

OCENA PRZYDATNOŚCI
ŻYWICY EPOKSYDOWEJ «EPIDIAN 5» DO MODELOWANIA
KONSTRUKCJI*

REINHOLD KAŁUŻA (OPOLE)

1. Wstęp

Materiały używane do modelowania konstrukcji powinny charakteryzować się własnościami umożliwiającymi spełnienie kryteriów podobieństwa fizycznego oraz łatwością modelowania różnych skomplikowanych elementów [1, 2, 3].

Materiały, których cechy fizyczne odpowiadają wymienionym wymogom, podzielić można na [2, 3, 4]: materiały wiążące (gips, mikrobetony, zaprawy specjalne), metale oraz tworzywa sztuczne (termo- i chemoutwardzalne żywice syntetyczne).

W badaniach modelowych konstrukcji, poza badaniami metodą elastooptyki, najszersze zastosowanie do wykonywania modeli znajduje gips, podobnie jak inne materiały wiążące charakteryzuje się stosunkowo małymi wydłużeniami granicznymi [4, 5], wynikającymi z jego kruchości, co uniemożliwia przeprowadzenie badań w zakresie znacznych przemieszczeń. Ponadto gips, ze względu na swą kruchość, na ogół nie nadaje się do wykonywania modeli geometrycznie podobnych do cienkościennych konstrukcji powłokowych, stosowanych np. w budownictwie.

Zamiar wykonania modeli hiperboloidalnych chłodni kominowych podyktował konieczność przeprowadzenia badań materiałowych tworzywa otrzymanego na bazie żywicy epoksydowej «epidian 5» z napełniaczem i z dodatkiem plastyfikatora.

Celem badań, których wyniki zostaną omówione w niniejszej publikacji, było ustalenie wpływu ilości napełniacza mineralnego (cement portlandzki 350), utwardzacza «TECZA» i plastyfikatora (ftalan dwubutyłu), dodanych do żywicy epoksydowej «epidian 5» na takie własności otrzymanego tworzywa, jak:

- jednorodność,
- wytrzymałość na zginanie,
- moduł Younga i współczynnik Poissona,
- zależność naprężenie-odkształcenie,
- wartość współczynnika dysypacji energii sprężystości przy statycznej pętli histerezy.

Ustalono również wpływ cyklicznie zmiennych i długotrwałych obciążeń na odkształcalność tworzywa.

* Praca została nagrodzona na konkursie na prace doświadczalne z mechaniki technicznej — zorganizowanym przez Oddział PTMETS w Krakowie w 1973.

2. Program badań oraz wykonane próbki

Składniki badanego tworzywa dobierano w następujących ilościach w odniesieniu do 100 części żywicy («epidian 5»):

- utwardzacz (trójetyloczteroamina — TECZA) — 7, 8, 9, 10, 12,5, 15 i 10 ns,
- napełniacz (cement portlandzki 350) — 0, 50, 100, 150, 200 i 250 ns,
- plastyfikator (ftalan dwubutyłu) — 0, 7, 15 i 24 ns, gdzie ns oznacza «na 100 części żywicy».

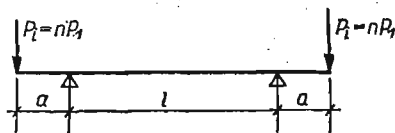
Łącznie wykonano 168 różnych kompozycji tworzywa. Z każdej kompozycji wykonano po 6 próbek pasmowych o grubości $h = 5$ mm, szerokości 40 mm oraz długości 300 mm. Przyjęte grubości próbek, dochodzące do $h = 5$ mm, odpowiadają grubości modeli konstrukcji powłokowych. Proces utwardzania tworzywa próbki przebiega wtedy w podobnych warunkach, jak proces utwardzania tworzywa modelu (przede wszystkim występują podobne warunki termiczne).

Badania dla określenia jednorodności tworzywa przeprowadzono na próbkach pasmowych o wymiarach $5 \times 40 \times 300$ i $10 \times 40 \times 300$ mm oraz na beleczkach $20 \times 40 \times 300$ mm.

3. Technika badań oraz metodyka opracowania wyników

3.1. Uwagi wstępne. Określenie zależności naprężenie-ugięcie, naprężenie-odkształcenie oraz wytrzymałości na zginanie dla badanego tworzywa przeprowadzono na próbkach pasmowych poddanych czystemu zginaniu, skokowo zwiększanym momentem $M = P_1 a$ (rys. 1).

Pomiar ugięć prowadzono czujnikiem mechanicznym 0,01, odkształcenia zaś rejestrowano tensometrami elektrooporowymi RL-20/120. Każdą z próbek pasmowych poddano



Rys. 1. Schemat obciążenia próbki

dwóm cyklom obciążenia w zakresie $1/3$ naprężeń niszczących, rejestrując strzałkę ugięcia oraz odkształcenia podłużne i poprzeczne skrajnych włókien strefy ściskanej i rozciąganej.

Wstępna graficzna analiza zależności naprężenie-ugięcie oraz naprężenie-odkształcenie nasunęła przypuszczenie, że zależności te dla większości badanego tworzywa są liniowe.

Celem zweryfikowania tego przypuszczenia przeprowadzono statystyczną analizę wyników, otrzymanych z pomiarów, określając dla równań zastępczych prostych następujące parametry wyznaczone według metody najmniejszych kwadratów [6, 7, 8, 9]:

- współczynnik regresji naprężenia względem odkształcenia lub ugięcia próbki,
- współczynnik korelacji naprężenia względem odkształcenia i ugięcia próbki oraz
- odchylenie standardowe współczynnika regresji naprężenia względem odkształcenia lub ugięcia próbki.

Poziom istotności korelacji liniowej' zmierzonych zależności naprężenie-ugięcie i naprężenie-odkształcenie, określono przez porównanie obliczonego dla tych zależności współczynnika korelacji z wartościami ujętymi w tablicy korelacji FISCHERA [7].

3.2. Określenie modułu Younga oraz naprężeń niszczących. Moduł Younga E tworzywa określono ze zmierzonej zależności moment-ugięcie oraz naprężenie-odkształcenie, uzyskanej dla dwuwspornikowej próbki obciążonej symetrycznie siłami skupionymi na końcach wsporników (rys. 1), według wzorów [6, 7, 10, 11]:

$$(3.1) \quad E = b \frac{M_1 l^2}{8I} \quad \text{lub} \quad E = b_0 \frac{M_1}{W},$$

gdzie

- M_1 oznacza moment wywołany siłą P_1 ,
- b — współczynnik regresji naprężenia względem ugięcia,
- l — rozpiętość przęsła badanej próbki,
- I — moment bezwładności przekroju poprzecznego próbki,
- b_0 — współczynnik regresji naprężenia względem odkształcenia,
- W — wskaźnik zginania przekroju próbki.

Przedział ufności modułu Younga określono według następujących wzorów [6, 7]:

$$(3.2) \quad (b \pm \bar{t} s_{(b)}) \frac{M_1 l^2}{8I} \quad \text{lub} \quad (b_0 \pm \bar{t} s_{(b_0)}) \frac{M_1}{W},$$

gdzie \bar{t} oznacza bezwzględną wartość rozkładu t przy danych stopniach swobody i żądanym prawdopodobieństwie wystąpienia wartości E .

Naprężenia niszczące R_{zg} określono według zależności [10, 11]

przy $\varepsilon \leq \frac{R_e}{E}$

$$(3.3) \quad R_{zg} = \frac{M_n}{W}$$

oraz przy $\varepsilon > \frac{R_e}{E}$

$$R_{zg} = R_e + E_u \left(\varepsilon - \frac{R_e}{E} \right),$$

gdzie M_n oznacza moment niszczący,

ε — wydłużenie jednostkowe skrajnych włókien próbki,

R_e — granica proporcjonalności tworzywa próbki,

E_u — moduł umocnienia tworzywa.

3.3. Określenie współczynnika Poissona. Współczynnik Poissona wyznaczono dla każdej próbki poddanej dwóm cyklom obciążenia i odciążenia w zakresie do $1/3 R_{zg}$ (naprężeń niszczących).

Współczynniki te obliczono z wyznaczonych współczynników regresji dla zależności naprężenie-odkształcenie, określonej dla kierunku podłużnego (wzdłuż dłuższego boku

próbki) i poprzecznego, oddzielnie dla strefy ściskanej i rozciąganej, według zależności (rys. 2)

$$(3.4) \quad \nu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{b_1}{b_2},$$

gdzie ε_1 oznacza wydłużenie jednostkowe strefy ściskanej lub rozciąganej w kierunku podłużnym,

ε_2 — wydłużenie jednostkowe strefy ściskanej lub rozciąganej w kierunku poprzecznym,

b_1 — współczynnik regresji dla zależności $\sigma - \varepsilon_1$,

b_2 — współczynnik regresji dla zależności $\sigma - \varepsilon_2$.

Przedział ufności dla wyznaczonych współczynników Poissona określono według zależności

$$(3.5) \quad \frac{b_1 + tS(b_1)}{b_2 - tS(b_2)} \geq \nu \geq \frac{b_1 - tS(b_1)}{b_2 + tS(b_2)},$$

gdzie $S(b_1)$, $S(b_2)$ oznacza odchylenie standardowe dla współczynników b_1 i b_2 .

3.4. Określenie współczynnika dysypacji θ energii sprężystości przy statycznej pętli histerezy. Współczynnik dysypacji energii sprężystości dla poszczególnych cykli obciążenie-odciążenie określono na podstawie pomiarów odkształceń ze wzoru

$$(3.6) \quad \theta_i = \frac{\Delta W_i}{W_i},$$

gdzie ΔW_i oznacza energię sprężystości utraconą w i -tym cyklu obciążenie-odciążenie (pole pętli i -tej histerezy),

W_i — maksymalna energia sprężystości próbki w i -tym cyklu obciążenie-odciążenie.

Przyjmując naprężenie za zmienną niezależną a odkształcenie za zmienną zależną, energię sprężystości utraconą w poszczególnym cyklu obciążenie-odciążenie dla kierunku podłużnego próbki ΔW_{li} , można przedstawić w postaci [12]

$$(3.7) \quad \Delta W_{li} = \int_0^{\sigma_w} F_{li}(\sigma) d\sigma,$$

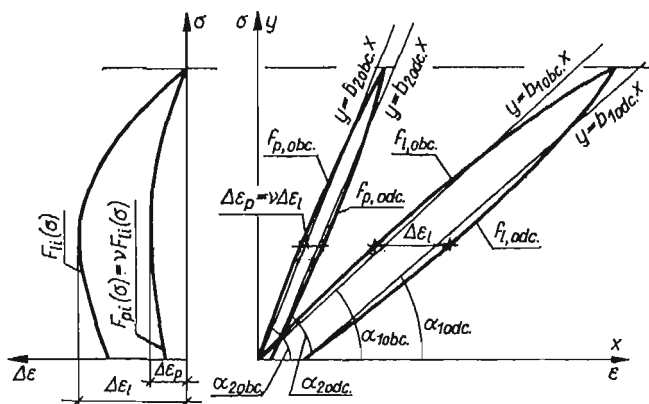
gdzie indeks l oznacza kierunek wzdłuż dłuższego boku próbki, σ_w — maksymalne naprężenie zginające w i -tym cyklu obciążenia (rys. 2), $F_{li}(\sigma)$ — różnica funkcji f_{li} odciążenia i f_{li} obciążenia (rys. 2), przedstawiająca «szerokość» pętli histerezy dla odkształceń jednostkowych w kierunku podłużnym próbki.

Utratę energii sprężystości w kierunku poprzecznym próbki $\Delta W_{pi} = \nu \Delta W_{li}$ przedstawiono według wzoru (3.7) zastępując funkcję podcałkową $F_{li}(\sigma)$ przez funkcję $F_{pi}(\sigma)$, która przedstawia «szerokość» pętli histerezy dla odkształceń jednostkowych w kierunku poprzecznym próbki.

Wykresy funkcji $F_{ii}(\sigma)$ i $F_{pi}(\sigma)$ podano na rys. 2, przy czym wyrażenia $\Delta\epsilon_i$ i $\Delta\epsilon_p = \nu\Delta\epsilon_i$ oznaczają «szerokość» pętli histerezy.

Znając wartość utraconej energii sprężystości ΔW_{ii} i ΔW_{pi} dla strefy ściskanej i rozciąganej tworzywa próbki, można obliczyć wartość współczynnika Poissona również z zależności

$$(3.8) \quad \nu = \frac{\Delta W_{pi}}{\Delta W_{ii}}$$



Rys 2. Schematyczne przedstawienie pętli histerezy oraz funkcji jej szerokości $\Delta\epsilon = F(\sigma)$

Maksymalną oraz utraconą energię sprężystości tworzywa próbki w i -tym cyklu obciążenie-odciążenie obliczono dla każdej próbki stosując uproszczony sposób całkowania, polegający na sumowaniu powierzchni trapezów.

4. Wyniki badań oraz ich omówienie

4.1. Uwagi wstępne. Czysta żywica epoksydowa «epidian 5» utwardzona stechiometryczną ilością aminy alifatycznej «TECZA», jest — jak wiadomo — w temperaturze pokojowej (15–25°C) tworzywem stosunkowo kruchym, o dużej wytrzymałości na zginanie, ściskanie i rozciąganie. Charakteryzuje się ponadto stosunkowo niedużą wartością modułu Younga (około 35 000 kG/cm²) oraz stosunkowo niedużym wydłużeniem względnym przy zniszczeniu (około 5%) [13, 14].

Wprowadzenie do żywicy epoksydowej mineralnego napełniacza, przy jednoczesnym zastosowaniu zewnętrznej plastyfikacji, pozwala na uzyskanie tworzywa o własnościach mechanicznych, zmieniających się w dość znacznych przedziałach. Na rys. 3–6 przedstawiono wpływ utwardzacza («TECZA»), plastyfikatora (ftalan dwubutyli) oraz napełniacza (cement portlandzki 350) na wartości modułu Younga E dla badanego tworzywa. Np. moduł Younga dla utwardzonego tworzywa zależnie od stopnia uplastycznienia, napełnienia i utwardzenia przyjmował wartości od 5000 do 160 000 kG/cm². Natomiast naprężenia niszczące R_{zg} w zależności od składu tworzywa przyjmowały wartości od 50 do 1200 kG/cm².

Wprowadzenie do żywicy epoksydowej «epidian 5» napełniacza (cement portlandzki 350) wpływa na poprawienie własności cieplnych utwardzonego tworzywa, gdyż w miarę zwiększania ilości napełniacza w żywicy epoksydowej wzrasta przewodnictwo cieplne utwardzonego tworzywa, przy jednoczesnym spadku rozszerzalności cieplnej tego tworzywa. Dodanie do żywicy epoksydowej «epidian 5» napełniacza oraz plastyfikatora ma również dodatni wpływ na własności utwardzonego tworzywa z tego względu, że dodatki te wywołują spadek stężenia żywicy i utwardzacza, co wpływa na przedłużenie czasu żelowania i czasu życia kompozycji, jak również na zmniejszenie efektu cieplnego reakcji utwardzania.

4.2. Wpływ stopnia utwardzenia, napełnienia oraz uplastycznienia na wartość modułu Younga badanego tworzywa. Badane tworzywo w zależności od ilości plastyfikatora — ftalan dwubutyli, przy zmiennych ilościach utwardzacza — «TECZA» (7 do 20 ns) oraz napełniacza — cement portlandzki 350 (0 do 250 ns), charakteryzowało się następującymi skrajnymi wartościami modułu Younga $E = 20\ 000$ do $160\ 000$ kG/cm² (przy 0 ns ftalanu dwubutyli), $E = 18\ 000$ do $80\ 000$ kG/cm² (7 ns ftalanu dwubutyli), $E = 5000$ do $60\ 000$ kG/cm² (15 ns ftalanu dwubutyli) oraz $E = 0$ do $40\ 000$ kG/cm² (24 ns ftalanu dwubutyli).

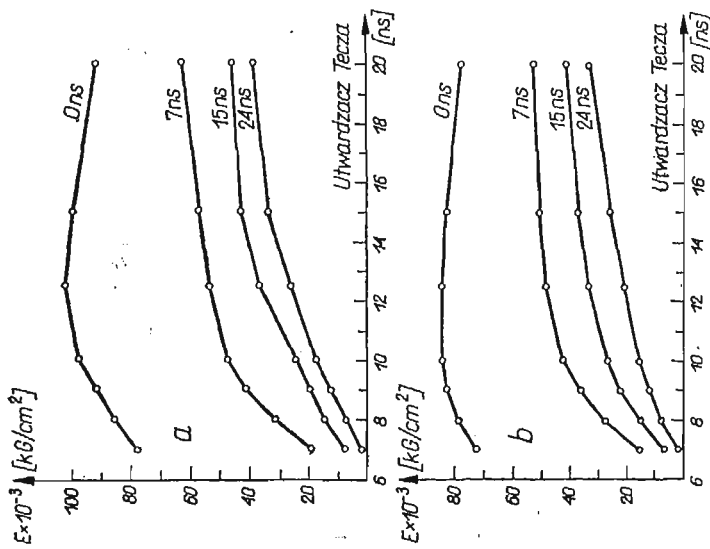
Na rys. 3–6 przedstawiono wpływ utwardzacza «TECZA» oraz plastyfikatora, «ftalan dwubutyli», na wartość modułu Younga przy dodaniu do żywicy epoksydowej «epidian 5» cementu portlandzkiego 350 w ilości 0 ns (rys. 3b), 50 ns (rys. 3a), 100 ns (rys. 4b), 150 ns (rys. 4a), 200 ns (rys. 5) i 250 ns (rys. 6).

Ustalono, że stopniując «ftalan dwubutyli» w ilościach od 7 do 20 ns, można przy stałych stopniach napełnienia żywicy epoksydowej «epidian 5» uzyskać tworzywo o następujących wartościach modułu Younga:

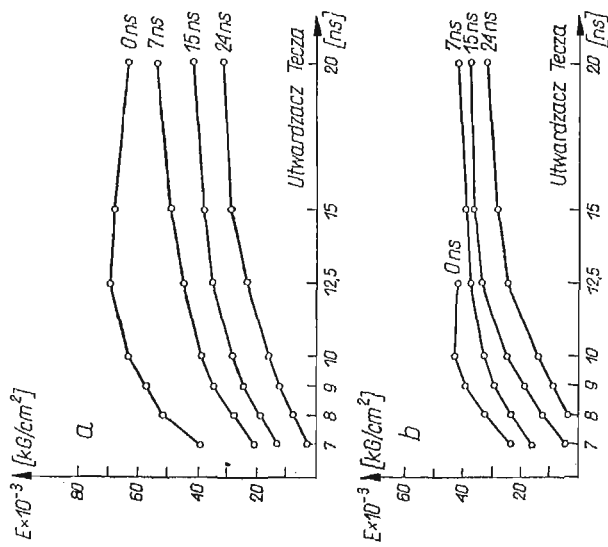
- od ok. 2000 do 40 000 kG/cm² przy 0 ns cementu portlandzkiego 350,
- od ok. 2000 do 70 000 kG/cm² przy 50 ns cementu portlandzkiego 350,
- od ok. 3000 do 80 000 kG/cm² przy 100 ns cementu portlandzkiego 350,
- od ok. 3000 do 100 000 kG/cm² przy 150 ns cementu portlandzkiego 350,
- od ok. 5000 do 130 000 kG/cm² przy 200 ns cementu portlandzkiego 350,
- od ok. 5000 do 160 000 kG/cm² przy 250 ns cementu portlandzkiego 350.

Analizując wpływ utwardzacza «TECZA» na wartość modułu Younga utwardzonego tworzywa należy podkreślić, że zbyt mała ilość aminy, w wyniku słabego usieciowania tworzywa, wpływa niekorzystnie na własności mechaniczne utwardzonego tworzywa, gdyż w bardzo znacznym stopniu zmniejsza sztywność otrzymanego tworzywa.

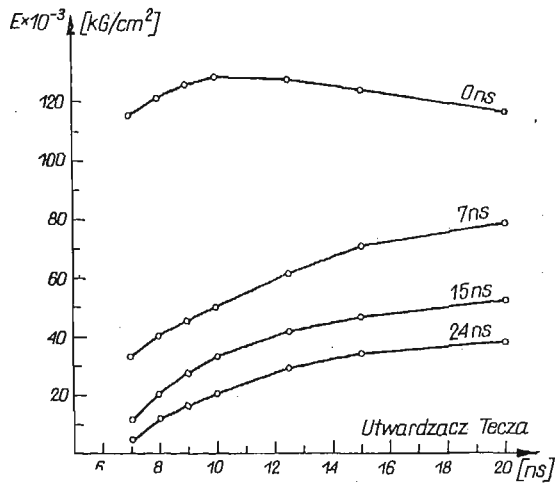
Tworzywo utwardzone utwardzaczem w ilości 0,6 do 0,9 ilości stechiometrycznej jest tworzywem o cechach mechanicznych zmiennych w czasie. Dlatego też podane dolne granice modułów Younga, dla badanego tworzywa, wyznaczone po upływie 21 dni od czasu zmieszania kompozycji żywicy epoksydowej z utwardzaczem, należy traktować jako wartości orientacyjne. Prowadzone obecnie badania potwierdzają dla tego materiału (utwardzacz w ilości mniejszej od ilości stechiometrycznej) tendencje wzrostowe modułu Younga, naprężeń niszczących, jak również zmniejszenia się odkształcalności w miarę upływu czasu. Nadmiar aminy («TECZA») w czystej żywicy, jak również napełnionej



Rys 4. Wpływ dodatku 0, 7, 15 i 24 ns fialanu dwubutyliu na wartość modułu Younga dla tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 100 i 150 ns; a) napełnienie w ilości 150 ns, b) napełnienie w ilości 100 ns

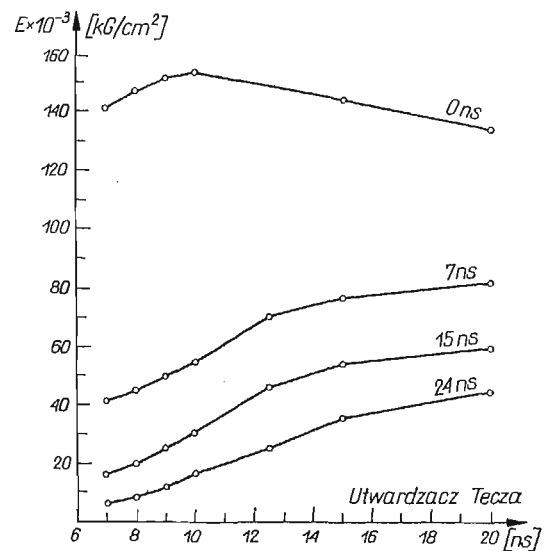


Rys 3. Wpływ dodatku 0, 7, 15 i 24 ns fialanu dwubutyliu na wartość modułu Younga dla tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 50 i 0 ns; a) przy napełnieniu cementem w ilości 50 ns, b) bez dodatku cementu



Rys. 5. Wpływ dodatku 0, 7, 15 i 24 ns ftalanu dwubutylnego na wartości modułu Younga dla tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 200 ns

bez dodatku plastyfikatora (ftalanu dwubutylnego) działa na utwardzone tworzywo plastyfikująco (rys. 3-6). Natomiast w żywicy epoksydowej plastyfikowanej ftalanem dwubutylnym, nadmiar aminy przyspiesza proces utwardzania żywicy, podwyższając między innymi wartość modułu Younga (rys. 3-6).



Rys. 6. Wpływ dodatku 0, 7, 15 i 24 ns ftalanu dwubutylnego na wartości modułu Younga dla tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 250 ns

4.3. Wpływ stopnia utwardzenia, napełnienia oraz uplastycznienia na wartość naprężeń niszczących badanego tworzywa. Naprężenia niszczące przy zginaniu R_{zg} dla badanego tworzywa w zależności od stopnia uplastycznienia, napełnienia i utwardzenia przyjmowały wartości od 20 do 1200 kG/cm². Na wielkość naprężeń niszczących przy zginaniu dla badanego tworzywa wpływają przede wszystkim stopień napełnienia, stopień uplastycznienia oraz stopień utwardzenia.

Naprężenia niszczące R_{zg} dla badanego tworzywa w zależności od stopnia uplastycznienia (0 do 24 ns ftalanu dwubutyłu) oraz stopnia utwardzenia (7 do 20 ns «TECZA»), określono na poziomie:

- od 350 do 1200 kG/cm² przy 0 ns cementu portlandzkiego 350,
- od 150 do 840 kG/cm² przy 50 ns cementu portlandzkiego 350,
- od 80 do 670 kG/cm² przy 100 ns cementu portlandzkiego 350,
- od 60 do 430 kG/cm² przy 150 ns cementu portlandzkiego 350,
- od 110 do 420 kG/cm² przy 200 ns cementu portlandzkiego 350,
- od 50 do 400 kG/cm² przy 250 ns cementu portlandzkiego 350.

Ogólnie można stwierdzić, że większemu napełnieniu oraz uplastycznieniu żywicy epoksydowej «epidian 5» odpowiadają mniejsze wartości naprężeń niszczących. Utwardzacz «TECZA» dodany do żywicy epoksydowej «epidian 5» w ilości mniejszej od stechiometrycznej w znacznym stopniu obniża wartość naprężeń niszczących R_{zg} utwardzonego tworzywa. Zjawisko to należy tłumaczyć przede wszystkim słabym usieciowaniem tworzywa. Tworzywo utwardzone przy tej ilości utwardzacza charakteryzuje się ponadto tendencjami wzrostowymi naprężeń niszczących w czasie. Z tego względu podane dolne wartości naprężeń niszczących R_{zg} , uzyskane dla badanego tworzywa, po upływie 21 dni od czasu zmieszania kompozycji z utwardzaczem, należy traktować jako wartości orientacyjne.

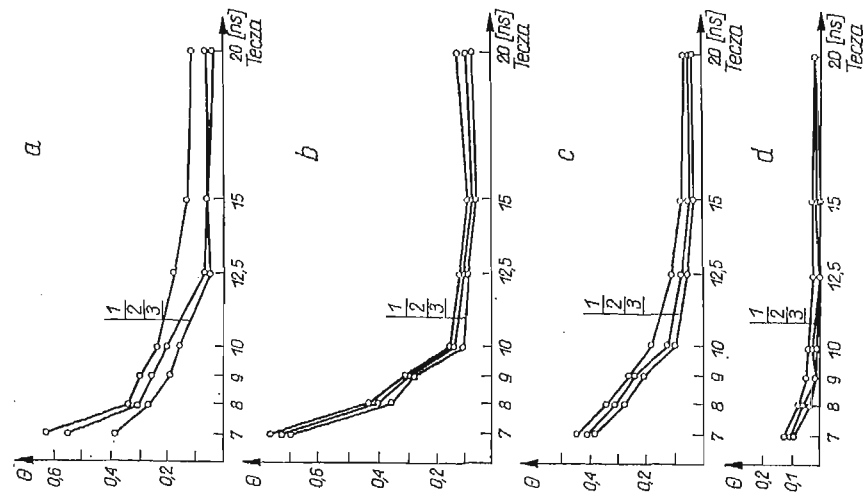
Dodanie do tworzywa utwardzacza «TECZA» w ilości większej od stechiometrycznej wpływa zmniejszająco na wartości naprężeń niszczących R_{zg} dla tworzywa bez dodatku ftalanu dwubutyłu. Natomiast dodanie utwardzacza «TECZA» do tworzywa (plastyfikowanego ftalanem dwubutyłu) w ilości większej od stechiometrycznej, przyspiesza proces utwardzania tego tworzywa, podwyższając jednocześnie wartości naprężeń niszczących R_{zg} .

4.4. Wpływ stopnia uplastycznienia, napełnienia i utwardzenia na odkształcalność badanego tworzywa. Dodany do żywicy epoksydowej «epidian 5» lub tworzywa epoksydowo-cementowego ftalan dwubutyłu wpływa na własności materiałowe utwardzonego tworzywa, zwiększając przede wszystkim jego własności odkształceniowe.

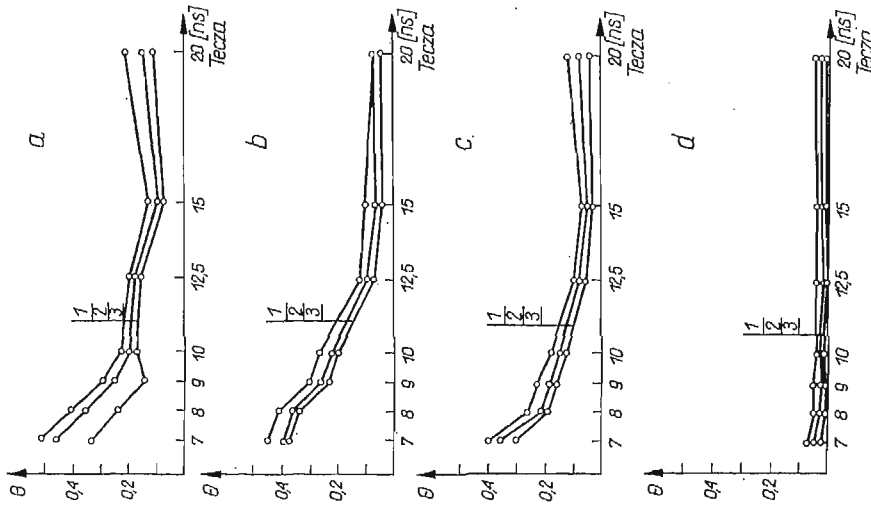
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów odkształceń można, dla badanego tworzywa (utwardzonego utwardzaczem w ilości większej lub równej ilości stechiometrycznej), ustalić zakres liniowej zależności naprężenie-odkształcenie do około 0,5 R_{zg} . Dla tworzywa utwardzonego utwardzaczem w ilości mniejszej od stechiometrycznej zakres liniowej zależności naprężenie-odkształcenie jest znacznie mniejszy i wynosi od ok. 0,0 R_{zg} (przy 6 ns utwardzacza «TECZA») do około 0,3–0,4 R_{zg} (przy 0,9 stechiometrycznej ilości utwardzacza «TECZA»).

Na rys. 7 i 8 przedstawiono wpływ ftalanu dwubutyłu oraz utwardzacza «TECZA» na wartość współczynników dysypacji energii sprężystości dla badanego tworzywa o napełnieniu 250 ns cementem portlandzkim 350. Współczynniki te dla przebadanego tworzywa (przy obciążeniu do 1/3 R_{zg}) przyjmowały wartości zawarte w przedziale od 0 do 0,9. Na wartość współczynników dysypacji energii sprężystości wpływa przede wszystkim ilość utwardzacza oraz ftalanu dwubutyłu dodana do żywicy epoksydowej «epidian 5».

Z przeprowadzonych badań tworzywa na próbkach pasmowych poddanych wpływom cyklicznie zmiennych obciążeń wynika, że obciążenia te zasadniczo nie wpływają na

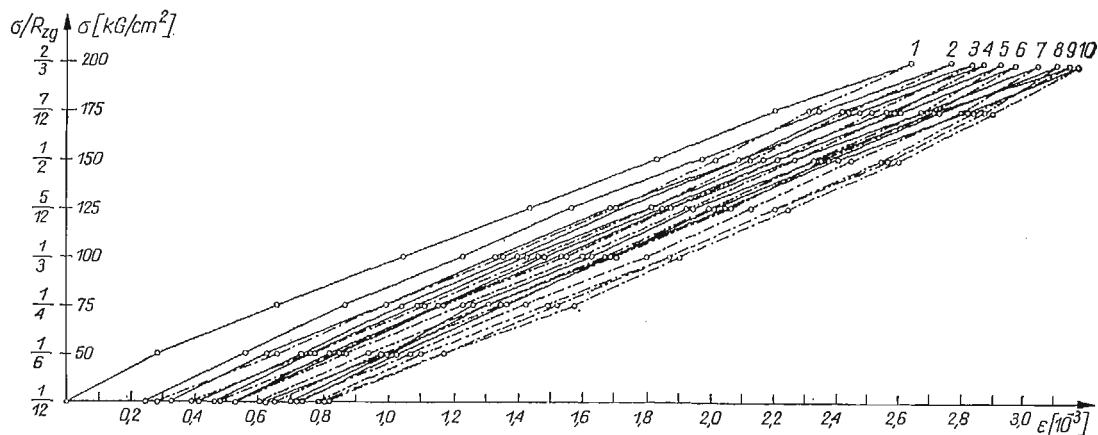


Rys. 7. Wpływ ftalanu dwubutyli oraz utwardzacza «TECZA» na wartość współczynnika dysypacji energii sprężystości tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 200 ns; a) przy 24 ns ftalanu dwubutyli, b) przy 15 ns ftalanu dwubutyli, c) przy 7 ns ftalanu dwubutyli, d) bez dodatku ftalanu dwubutyli (1, 2, oznacza dla 1, 2, 3 pięci histerezy)

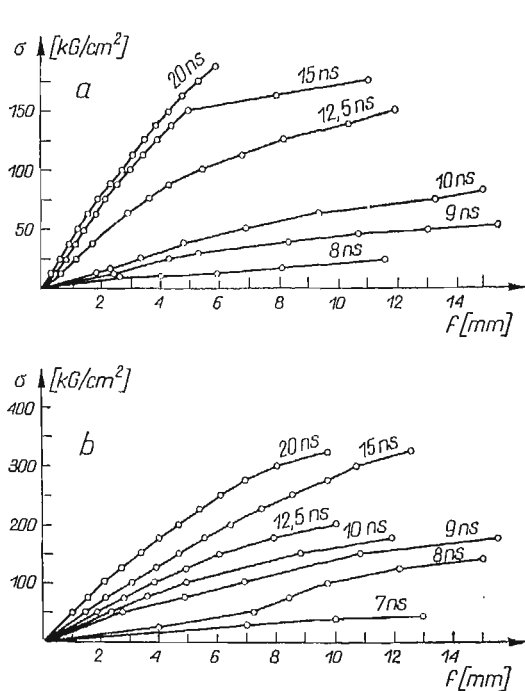


Rys. 8. Wpływ ftalanu dwubutyli oraz utwardzacza «TECZA» na wartość współczynnika dysypacji energii sprężystości tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 250 ns; a) przy 24 ns ftalanu dwubutyli, b) przy 15 ns ftalanu dwubutyli, c) przy 7 ns ftalanu dwubutyli, d) bez dodatku ftalanu dwubutyli; (1, 2, 3 oznacza dla 1, 2, 3 pięci histerezy)

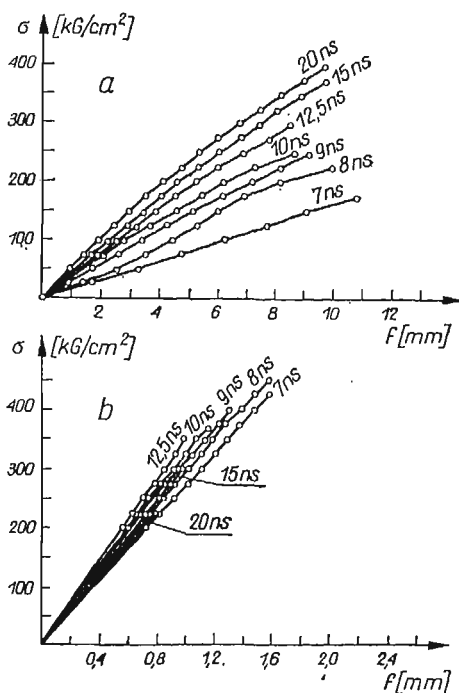
zmianę modułu Younga dla badanego tworzywa. Przykładowy wykres zależności $\sigma - \varepsilon$ dla próbki wykonanej z tworzywa o napełnieniu 250 ns, utwardzonego utwardzaczem «TECZA» w ilości 15 ns z dodatkiem ftalanu dwubutyłu w ilości 15 ns, poddanej 10 cyklom obciążenia-odciążenia podano na rys. 9.



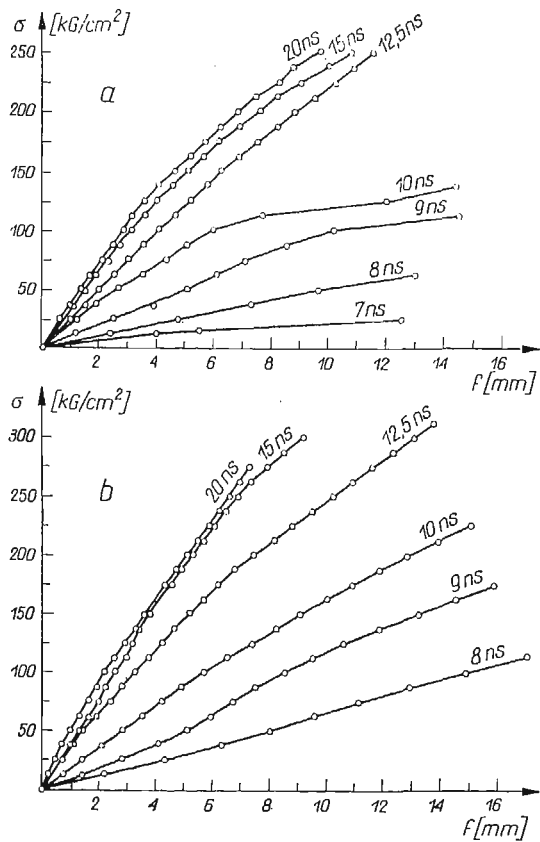
Rys. 9. Wykres $\sigma - \varepsilon$ dla próbki pasmowej poddanej 10 cyklom obciążenia-odciążenia w zakresie do $2/3$ naprężeń niszczących



Rys. 10. Wykres $\sigma - f$ dla tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 250 ns; a) z dodatkiem 24 ns ftalanu dwubutyłu, b) z dodatkiem 15 ns ftalanu dwubutyłu

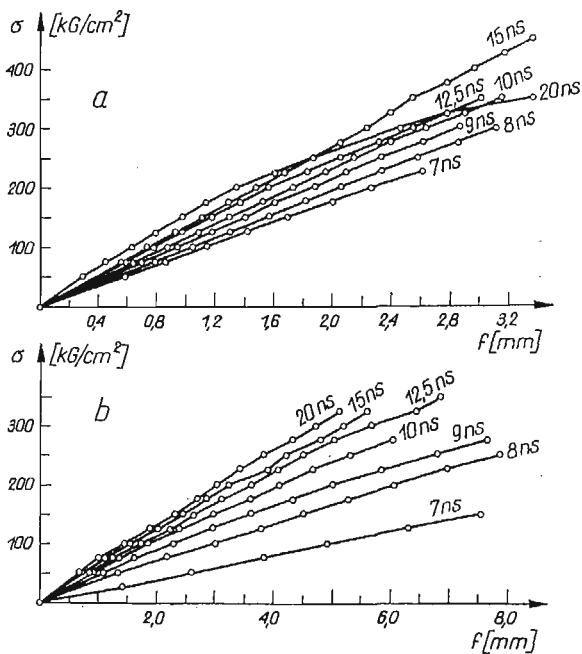


Rys. 11. Wykres $\sigma - f$ dla tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 250 ns; a) z dodatkiem 7 ns ftalanu dwubutyłu, b) bez dodatku ftalanu dwubutyłu



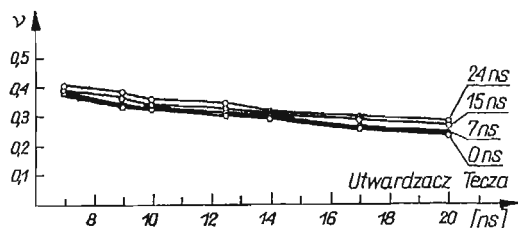
Rys. 12 Wykres $\sigma - f$ dla tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 200 ns; a) z dodatkiem 24 ns ftalanu dwubutyli, b) z dodatkiem 15 ns ftalanu dwubutyli

Rys. 13. Wykres $\sigma - f$ dla tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 200 ns; a) z dodatkiem 7 ns ftalanu dwubutyli, b) bez dodatku ftalanu dwubutyli



Przykładowe wykresy zależności naprężenie-ugięcie uzyskane na próbkach wykonanych z tworzywa o napełnieniu 200 i 250 ns, przy różnych stopniach utwardzenia i uplastycznienia przedstawiono na rys. 10–13.

Przeprowadzone badania wykazały, że współczynnik Poissona dla badanego tworzywa posiada wartości stałe niezależne od poziomu naprężeń. Współczynnik ten dla badanego tworzywa w zależności od składu przyjmował wartości od 0,26 do 0,45. Wpływ ilości utwardzacza oraz plastyfikatora na wartość współczynnika Poissona dla tworzywa napełnionego cementem portlandzkim w ilości 250 ns przedstawiono na rys. 14. Z prze-



Rys. 14. Wpływ utwardzacza i plastyfikatora na wartość współczynnika Poissona dla tworzywa o napełnieniu cementem portlandzkim w ilości 250 ns

prowadzonych badań wynika, że na wartość współczynnika Poissona utwardzonego tworzywa zasadniczo wpływa ilość napełniacza oraz plastyfikatora, a w mniejszym stopniu ilość utwardzacza.

Nadmienić należy, że prowadzone badania tworzywa poddanego wpływom obciążeń długotrwałych wykazują, że tworzywo o napełnieniu większym od 100 ns przy zastosowaniu ftalanu dwubutyłu w ilości mniejszej od 15 ns, można stosować w badaniach modelowych, jeżeli do utwardzenia tego tworzywa zastosowano utwardzacz «TECZA» w ilości większej lub równej ilości stechiometrycznej.

Uzyskane w przeprowadzonych badaniach wartości odchylenia standardowego $s_{(b)}$ dla współczynników regresji b zależności naprężenie-ugięcie oraz naprężenie-odkształcenie zawarte były w przedziale $0,005b \leq s_b \leq 0,02b$.

5. Wnioski i zakończenie

Tworzywo otrzymane poprzez utwardzenie utwardzaczem «TECZA» napełnionej cementem portlandzkim 350, zewnątrznie plastyfikowanej ftalanem dwubutyłu żywicy epoksydowej «epidian 5», charakteryzuje się różnymi własnościami fizyczno-mechanicznymi.

Badane tworzywo w zależności od składu (utwardzacz, napełniacz i plastyfikator) oraz poziomu obciążenia zachowywało się jak materiał liniowo sprężysty ($\theta = 0$), a głównie jako materiał sprężysto-plastyczny względnie nawet plastyczny ($\theta = 1$). Określone w wyniku badań współczynniki dysypacji energii sprężystości dla pasmowych próbek (wykonanych z tworzywa o przyjętych składach), poddanych cyklicznie zmiennym obciążeniom w zakresie do $1/3 R_{zg}$ przyjmowały wartości zawarte w przedziale od 0 do 0,9. Najniższe wartości współczynników dysypacji energii sprężystości otrzymano dla próbek pasmowych wykonanych z tworzywa otrzymanego przez utwardzenie stechiometryczną ilością utwardzacza «TECZA» czystej względnie napełnionej (bez dodatku ftalanu dwubutyłu) żywicy

epoksydowej «epidian 5». Przy zastosowaniu utwardzacza «TECZA» w ilości większej lub mniejszej od stechiometrycznej do utwardzenia czystej względnie napełnionej żywicy epoksydowej «epidian 5» przy jednoczesnym zastosowaniu plastyfikacji zewnętrznej współczynnik ten przyjmował większe wartości i zmieniał się od około 0,1 do 0,9.

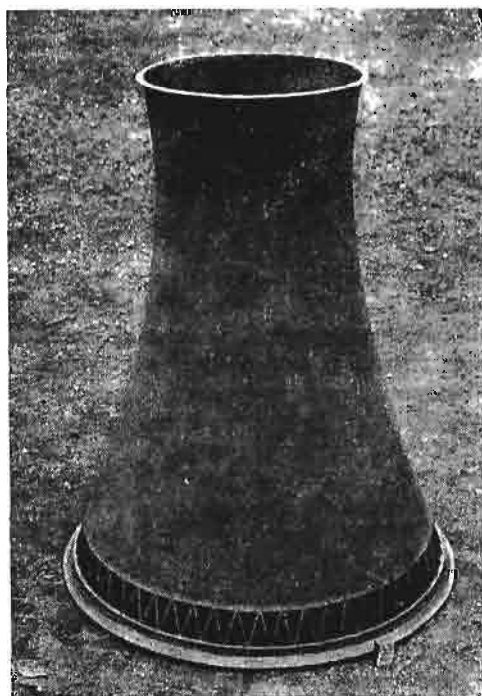
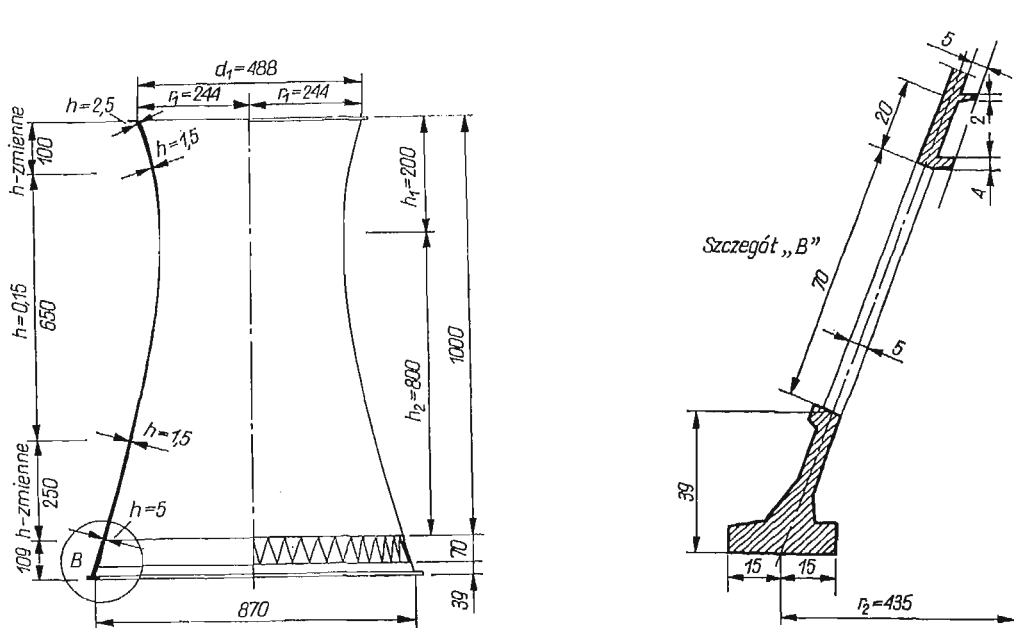
Moduł Younga dla badanego tworzywa w zależności od stopnia uplastycznienia, napełnienia i utwardzenia przyjmował wartości od 5000 do 160 000 kG/cm². Natomiast naprężenia niszczące R_{zg} w zależności od składu tworzywa zmieniały się od 50 do 1200 kG/cm². Stwierdzony w wyniku przeprowadzonych badań wysoki stosunek wytrzymałości na zginanie R_{zg} do modułu Younga E dowodzi dużej odkształcalności tego tworzywa. Badane tworzywo w zależności od przyjętych proporcji składników wykazywało liniową zależność $\sigma - \varepsilon$ praktycznie w zakresie od 0,1 do 0,5 R_{zg} . Materiał «epoksydowo-cementowy» wykazywał liniową zależność naprężenie-odkształcenie w zakresie do 0,3–0,5 R_{zg} , jeżeli do jego utwardzenia zastosowano utwardzacz w ilości większej od 10 ns. Wyznaczone współczynniki korelacji liniowej dla zależności naprężenie-odkształcenie podłużne przy $\sigma \leq 1/3 R_{zg}$, dla próbek wykonanych z tworzywa utwardzonego utwardzaczem «TECZA» w ilości większej od 10 ns, zmieniały się w granicach od 0,9682 do 1,0. Dla wyznaczonych zależności naprężenie-odkształcenie podłużne oraz poprzeczne, próbek wykonanych z tworzywa utwardzonego utwardzaczem «TECZA» w ilości większej od 10 ns, uzyskano bardzo wysokie i zbliżone wartości współczynników korelacji liniowej. Współczynniki te w zależności od składu tworzywa, uzyskane przy obciążeniu próbek pasmowych do $1/3 R_{zg}$, przyjmowały wartości od 0,9668 do 0,999. Tak wysokie współczynniki korelacji liniowej zależności naprężenie-odkształcenie podłużne oraz naprężenie-odkształcenie poprzeczne świadczą o liniowej zmienności tych zależnych. Stwierdzenie to upoważnia do wysunięcia wniosku, że współczynnik Poissona badanego tworzywa nie zależy od poziomu naprężeń i posiada wartość stałą. Współczynnik ten dla badanego tworzywa w zależności od składu przyjmował wartości od 0,26 do 0,45.

Przeprowadzone badania materiałowe modyfikowanej żywicy epoksydowej «epidian 5» wykazały pełną przydatność tego tworzywa do wykonywania modeli obiektów przemysłowych, a w szczególności do konstrukcji powłokowych, poddanych badaniom bezpośrednim, jeżeli do utwardzenia tego tworzywa zastosowano utwardzacz «TECZA» w ilości większej od 10 ns i plastyfikator (ftalan dwubutyłu) w ilości nie większej od 15 ns.

Za możliwością stosowania tego tworzywa do wykonywania modeli obiektów przemysłowych przemawiają między innymi takie cechy mechaniczno-fizyczne, stwierdzone w czasie przeprowadzonych badań, jak: jednorodność, izotropowość, niewysoki moduł Younga, dość duża odkształcalność, stała wartość współczynnika Poissona oraz łatwość formowania dowolnych kształtów, obrabiania i łączenia poszczególnych elementów modelu przy zastosowaniu tego samego tworzywa.

Na rys. 15 pokazano wykonany model kompletnej chłodni kominowej, którego powłokę o zmiennej grubości w granicach od 1,5 do 5,0 mm oraz pierścień i słupki o średnicy 5 mm wykonano z napełnionej plastyfikowanej żywicy epoksydowej (cement portlandzki 350–250 ns, ftalan dwubutyłu — 15 ns, utwardzacz «TECZA» — 15 ns).

Podkreślić należy, że własności fizyczno-mechaniczne plastyfikowanego tworzywa «epoksydowo-cementowego» można dość znacznie regulować, przy czym najlepsze efekty daje łączne zastosowanie napełniacza i plastyfikatora. W ten sposób można uzyskać two-



Rys. 15. Model hiperboloidalnej chłodni kominowej; a) podstawowe wymiary modelu, b) wykonany model

rzywo, które będzie odpowiadać własnościami przyjętej technologii wykonywania modelu, jak również w pewnym stopniu zoptymalizować własności materiałowe utwardzonego tworzywa.

Literatura cytowana w tekście

1. L. MULLER, *Teoria podobieństwa mechanicznego*, WNT, Warszawa 1961.
2. E. SZULC, *Z zagadnień podobieństwa modelowego elementów zbrojonych*, Arkady, Warszawa 1963.
3. O. DĄBROWSKI, T. KOLENDOWICZ, *Badania modelowe metodą Bęgsa układów prętowych, cienkoscien-nych, płyt i powłok*, Prace naukowe Instytutu Inż. Łąd. Pol. Wrocław, Nr 7. Monografie 1, 1972.
4. J. DENKIEWICZ, *Analiza cech fizycznych tworzywa gipsowego jako materiału modelu do badań konstrukcji z betonu*, praca doktorska, Pol. Śląska w Gliwicach, 1970.
5. E. SZYMAŃSKI, *Wpływ wody na cechy techniczne tworzyw gipsowych*, Cement, Wapno, Gips, 7-8 (1962).
6. L. Z. RUMSZYŃSKI, *Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu*, tłum. z j. rosyjskiego, WNT, Warszawa 1973.
7. W. VOLK, *Statystyka stosowana dla inżynierów*, WNT, Warszawa 1965.
8. N. W. SMIRNOW, I. W. DUDIN-BARKOWSKI, *Kurs rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matema-tycznej dla zastosowań technicznych*, PWN, Warszawa 1969.
9. A. STRZAŁKOWSKI, A. ŚLIŻYŃSKI, *Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów*, PWN, Warszawa 1973.
10. A. JAKUBOWICZ, Z. ORŁOŚ, *Wytrzymałość materiałów*, WNT, Warszawa 1973.
11. Z. BRZOSKA, *Wytrzymałość materiałów*, PWN, Warszawa 1972.
12. J. KŁEPACZKO, J. LITOŃSKI, *Statyczna pętla histerezy sprężystej niektórych metali wywołana odkształ-ceniem plastycznym*, Rozprawy Inżynierskie, 4, 12 (1964).
13. Z. BROJER, Z. HERTZ, P. PENCZAK, *Żywice epoksydowe*, WNT, Warszawa 1972.
14. M. IRZYK, J. POGORZELSKI, E. KUKLIŃSKI, *Tworzywa sztuczne w budownictwie*, Arkady, Warszawa 1968.

Р е з ю м е

ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ЭПИДИАН 5 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

В работе определено влияние количества минерального наполнителя (портланд цемент 350), отвердителя (триэтилентетрамин) и пластификатора (дибутилфталат), добавляемых к эпоксидной смоле (Эпидиан 5) на такие свойства компаунда, как однородность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, прочность на изгиб, а также на кривую напряжение—деформация и на значение коэффициента рассеяния упругой энергии при статической петле гистерезиса.

Состав компаунда подбирался в следующих соотношениях (на 100 частей смолы Эпидиан 5): наполнитель — 0, 50, 100, 150, 200, 250 частей, пластификатор — 0, 7, 15, 24 ч., отвердитель — 7, 8, 9, 10, 12,5, 15, 20 ч.

Компаунд исследовался на планочных образцах, подвергаемых чистому изгибу путем наложения скачкообразно меняющегося изгибающего момента. Каждый из планочных образцов исследовался при двух циклах нагрузки—разгрузки в пределах 1/3 разрушающих напряжений.

Деформации измерялись с помощью тензометрических датчиков РЛ-20/120, а прогибы с помощью стрелочного щупового индикатора с ценой деления 0,01 мм.

Исследуемый материал характеризуется различными физико-механическими свойствами. В зависимости от состава (наполнитель, отвердитель, пластификатор) и от уровня нагрузки он ведет себя как линейно-упругий, упруго-пластический (главным образом) или даже как пласти-ческий материал.

Исследования показали полную пригодность исследуемого материала для изготовления моделей промышленных объектов, а в частности оболочковых конструкций, если только применялся для отверждения компаунда отвердитель ТЭТА (триэтилентетрамин) в количестве более, чем 10 частей и пластификатор (дибутилфталат) не более, чем 15 ч. на сто частей смолы.

Summary

ESTIMATION OF SUITABILITY OF «EPIDIAN 5» EPOXY RESIN FOR STRUCTURE MODELLING

Influence of amount of mineral filler (portland cement 350), hardener («TECZA») and plasticizer (dibutyl phthalate) added to epoxy resin «Epidian 5» on homogeneity, bending strength, modulus of elasticity, Poisson modulus, stress-strain relation, coefficient of dissipation of potential energy of elastic deformation (for static hysteresis loop) of tested material is analysed. Ingredients of material are as follows (for 100 parts of «Epidian» 5 epoxy resin) filler: 0, 50, 100, 150, 200, 250 ns; plasticizer: 0, 7, 15, 24 ns; hardener: 7, 8, 9, 10, 12.5, 15, 20 ns;

Tests were carried out using samples subjected to bending. Every sample was subjected to two loading-unloading cycles in range of one-third of ultimate stress. Strains and deflections were measured with tensometer gauges and dial indicators respectively. Tested material has various physical and mechanical properties. These properties are similar to linearly-elastic and (mainly) to elasto-plastic materials, or even to plastic ones.

Tests have proved complete usefulness of this material for making models of industrial objects, especially for shell structures, providing following amounts of ingredients: «TECZA» hardener greater than 10 ns, dibutyl phthalate plasticizer less than 15 ns.

ZESPÓŁ BUDOWNICTWA OGÓLNEGO I PRZEMYSŁOWEGO WSI, OPOLE

Praca została złożona w Redakcji dnia 4 lutego 1974 r.
