

PEŁZANIE ANIZOTROPOWYCH KOMPOZYTÓW POLIMEROWYCH W PŁASKIM STANIE NAPRĘŻENIA PRZY OBCIĄŻENIACH NIESTACJONARNYCH⁽¹⁾

ROMAN C U P I S Z i STANISŁAW O C H E L S K I (WARSZAWA)

Praca przedstawia wyniki badań statycznych i reologicznych ortotropowego kompozytu polimerowego oraz kompozytu wzmocnionego w jednym kierunku. Zaproponowano model kompozytu polimerowego opisujący niestacjonarne pełzanie w płaskim stanie naprężenia. Porównano wyniki badań doświadczalnych z wynikami uzyskanymi z ujęcia analitycznego pełzania kompozytów. Program badań obejmował niestacjonarne złożone stany naprężenia zrealizowane przy jednoczesnym działaniu siły rozciągającej i momentu skręcającego próbki rurowe.

1. WSTĘP

W dziedzinie reologii kompozytów prace naukowo-badawcze teoretyczne rozwijają się w dwóch zasadniczych kierunkach: fenomenologicznym i statystycznym. Podstawowym celem jest opracowanie związków pomiędzy składowymi tensorów stanu naprężenia i odkształcenia, z uwzględnieniem cech reologicznych, przy różnych programach obciążenia i temperatury w szerokim zakresie zmian innych parametrów stanu.

Teorie typu fenomenologicznego wymagają doświadczalnego wyznaczenia licznych funkcji materiałowych przy wielu zmiennych w czasie parametrach stanu. Podobnie teorie statystyczne wymagają wprowadzenia założeń strukturalnych i aby odpowiadały one obiektywnej rzeczywistości, trzeba przeprowadzić złożone badania doświadczalne.

⁽¹⁾Praca wykonana w ramach tematu w CPBP 02.01

Kompozyty, dzięki charakterystycznej strukturze wewnętrznej, przejawiają już nawet w normalnych temperaturach cechy reologiczne. W zależności od stanu fizycznego, stanu naprężeń, budowy, temperatury badania i czasu, przebiegają złożone procesy fizykochemiczne, których rezultatem są zmiany ukierunkowania, konfiguracji czy też usieciowania przestrzennego.

Badania szczegółowe były prowadzone przez wielu autorów, na przykład [1 - 6], lecz porównywanie wyników, hipotez obliczeniowych natrafia na duże trudności. Składa się na to wiele przyczyn, między innymi, duża wrażliwość procesów reologicznych na niejednorodność badanego tworzywa, brak usystematyzowanych schematów badań prowadzi do uzyskiwania nieporównywalności danych doświadczalnych i utrudnia uogólnienia.

Równania konstytutywne opisujące model ciała fizycznego, jeżeli mają być możliwie dokładną aproksymacją obiektywnej rzeczywistości, zawierają liczne parametry i funkcje, które można wyznaczyć tylko eksperymentalnie. Dokładność takiego opisu matematycznego zależy od przyjęcia modelu o określonej liczbie stopni swobody oraz od precyzji i metodyki badań doświadczalnych.

W niniejszej pracy postanowiono określić doświadczalnie charakterystyki reologiczne w płaskim stanie naprężenia dwóch kompozytów polimerowych, różniących się budową anizotropową oraz zaproponować model kompozytu opisujący niestacjonarne pełzanie w płaskim stanie naprężenia.

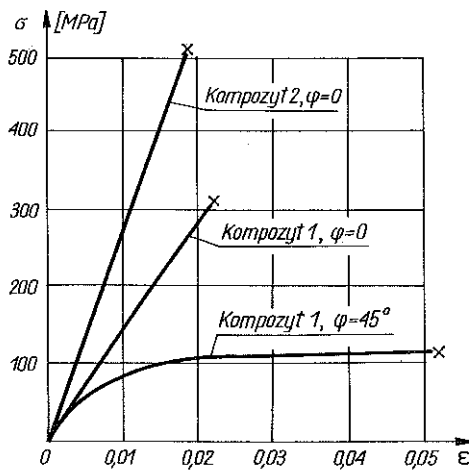
2. PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem badań są kompozyty polimerowe, otrzymane z żywicy epoksydowej i włókien szklanych. Kompozyty polimerowe należą do materiałów o złożonej budowie - ich własności są uzależnione od cech poszczególnych składników, ich udziałów procentowych i orientacji włókien oraz licznych czynników technologicznych związanych z procesem wytwarzania.

Badaniom poddano dwa rodzaje kompozytów polimerowych: kompozyt 1, ortotropowy, składający się z żywicy epoksydowej E-53 i tkaniny szklanej STR-58; kompozyt 2, jednokierunkowo wzmocniony,

Tablica 1.

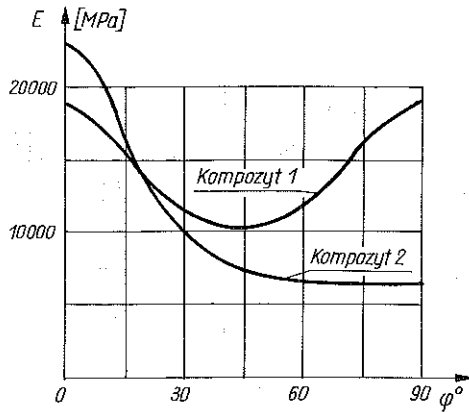
	kompozyt 1		kompozyt 2
$E_{11} = E_{22}$ MPa	13900	E_{11} MPa	19534
E_{33} MPa	6560	$E_{22} = E_{33}$ MPa	4892
E_{12} MPa	1134	$E_{13} = E_{12}$ MPa	1681
$E_{13} = E_{23}$ MPa	1869	$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,454
$\nu_{12} = \nu_{21}$	0,1628	$\nu_{23} = \nu_{32}$	0,493
$\nu_{13} = \nu_{23}$	0,3459		
$\nu_{31} = \nu_{32}$	0,1630		



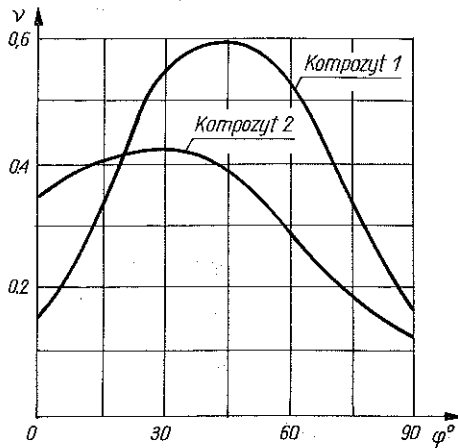
Rys. 1 Zależności między naprężeniami i odkształceniami wzdłużnymi przy rozciąganiu

składający się z żywicy E-53 i równolegle ułożonych pasm ciągłych włókien szklanych (rowing) ES10-400-0-60. Kompozyty otrzymywano w postaci płyt, rurek i próbek owalnych. Technologię otrzymywania próbek podano w [7]. Zawartość szkła w kompozycie 1 wynosiła 0,503 a w kompozycie 2 - 0,496. Wszystkie rodzaje próbek po spolimeryzowaniu żywicy były wygrzewane w celu zakończenia procesu polimeryzacji. Cykl wygrzewania wynosił 24 godziny z maksymalną temperaturą 80°C.

Do opisu przyjęto układ współrzędnych prostokątnych 1, 2, 3, który był na stałe związany z tworzywem: kierunek 1 - odpowiadał kierunkowi osnowy tkaniny w kompozycie 1 i kierunkowi ułożenia pasm rowingu w kompozycie 2, kierunek 2 pokrywał się z kierunkiem wątku, a kierunek



Rys. 2 Zależności modułów sprężystości podłużnej od kierunku rozciągania.

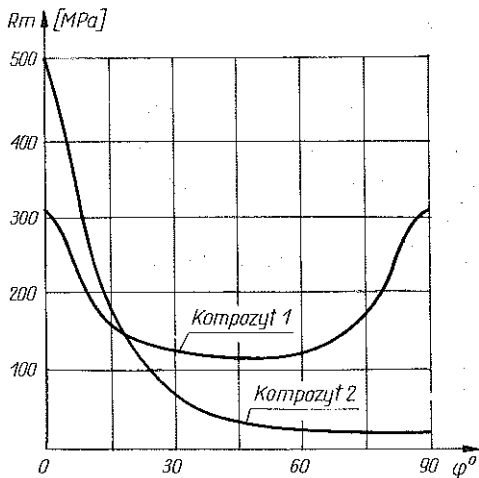


Rys. 3 Zależności współczynników Poissona od kierunku rozciągania.

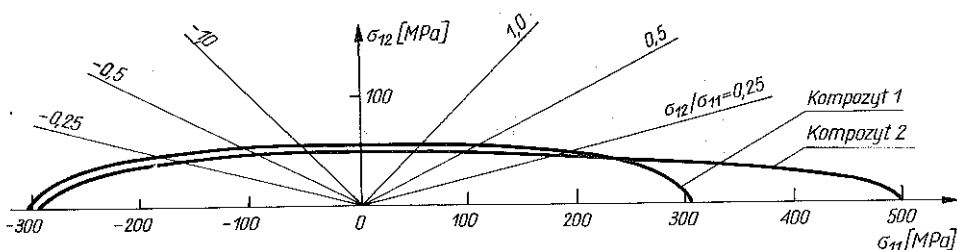
3 był prostopadły do warstw tkaniny (do kierunku 1 i 2).

W badaniach statycznych określono stałe sprężystości kompozytów oraz wytrzymałość w płaskim stanie naprężenia. Do określenia stałych sprężystości wykorzystano metodę podaną w [8], a wartości stałych zestawiono w tabelicy 1. W kompozycie 1 liczba włókien osnowy i wątku w tkaninie jest jednakowa, co powoduje, że takie same są własności mechaniczne tworzywa w kierunkach 1 i 2.

Zbadano też własności anizotropowe kompozytów, czyli określono charakter zmian własności mechanicznych w płaszczyźnie 1, 2 kompo-



Rys. 4 Zależności wytrzymałości na rozciąganie od kierunku obciążenia



Rys. 5 Powierzchnie wytrzymałości kompozytów w płaskim stanie naprężenia

zytów. Wyniki badań przedstawiono na rys.1-4, gdzie φ oznacza kąt zawarty między osią próbki, a kierunkiem włókien ciągłych w kompozycie 2 lub kierunkiem osnowy tkaniny w kompozycie 1.

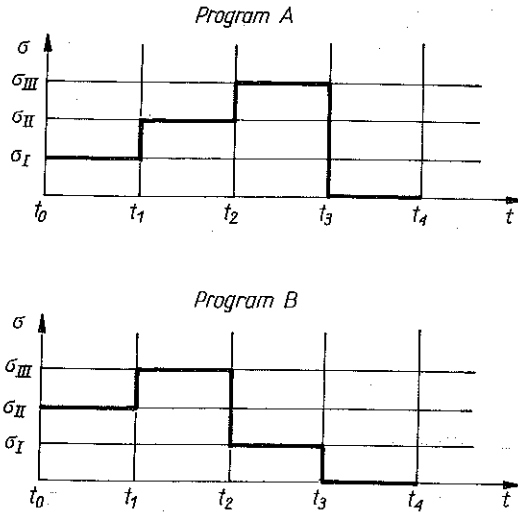
Określenie wytrzymałości kompozytów w płaskim stanie naprężenia przeprowadzono na urządzeniach opisanych w p.3. Zastosowano próbki rurkowe o długości 220 mm, długości pomiarowej 50 mm, średnicy zewnętrznej 43,5 i średnicy wewnętrznej 39,5mm. Skręcanie z jednoczesnym rozciąganiem lub ściskaniem przeprowadzono dla stosunków naprężeń stycznych do normalnych równych

$$\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0, 0,25, 0,5, 1,0, \infty.$$

Wyniki badań przedstawiono na rys.5 dla prędkości naprężenia równej $\dot{\sigma} = 0,25$ [MPa/s].

3. METODA I WYNIKI BADAŃ PELZANIA

Budowa równań konstytutywnych adekwatnie opisujących zachowanie się materiału w warunkach pełzania wymaga wyników badań doświadczalnych, prowadzonych przy obciążeniach złożonych. Konieczne jest też prowadzenie badań pełzania nie tylko w złożonych stanach naprężenia, ale również przy zmiennych naprężeniach.

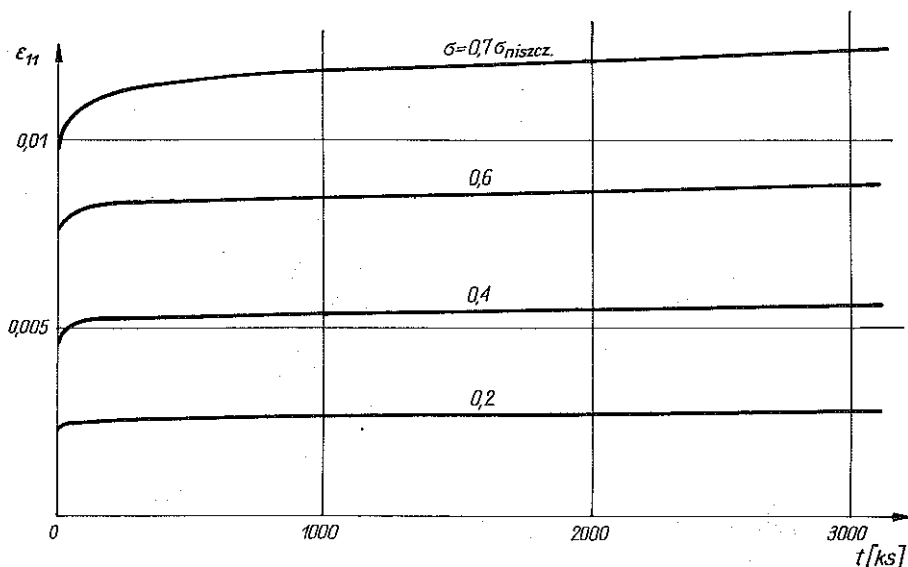


Rys. 6 Programy obciążeń zrealizowane podczas badań.

Program badań obejmował pełzanie kompozytu 1 w płaskim stanie naprężenia przy stałym stosunku

$$\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0, 0,25, 0,5, 1,0, \infty.$$

Obciążano próbki zachowując stały stosunek σ_{12}/σ_{11} , a więc po trajektorii prostej. Nie podjęto badań dla stosunku $\sigma_{12}/\sigma_{11} > 1$, ponieważ z badań wstępnych wynikało, że wyniki są zbliżone do otrzymanych w stanie $\sigma_{12}/\sigma_{11} = \infty$. Zrealizowano programy obciążenia stałego w czasie dla $\sigma_i = \text{const} (i = 1, 2 \dots 4)$ i dwa programy trójstopniowej zmiany naprężenia, które przedstawiono na rys.6. Czas trwania poszczególnych stopni obciążenia był jednakowy $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = t_4 - t_3$, a czas trwania cyklu $t_4 = 96h = 345,6ks$ oraz $t_1 = 10h = 36ks$. Czas obciążenia stałego wynosił $t = 1000ks$. Dla kompozytu 2 program badań obejmował pełzanie przy rozciąganiu w kierunku włókien według

Rys. 7 Izobaryczne krzywe pelzania kompozytu 1 przy $\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0$

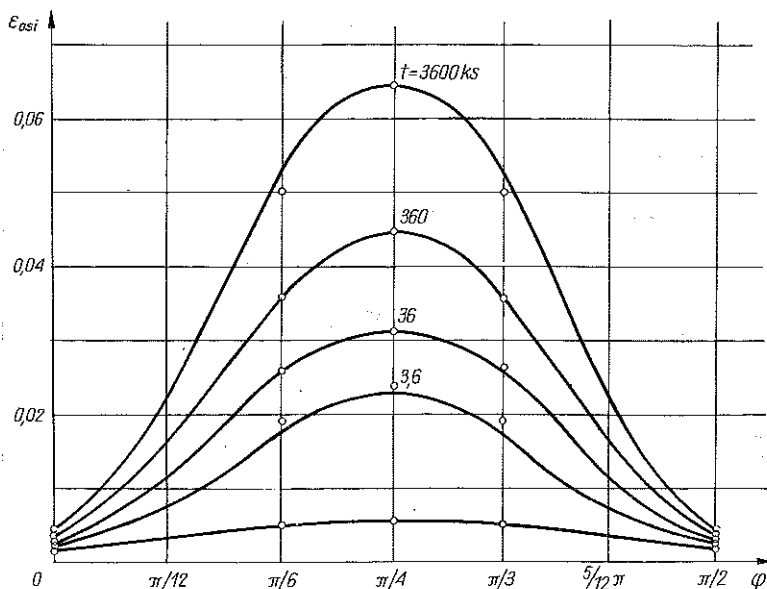
programów jak dla kompozytu 1. Zestawienie wartości naprężeń dla poszczególnych stopni obciążenia kompozytu 1 przedstawiono w tabl.2.

Tablica 2.

$\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{11}}$		0	0,25	0,5	1,0	∞
σ_I	σ_{11} MPa	41,17	35,9	20,99	13,32	0
	σ_{12} MPa	0	9,04	10,48	13,32	10,36
σ_{II}	σ_{11} MPa	83,34	71,81	41,99	26,64	0
	σ_{12} MPa	0	18,09	20,95	26,64	20,72
σ_{III}	σ_{11} MPa	123,51	107,71	62,98	39,97	0
	σ_{12} MPa	0	27,13	31,43	39,97	31,08

Program badań obejmuje również analizę metod opisu zjawisk pelzania, opracowanie metody opisu i algorytmu obliczeń dostosowanego do metody elementów skończonych, opracowanie programu poszerzającego możliwości systemu programów MES dla obciążeń konstrukcji z kompozytów polimerowych z uwzględnieniem pelzania.

Badania pelzania kompozytów w złożonym stanie naprężenia prze-



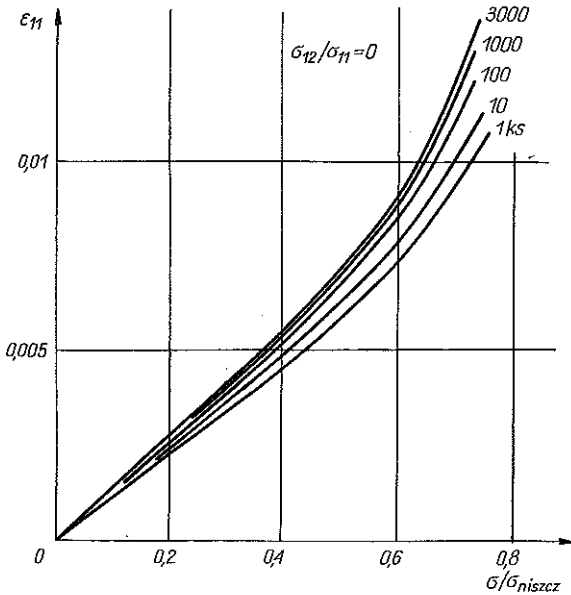
Rys. 8 Izochroniczne zależności odkształceń $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{11}(t, \varphi)$ kompozytu 1

przewodzone na wykonanym w tym celu urządzeniu, które składa się z następujących zespołów: pełzarki DST-5000, zespołu realizującego skręcanie, rewersu i zasilacza hydraulicznego. Urządzenie to szczegółowo zostało opisane w [7,9]. Natomiast w [5] podano metody pomiaru odkształceń.

Przeprowadzone badania pełzania kompozytów w płaskim stanie naprężenia dostarczyły zależności składowych tensora odkształceń od naprężeń i czasu w postaci:

$$(3.1) \quad \begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \varepsilon_{11}(\sigma_k, t_k, t, T = \text{const}), \\ \varepsilon_{22} &= \varepsilon_{22}(\sigma_k, t_k, t, T = \text{const}), \\ \varepsilon_{33} &= \varepsilon_{33}(\sigma_k, t_k, t, T = \text{const}), \\ \varepsilon_{12} &= \varepsilon_{12}(\sigma_k, t_k, t, T = \text{const}). \end{aligned}$$

Jak już zaznaczono, układ osi 0123 jest układem prostokątnym pokrywającym się z głównymi osiami anizotropii. W tak przyjętym układzie płaski stan naprężenia $(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})$ nie powoduje powstania odkształceń ε_{23} i ε_{13} . Wartości średnie odkształceń z poszczególnych prób posłużyły do zbudowania wykresów pełzania oznaczonych jako izobaryczne krzywe pełzania (rys.7) dla $\sigma_{ij} = \text{const}$ w cyklu i stosunku



Rys. 9 Izochroniczne krzywe pelzania kompozytu 1

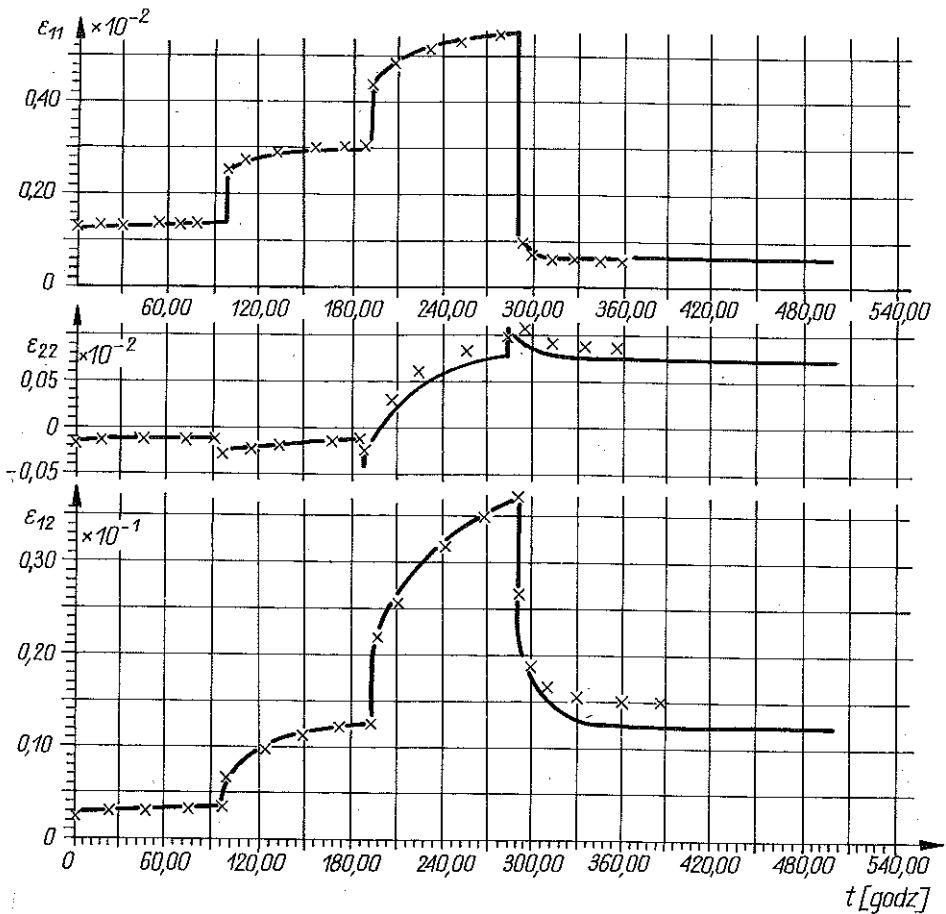
$$\sigma_{12}/\sigma_{11} = \text{const.}$$

Na podstawie prób pelzania przeprowadzonych aż do zniszczenia próbek stwierdzono, że nie występuje trzeci okres pelzania, tzn. szybki wzrost odkształceń w czasie zniszczenia.

Własności anizotropowe kompozytów nie tylko znacznie zmieniają wartości odkształceń w zależności od czasu obciążenia i wartości naprężeń, lecz także charakter krzywych. Zależności te, które są przedstawione na rys.8 w postaci funkcji izochronicznych wyraźnie ujawniają anizotropowy charakter pelzania.

Stopień nieliniowości odkształceń pelzania w zależności od naprężeń określono na podstawie wyników badań kompozytów, na podstawie których zbudowano zależności izochroniczne (rys.9). Silna nieliniowość tych zależności występuje przy naprężeniach większych i gdy kąt zawarty między naprężeniem głównym, a główną osią anizotropii jest większy.

Zgodnie z programem przeprowadzono badania pelzania przy obciążeniach niestacjonarnych izotonicznych. Zastosowano dwa różne cykle zmian obciążenia o czasie trwania 2,5h i 96h. Dwa programy zmian obciążania umożliwiły porównanie wpływu historii obciążania na odkształcenia pelzania, jak i na nawrót odkształceń po odciążeniu. Na



Rys. 10 Krzywe pełzania kompozytu 1 przy $\sigma_{12}/\sigma_{11} = 0,5$ według programu obciążenia A.
x - wyniki doświadczalne

wartość odkształceń pełzania mają wpływ: stan naprężeń, czas trwania cyklu, historia obciążenia. Wpływ powyższych czynników jest uwarunkowany zarówno własnościami anizotropowymi i lepkosprężystymi kompozytów polimerowych, jak i stopniem nieliniowości. Doświadczalnie określone zmiany składowych tensora odkształceń pełzania w czasie, które jako średnie z pięciu prób, na przykład dla przypadku $\sigma_{12}/\sigma_{22} = 0,5$, przedstawiono na rys.10

4. NUMERYCZNY MODEL KOMPOZYTU POLIMEROWEGO

Na podstawie doświadczalnych wyników badań można stwierdzić, że model fizyczny kompozytów polimerowych to ciało anizotropowe, nieściśliwe, nieliniowo sprężysto-lepkoplastyczne.

Przyjęto przyrostową metodę opisu pełzania anizotropowych kompozytów polimerowych, w której zakłada się aproksymację nieliniowego zachowania się kompozytu w krótkim przedziale czasu za pomocą praw pełzania wyprowadzonych przy założeniu, że istnieje potencjał prędkości pełzania.

Wyprowadzone w pracy [7] prawa pełzania, przy założeniu o istnieniu potencjału pełzania, opisują anizotropowe zachowanie się kompozytu w warunkach pełzania w okolicy pewnego punktu czasu t , ściślej w przedziale $\langle t, \Delta t + t \rangle$. Zachowanie nieliniowe kompozytów w wąskim przedziale czasowym t można traktować jako liniowe w sensie Boltzmana. Dla tego przedziału przyjęto istnienie potencjału, pełzania F w postaci analogicznej do odpowiedniej funkcji w teorii plastyczności [10]

$$(4.1) \quad F = B_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} - B_{(i)(j)(i)(j)}\sigma_{o(i)(j)}\sigma_{o(i)(j)} = 0$$

Przy tych założeniach wyprowadzić można wzór na prędkość pełzania w przedziale $\langle t, \Delta t + t \rangle$

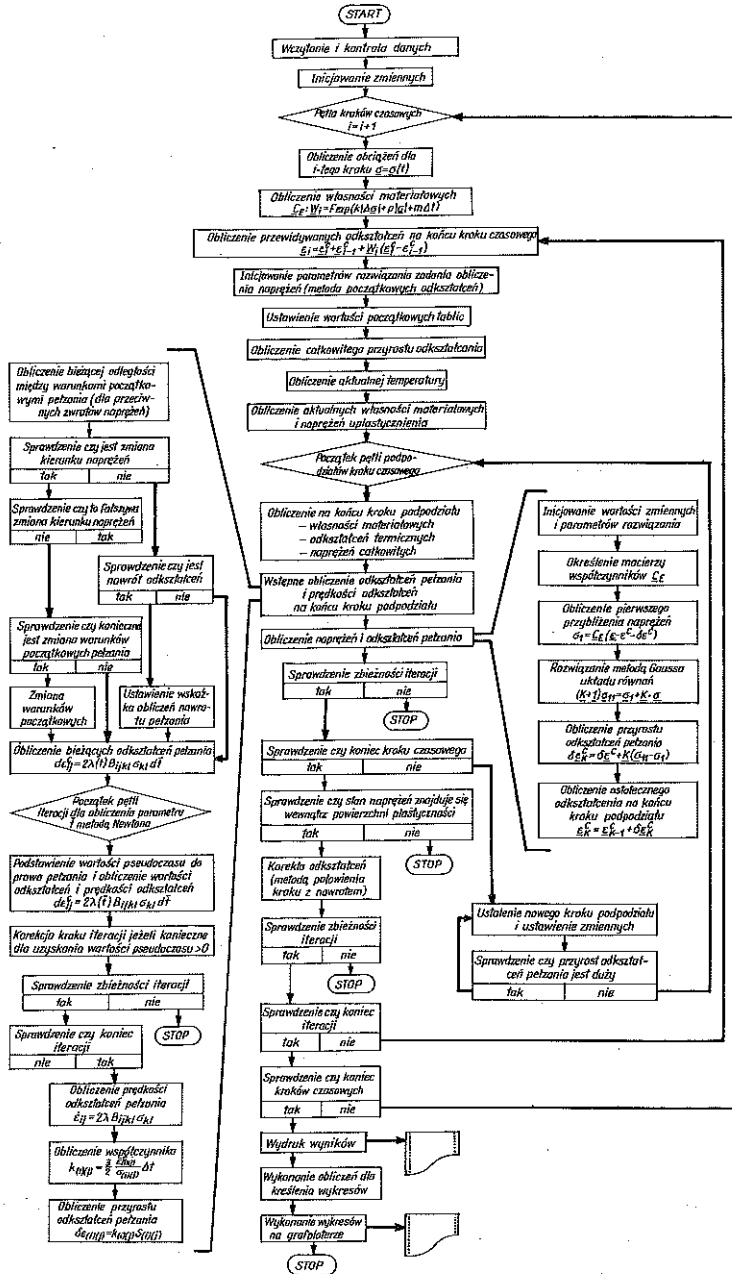
$$(4.2) \quad \dot{e}_{ij} = a_{ijmn}\dot{\sigma}_{mn} + \frac{\dot{e}_{(\alpha)(\alpha)} - a_{(\alpha)(\alpha)(\alpha)(\alpha)}\dot{\sigma}_{(\alpha)(\alpha)}}{B_{1111}\dot{\sigma}_{11}^0\sigma_{11}^0} B_{ijkl}\sigma_{kl},$$

gdzie wielkości ze wskaźnikami (α) oznaczają dane doświadczalne. Powyższe sformułowanie służy do obliczeń odkształceń pełzania w związku konstytutywnym

$$(4.3) \quad \sigma = C_E(e - e^p - e^c - e^{TH}),$$

gdzie C_E oznacza macierz stałych sprężystości, natomiast e, e^p, e^c, e^{TH} są odpowiednio całkowitymi, plastycznymi, pełzania i termicznymi przyrostami odkształceń w przedziale czasu od t do $t + \Delta t$.

Po każdym kroku czasowym następuje zmiana współczynników w algorytmie obliczeń pełzania zgodna z funkcjami materiałowymi, określonymi na podstawie danych doświadczalnych. Funkcje materiałowe określają wrażliwość materiału na wartość i czasy skoków naprężenia, a także na gromadzenie się uszkodzeń w materiale oraz inne efekty nieliniowe zależne od parametrów stanu. Odpowiada to zastosowaniu tzw.



Rys. 11 Algorytm obliczeń numerycznych niestacjonarnego pełzania kompozytów polimerowych w złożonym stanie naprężenia

”początkowego przemieszczenia proponowanego przez O.C.Zienkiewicza [12] do opisu materiałów nieliniowych w metodzie elementów skończonych.

Algorytm obliczeń pelzania zbudowany według przedstawionego modelu matematycznego został tak skonstruowany, by umożliwić włączenie obliczeń pelzania w system programów metody elementów skończonych w ujęciu przemieszczeniowym.

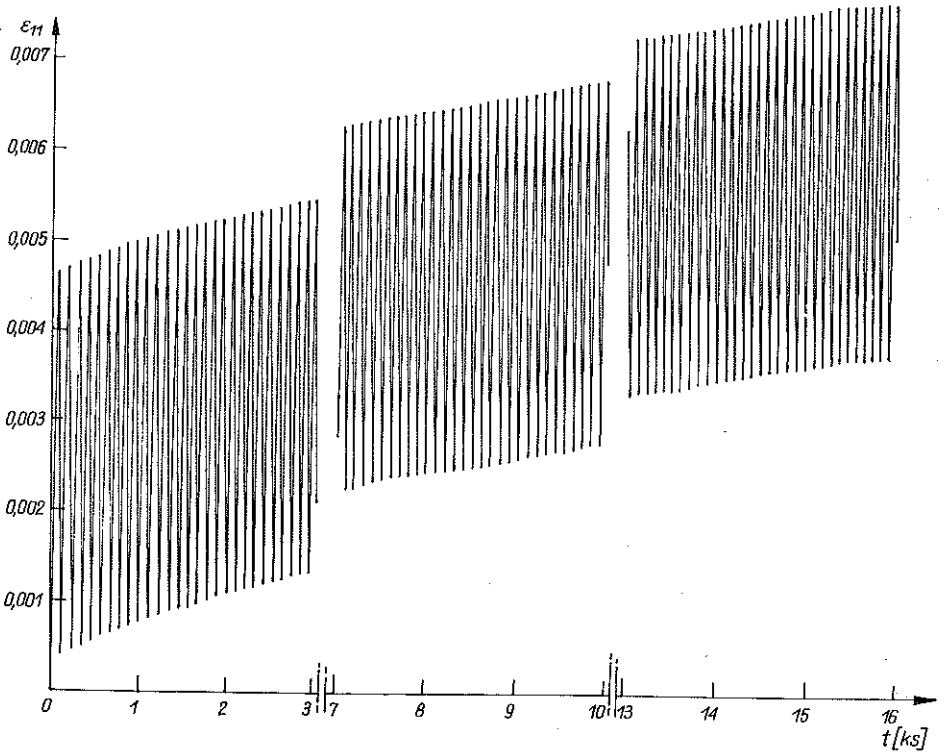
Szczegółowy opis matematycznego modelu kompozytu anizotropowego, uwzględniający pelzanie w złożonej historii obciążenia i w złożonym stanie naprężenia podano w [7]. Algorytm obliczeniowy modelu przedstawia rys.11.

5. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA MODELU

Do porównania wyników pelzania otrzymanych doświadczalnie i z modelu numerycznego zastosowano nieparametryczny test istotności zwany testem rangowanych znaków oraz test istotności weryfikujący hipotezę $H_0(\sigma^2 = \sigma_0^2)$. Do testów pobrano n elementów z dwóch funkcji $e_{obl}(t)$ i $e_{exp}(t)$, których wyniki odpowiadają sobie parami. Wykresy przykładowych krzywych uzyskanych z obliczeń metodą numeryczną z naniesionymi punktami doświadczalnymi przedstawiono na rys.10.

Wymagającą próbą weryfikującą matematyczny model kompozytu jest pelzanie pod obciążeniem cyklicznym. Próby doświadczalne pelzania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej o wymuszeniu kinematycznym typu 1231 U10 prod.ZSRR. Parametry cyklu obciążenia: $\sigma_{min} = 4,8 \text{ MPa}$, $\sigma_{max} = 123,5 \text{ MPa}$, $t = 102 \text{ s}$. Wyniki badań doświadczalnych przedstawiono na rys.12.

Obliczenia odkształceń pelzania wykonane przy wykorzystaniu matematycznego modelu kompozytu, przy tych samych parametrach zmian naprężenia w czasie, przedstawiono na rys.13. Porównanie odkształceń otrzymanych doświadczalnie i z obliczeń, dla tej samej chwili czasowej t na obwodni przebiegu dokonano przez pobranie par elementów z obliczeń i eksperymentu. Wykorzystano te same co poprzednio testy istotności do weryfikacji hipotez statycznych. Porównanie to pozwala stwierdzić, że proponowany model pelzania kompozytu dobrze opisuje prezentowany przypadek pelzania niskocyklicznego.

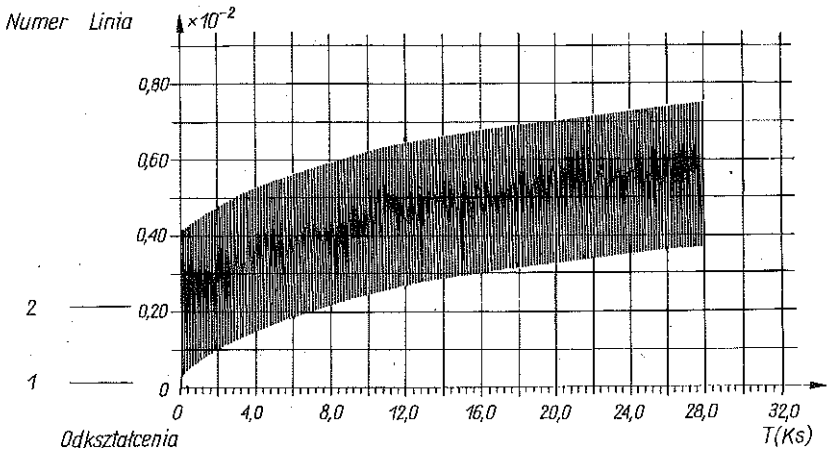


Rys. 12 Doświadczalne odkształcenia kompozytu 1 podczas obciążenia cyklicznego

6. UWAGI KOŃCOWE

1. Obszerne wyniki badań krótkotrwałych i pełzania potwierdziły silne własności anizotropowe badanych kompozytów epoksydowo-szkłanych oraz pozwalają stwierdzić, że kompozyty te zachowują się tak jak ciała lepkosprężyste o wysokim stopniu nieliniowości.

2. Zaproponowana metoda przyrostowa obliczeń odkształceń pełzania dobrze opisuje niestacjonarne pełzanie w złożonych stanach naprężenia. W zakresie realizowanych programów badań maksymalne spodziewane odchylenie standardowe nie przekracza 20% z prawdopodobieństwem 0,995. Średnie odchylenie standardowe z badanej próby, określające błąd jako $(e_{obl} - e_{exp})e_{exp}$ wynosi $\sigma = 0,1$, natomiast wartość średnia błędu $\bar{x} = -0,021$.



Rys. 13 Obliczeniowe odkształcenia kompozytu 1 podczas obciążenia cyklicznego

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. Z.GABRYSZEWSKI, Z.JAŚNIEWICZ, *Pelzanie laminatów poliestrowo-szklanych o strukturze nieuporządkowanej*, Pr.Nauk.Inst.Mat. i Mech.Techn. Pol.Wr., 32, 1976.
2. D.F.ADAMS, A.K.MILLER, *The influence of material variability on the predicted environmental behavior of composite materials*, Trans. ASME J.Eng.Mater. and Technol., 100, 1, 1978.
3. A.JAKOWLUK, E.MIELESZKO, *No-potential theory of the construction of anisotropic creep constitutive law*, Res. Mechanica, 16, 1985.
4. А.Е.К Регерс, Р.Д.М Аксимов, Р.П.Т Урчиныс, *Нелинейная ползучест тканевого стеклопластика при некоторых видах сльзозного напряженного состояния*, Мех. Полимеров, 2, 1973.
5. S.OCHELSKI, *Analiza pelzania nieliniowych lepkosprężystych tworzyw anizotropowych w złożonej historii obciążenia*, Biuletyn WAT, 4, 1977.
6. R.CUPISZ, S.OCHELSKI, *Wyniki badań pelzania kompozytu epoksydowo-szklanego w złożonym stanie naprężenia przy programowanych obciążeniach*, X Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1982.
7. R.CUPISZ, *Pelzanie lepkosprężystych tworzyw anizotropowych w warunkach niestacjonarnego obciążenia*, Rozpr.dok.WAT, 1987.
8. R.CUPISZ, S.OCHELSKI, *Badania statyczne i reologiczne kompozytów polimerowych wzmacnionych jednokierunkowo*, VIII Sympozium Poświęcone Reologii, Wrocław 1981.
9. R.CUPISZ, S.OCHELSKI, J.POLAŃSKI, *Urządzenie do badań wytrzymałości w złożonym stanie naprężenia*, X Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1982.

10. Z. GABRYSZEWSKI, *Wybrane zagadnienia teorii plastyczności ciał anizotropowych*, Zesz. Nauk. Pol. Wrocławskiej, Mechanika, 26, 203, 1968
11. M. SNYDER, K. BATHE, *Formulation and numerical solution of thermoelastic-plastic-creep problems*, Acoustics and Vibration Laboratory, M.I.T. 1977.
12. O. C. ZIENKIEWICZ, *The finite element method*, Mc Graw-Hill, 1977.

Резюме

ПОЛЗУЧЕСТЬ АНИЗОТРОПНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ПЛОСКОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗКАХ

Работа представляет результаты статических и реологических исследований ортотропного полимерного композита и композита упрочненного в одном направлении. Предложена модель полимерного композита, описывающая нестационарную ползучесть в плоском напряженном состоянии. Сравнены результаты экспериментальных исследований с результатами полученными из аналитического подхода к ползучести композитов. Программа исследований охватывает нестационарные сложные напряженные состояния, реализованные при одновременном действии растягивающей силы и скручивающего момента на трубчатые образцы.

SUMMARY

CREEP OF ANISOTROPIC POLYMER COMPOSITES UNDER PLANE STRESS NON-STATIONARY LOADING CONDITIONS

Statical and rheological test results are presented concerning the polymer composites and a uni-directionally reinforced composite. A model of polymer composites in proposed accounting for non-stationary creep under plane stress conditions. The experimental results are compared with those following from the analytical approach to the problem. The program included non-stationary complex stress problems due to simultaneous action of tensile forces and torques applied to tubular specimens.

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

Praca została złożona w Redakcji dnia 20 lutego 1989 r.