu wyznaczenia temperatury zeszklenia w pełni usieciowanego tworzywa.

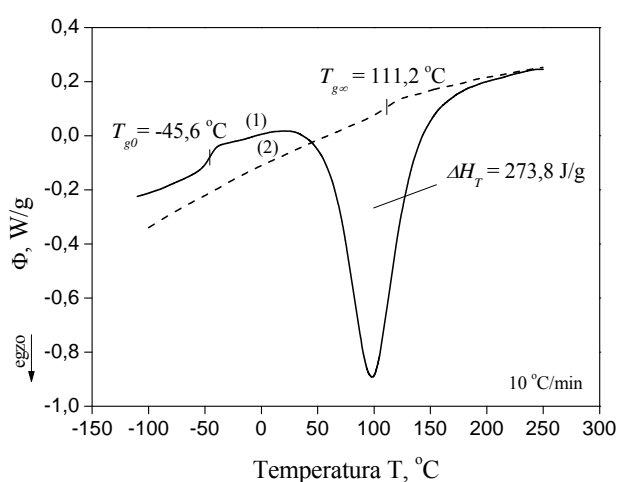
Charakterystyki mechaniczne przy ściskaniu tworzywa z różną szybkością odkształceń wyznaczono przy użyciu skomputeryzowanej maszyny wytrzymałościowej firmy INSTRON Model 8501 Plus. Badania wykonano na próbkach walcowych ( $\phi 20 \times 25$  mm) utwardzonych w temperaturze  $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$  przez 24 h, a następnie dotwardzonych przez 2 h w temperaturach: 40, 60, 80 i  $100^{\circ}\text{C}$ . Tak przygotowane serie próbek (po 5 szt.) poddano jednoosiowemu ściskaniu, aż do ich zniszczenia, z różniącymi się o rząd wielkości szybkościami

odkształceń  $\dot{\epsilon}$ , od 0,0208 do 20,8 min<sup>-1</sup> (co odpowiada prędkościom posuwu tłoka maszyny wytrzymałościowej od 0,13 do 130 mm/min).

## WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

### Proces sieciowania

W procesie sieciowania układu epoksydowego dokonuje się konwersja linearnych i rozgałęzionych łańcuchów w przestrzenną, usieciowaną strukturę. Reakcja izotermicznego sieciowania układu epoksydowego, w wyniku wzajemnego oddziaływania jej kinetyki chemicznej z innymi procesami fizycznymi, takimi jak żelowanie i zeszklenie, powoduje istotne zmiany makroskopowych właściwości fizycznych tego układu [4].



Rys. 1. Termogramy DSC układu epoksydowego EPY<sup>®</sup> uzyskane w pierwszym (1) i drugim (2) ogrzewaniu z szybkością 10°C/min

Fig. 1. DSC thermograms of EPY<sup>®</sup> epoxy system, obtained during the first (1) and the second (2) heating at the rate of 10°C/min

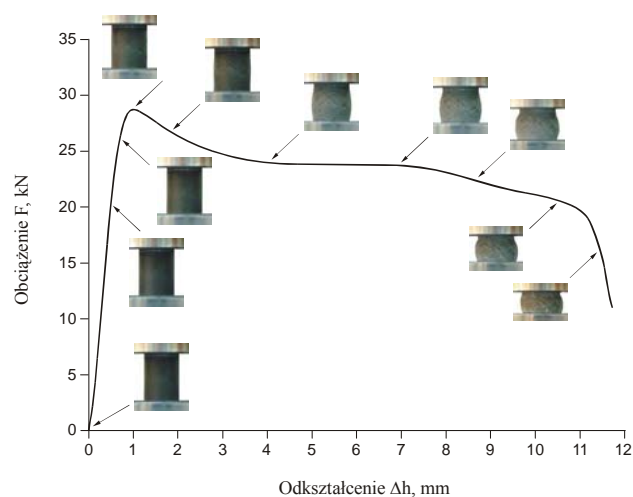
Na rysunku 1 pokazano termogramy DSC przebiegu reakcji sieciowania układu epoksydowego EPY<sup>®</sup>, uzyskane podczas pierwszego i drugiego cyklu ogrzewania z szybkością 10°C/min. Całkowite ciepło egzotermicznej reakcji tego układu wyniosło 273,8 J/g. Gdy system termoutwardzalny sieciuje, jego temperatura zeszklenia rośnie od początkowej wartości  $T_{g0}$  do maksymalnej wartości  $T_{g\infty}$ , która odpowiada całkowicie usieciowanemu materiałowi. Wyznaczone z pierwszego i drugiego cyklu ogrzewania w DSC (rys. 1) wartości temperatur zeszklenia dla układu EPY<sup>®</sup> wynoszą odpowiednio:  $T_{g0} = -45,6^\circ\text{C}$  i  $T_{g\infty} = 111,2^\circ\text{C}$ .

### Charakterystyki mechaniczne tworzywa w funkcji szybkości odkształcania w różnych stanach utwardzenia

Typową krzywą: obciążenie-odkształcenie całkowite dla próbki ściskanej ze standardową prędkością posuwu tłoka maszyny wytrzymałościowej 1,3 mm/min, tj. z

szybkością odkształcania 0,208 min<sup>-1</sup>, przedstawiono na rysunku 2 wraz z kolejnymi fotografiami badanej próbki. Krzywa ta obrazuje typowe zachowanie się podanej ściskaniu próbki tworzywa EPY<sup>®</sup>, utwardzonego w temperaturze 22 ± 1°C przez 24 h, w różnych stadiach jego odkształcania. Po początkowym proporcjonalnym wzroście (stadium liniowo-sprężyste) krzywa ściskania

„zagina się” (stadium nieliniowo sprężysto-plastyczne) i osiąga pik, wyznaczający maksymalne naprężenie ( $\sigma_M$ ), zwane wytrzymałością na ściskanie. Naprężenie  $\sigma_M$  pokrywa się tutaj (w tak utwardzonym tworzywie) z naprężeniem ściskającym zwanym granicą plastyczności ( $\sigma_y$ ). Potem następuje stadium odkształceniowego mięknięcia materiału, a za nim obszerne plateau (stadium prawie doskonałego „plastycznego” płynięcia). W końcowym stadium krzywa gwałtownie opada, a próbka, przy znacznej baryłkowatości, pęka bez odprysków.

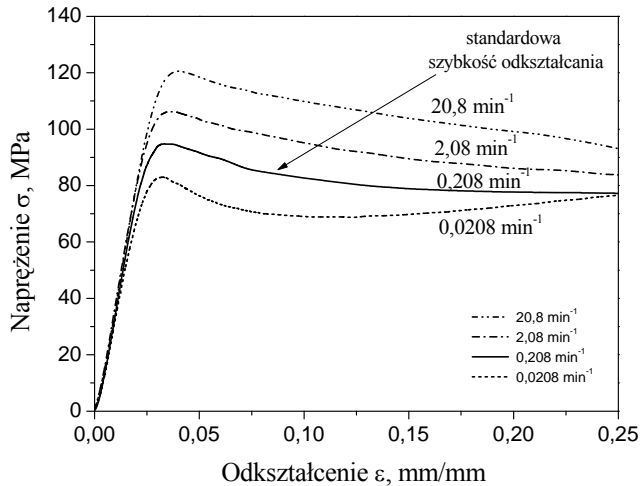


Rys. 2. Krzywa obciążenie-odkształcenie całkowite uzyskana podczas standardowej próby ściskania próbki tworzywa EPY<sup>®</sup> utwardzonego w 22 ± 1°C przez 24 h. Fotografie przedstawiają różne stany odkształcenia próbki

Fig. 2. Load-deformation curve obtained during the standard compression test of EPY<sup>®</sup> epoxy material cured at 22 ± 1°C for 24 h. Different deformation states of the sample are shown in the photographs

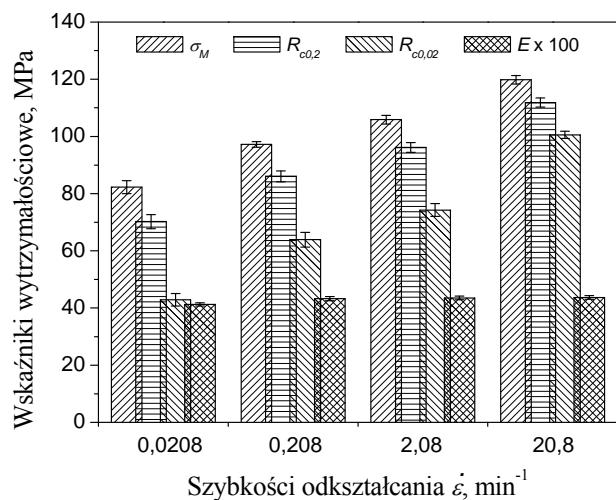
Na rysunku 3 pokazano zachowanie się próbek badanego tworzywa w układzie współrzędnych: naprężenie-odkształcenie względne przy różnych szybkościach odkształcania  $\dot{\epsilon} = 0,0208; 0,208; 2,08$  i 20,8 min<sup>-1</sup>, odpowiadających prędkościom posuwu tłoka maszyny wytrzymałościowej od 0,13 do 130 mm/min. Przebieg krzywych wskazuje, że wraz ze wzrostem szybkości odkształcania zwiększa się wytrzymałość na ściskanie ( $\sigma_M$ ) i stopniowo zmniejsza się rejon mięknięcia odkształceniowego [5]. Na rysunku 4 przedstawiono natomiast wartości wybranych wskaźników wytrzymałościowych ( $\sigma_M$ ,  $R_{c0,2}$ ,  $R_{c0,02}$  i  $E$ ) dla czterech różnych szybkości odkształcania  $\dot{\epsilon}$  próbek badanego tworzywa. Uzyskane wyniki badań wskazują (rys. 4), że wraz ze

wzrostem szybkości odkształcania wartości wytrzymałości na ściskanie ( $\sigma_M$ ), umownej granicy plastyczności ( $R_{c,0,2}$ ) i umownej granicy sprężystości ( $R_{c,0,02}$ ) zwiększają się znacząco, natomiast moduł sprężystości Younga ( $E$ ) wykazuje niewielką tylko zależność od szybkości odkształcania.



Rys. 3. Krzywe naprężenie-odkształcenie względne uzyskane przy różnych szybkościach odkształcania podczas próby ściskania próbek tworzywa EPY<sup>®</sup> utwardzonego w  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  przez 24 h

Fig. 3. Stress-strain curves obtained at various strain rates during the compression test of EPY<sup>®</sup> samples cured at  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  for 24 h



Rys. 4. Wartości wybranych wskaźników wytrzymałościowych dla próbek tworzywa EPY<sup>®</sup> (utwardzonego w  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  przez 24 h) wyznaczone w próbach ściskania z różną szybkością odkształcania

Fig. 4. Values of some chosen strength parameters for EPY<sup>®</sup> material (cured at  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  for 24 h) determined in the compression tests at various strain rates

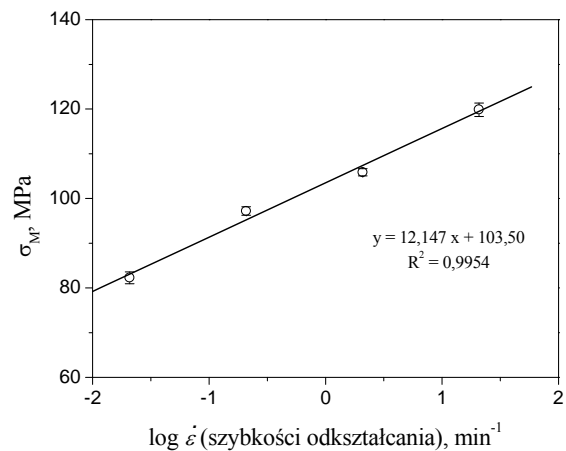
Obserwowane na krzywych naprężenie-odkształcenie (rys. 3) uplastycznienie materiału próbki zachodzi, według teorii Eyringa [6-10], wskutek aktywowanych naprężeniami przeskoków segmentów molekularnych, nazywanych jednostkami przepływu. Naprężenia obniżają barierę aktywacji dla przeskoków tych jednostek i wywołują ich skoordynowany ruch - przepływ układa-

jący się w tzw. pasma ścinania, w których następują względnie duże odkształcenia plastyczne. Wraz z narastaniem takich pasm powiększa się odkształcenie całkowite [11]. W teorii Eyringa [7, 8] zakłada się, że ścinanie ( $\tau$ ) i jednoosiowe naprężenie uplastyczniające ( $\sigma$ ) są logarytmicznie związane z szybkością odkształcania postaciowego przy ścinaniu ( $\dot{\gamma}$ ) następującym równaniem:

$$\tau = \frac{\sigma}{2} = \frac{\Delta H}{v_f} - \frac{kT}{v_f} \ln\left(\frac{\dot{\gamma}_o}{\dot{\gamma}}\right) \quad (1)$$

gdzie:  $v_f$  - objętość aktywacji (lub objętość jednostki przepływu),  $\Delta H$  - energia aktywacji,  $k$  - stała Boltzmana,  $T$  - temperatura bezwzględna,  $\dot{\gamma}$  - szybkość odkształcania postaciowego,  $\dot{\gamma}_o$  - wartość stała szybkości odkształcania postaciowego, która według Padmanabhana [12] wynosi ok.  $10^{13} \text{ s}^{-1}$ .

Wyznaczoną doświadczalnie zależność wytrzymałości na ściskanie ( $\sigma_M$ ) od różnych wartości  $\dot{\epsilon}$  pokazano na rysunku 5. Wzrasta ona liniowo wraz z logarytmem szybkości odkształcania próbki tworzywa w całym badanym zakresie kolejnych rzędów ich wartości. Uzyskano dobrą zgodność wyników badań eksperymentalnych z równaniem Eyringa (1).

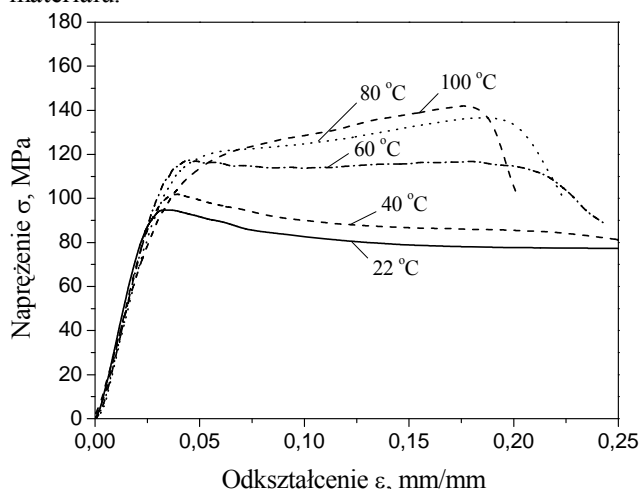


Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie ( $\sigma_M$ ) tworzywa EPY<sup>®</sup> utwardzonego w  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  przez 24 h, w zależności od logarytmu szybkości odkształcania dopasowana do równania Eyringa (1)

Fig. 5. Compressive strength ( $\sigma_M$ ) of EPY<sup>®</sup> material cured at  $22 \pm 1^\circ\text{C}$  for 24 h versus the logarithm of strain rate fitted to the Eyring equation (1)

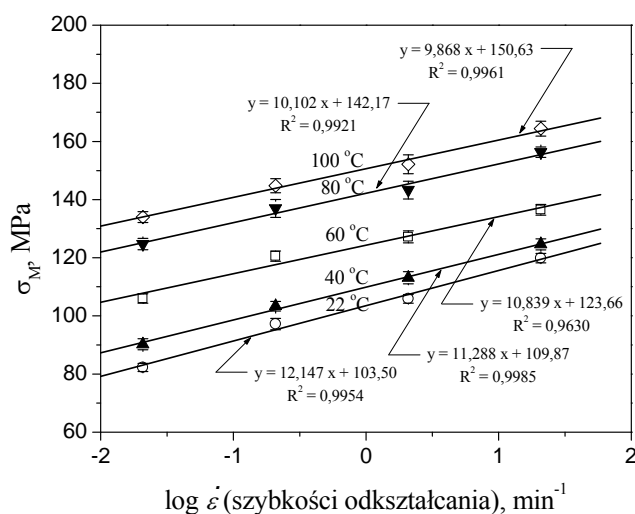
Na rysunku 6, w układzie współrzędnych: naprężenie-odkształcenie, przedstawiono charakterystyki obrazujące zachowanie się badanego tworzywa podczas próby ściskania (ze standardową szybkością odkształcania  $0,208 \text{ min}^{-1}$ ), w zależności od temperatury dotwardzenia próbek. Charakterystyki ściskania dla temperatur dotwardzania  $< 60^\circ\text{C}$  zachowują swój typowy kształt. Przebieg krzywych, czy to w funkcji temperatury (rys. 6) czy szybkości odkształcania (rys. 3) jest podobny. Widoczny na wykresach (rys. 6) rejon mięknięcia od-

kształceniowego oraz rozległy obszar prawie doskonałego „plastycznego” płynięcia stopniowo zmniejszają się wraz ze wzrostem temperatury dotwardzania. Przy temperaturze dotwardzania  $> 60^{\circ}\text{C}$  następuje umocnienie i wyraźne zwiększenie wytrzymałości na ściskanie ( $\sigma_M$ ) materiału.



Rys. 6. Krzywe naprężenie-odkształcenie uzyskane podczas próby ściskania próbek tworzywa EPY® dotwardzanych w różnych temperaturach

Fig. 6. Stress-strain curves obtained during the compression test of EPY® material samples postcured at various temperatures



Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie ( $\sigma_M$ ) w funkcji logarytmu szybkości odkształcania tworzywa EPY® przy różnych temperaturach dotwardzania dopasowana do równania Eyringa (1)

Fig. 7. Compressive strength ( $\sigma_M$ ) versus the logarithm of strain rate for various postcuring temperatures of EPY® material fitted to the Eyring equation (1)

Wytrzymałość na ściskanie ( $\sigma_M$ ) tworzywa EPY®, dotwardzonego w różnych temperaturach (od  $40$  do  $100^{\circ}\text{C}$  przez  $2$  h), rośnie wraz ze wzrostem szybkości odkształcania (rys. 7) i podobnie jak w tworzywie tylko utwardzonym w  $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$  przez  $24$  h (rys. 3) wzrost ten jest liniowy w całym zakresie zmian szybkości odkształcania. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych wytrzymałości na ściskanie ( $\sigma_M$ ) wykazują dobrą zgodność

z wynikami obliczeń według równania Eyringa (1) (rys. 7). Natomiast nachylenia linii  $\sigma_M = f(\dot{\epsilon})$  wskazują, że wraz ze wzrostem temperatury dotwardzania tworzywa jego wrażliwość na zmianę szybkości odkształcania nieznacznie maleje.

## WNIOSKI

Badania wpływu szybkości odkształcania (w zakresie  $0,0208 \div 20,8 \text{ min}^{-1}$ ) na wybrane wskaźniki wytrzymałościowe tworzywa EPY®, przeprowadzone w aspekcie jego zastosowania na podkładki fundamentowe maszyn i urządzeń okrętowych, wykazały, że wytrzymałość na ściskanie tworzywa zarówno w stanie utwardzonym w temperaturze  $22^{\circ}\text{C}$ , jak i dotwardzonym w różnych temperaturach ( $40 \div 100^{\circ}\text{C}$ ) rośnie liniowo wraz z logarytmem szybkości odkształcania. Natomiast ze wzrostem temperatury dotwardzania tworzywa maleje nieco jego wrażliwość na zmianę szybkości odkształcania.

Z przeprowadzonych badań wynika, że szybkość odkształcania przy ściskaniu (w zakresie od  $0,0208$  do  $20,8 \text{ min}^{-1}$ ) ma istotny wpływ na właściwości mechaniczne badanego tworzywa EPY® i powinna być uwzględniona w jego analizie i ocenie jako materiału konstrukcyjnego obciążonego siłami dynamicznymi.

## LITERATURA

- [1] Grudziński K., Rozwój polskich tworzyw i technologii posadawiania na nich maszyn i urządzeń okrętowych, Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska 1993, 7-8, 11-12.
- [2] Grudziński K., Jaroszewicz W., Posadawianie maszyn i urządzeń na podkładkach fundamentowych odlewanych z tworzywa EPY, Wydawnictwo ZAPOL, Szczecin 2005, 19-32.
- [3] 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 crosslink densities, Polymer 1997, 38, 5573-5577.
- [4] Prime R.B., Thermosets, (in:) Thermal Characterization of Polymeric Materials, ed. E.A. Turi, Academic Press, London 1997, vol. 2, 1377-1766.
- [5] Rana D., Sauvart V., Halary J.L., Molecular analysis of yielding in pure and antiplasticized epoxy-amine thermosets, J. Mater. Sci. 2002, 37, 5267-5274.
- [6] Eyring H., Viscosity, plasticity, and diffusion as examples of absolute reaction rates, J. Chem. Phys. 1936, 4, 283-291.
- [7] 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.
- [8] Cook W.D., Mayr A.E., Edward G.H., Yielding behaviour in model epoxy thermosets - II. Temperature dependence, Polymer 1998, 39, 3725-3733.
- [9] Ward I.M., Review, The yield behaviour of polymers, J. Mater. Sci. 1971, 6, 1397-1417.
- [10] Stachurski Z.H., Deformation mechanisms and yield strength in amorphous polymers, Prog. Polym. Sci. 1997,

- 22,  
-474.
- [11] Ashby M.F., Jones D.R., Materiały inżynierskie. Kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów, tom 2, WNT, Warszawa 1996, 290-309.
- 407- [12] Padmanabhan K., Time - temperature failure analysis of epoxies and unidirectional glass/epoxy composites in compression, Composites: Part A 1996, 27A, 585-596.

Recenzent  
Izabella Hyla