

BRUNO KRYWULT

Politechnika Rzeszowska  
Zakład Przeróbki Plastycznej  
ul. W. Pola 2, 35-459 Rzeszów

## Pultruzja — efektywna metoda wytwarzania półwytworów z tworzyw wzmocnionych włóknami

### PULTRUSION AS AN EFFECTIVE METHOD FOR MAKING SEMIFINISHED PRODUCTS FROM GLASS FIBER-REINFORCED PLASTICS (GRP)

**Summary** — A review with 9 refs. covering a continuous pultrusion process for making GRP rod, pipe, and other shaped sections, specifying the requirements on glass fiber and impregnating (matrix) resin. Tangential stresses occurring in the product are discussed in relation to fiber content and resin elasticity.

**Key words:** pultrusion, glass fiber-reinforced plastics, selection of impregnating resin.

Pultruzji, stanowiącej bardzo dogodny proces otrzymywania półwytworów z tworzyw wzmocnionych włóknami (TWW), poświęcono stosunkowo niewiele publikacji, chociaż jest to sposób opatentowany już w latach pięćdziesiątych [1]. Jej opanowanie wymaga rozwiązania licznych problemów, takich jak np. optymalnego doboru włókien i osnowy (żywicy przesycającej), zawartości włókien w tworzywie, rodzaju ich mikrostruktury. O jakości uzyskiwanych półwytworów decydują etapy przesycań i utwardzania żywicy, które są bardzo trudne do kontrolowania i sterowania. Aby wykorzystać w najwyższym stopniu właściwości wytrzymałościowe włókien wzmacniających (WW), należy otrzymać wytwory (półwytwory) o zawartości WW zbliżonej do maksymalnej jej górnej granicy i charakteryzujących się jednocześnie wystarczającą odpornością na rozwarstwienie, skręcanie i wyboczenie przy ścisaniu. Spełnienie powyższych wymagań pozwala na konkurowanie TWW z półwytworami metalowymi (rurami, prętami, kształtownikami) pod względem technicznym i ekonomicznym.

Półwytwory z TWW produkowane metodami pultruzji mają specyficzne zastosowania, np. do produkcji silników elektrycznych, transformatorów, konstrukcji wysokonapięciowych, sprzętu sportowego itp., zatem są one przedmiotem dochodowego eksportu. Poszerzenie zakresu zastosowań (zwłaszcza zaś konkurencja z analogicznymi elementami, np. z aluminium) jest bardzo trudne. Mimo prowadzenia intensywnych badań, osiągnięcie odpowiednio wysokiego poziomu produkcji tego typu wyrobów jest nadal sprawą otwartą.

Niniejszy artykuł przedstawia przegląd wybranych problemów techniki pultruzji, których rozwiązanie stanowi o poziomie jakości wytwarzanych półwytworów i

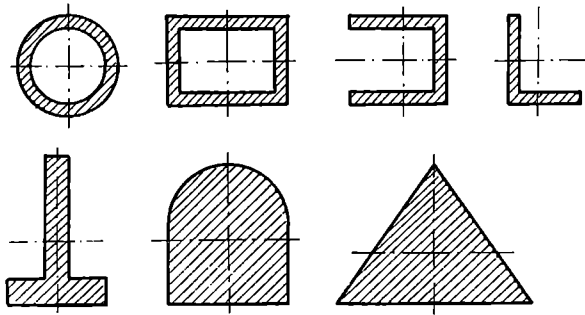
wciąż jest przedmiotem prac badawczych. Uwzględniono w nim dostępne informacje literaturowe oraz doświadczenie autora [2].

### CHARAKTERYSTYKA PROCESU PULTRUZJI

Pultruzja jest ciągłym procesem technologicznym wytwarzania prętów, rur i kształtowników z TWW. Polega on na przesycaeniu wiązki włókien wzmacniających żywicą syntetyczną, ukształtowaniu tej wiązki w określony przekrój poprzeczny i następnie jej utwardzeniu w podwyższonej temperaturze („na gorąco”). Ilość włókien elementarnych (lub liczbę pasm włókien w postaci tzw. rowingu) w wiązce ustala się na podstawie planowanej powierzchni przekroju poprzecznego półwytworu (zakładając najpierw zawartość objętościową włókien). Wytwory uzyskiwane w procesie pultruzji charakteryzują się znaczną zawartością włókien wzmacniających oraz ich równoległym ułożeniem; w kierunku ułożenia włókien osiąga się właśnie podstawową dużą wytrzymałość. Natomiast w celu zapewnienia większej wytrzymałości również w kierunku prostopadłym do ułożenia włókien, stosuje się specjalne wzmocnienia w postaci maty włókien ciętych.

Poziom jakości półwytworów z TWW wytwarzanych metodami pultruzji jest nadal bardzo zróżnicowany. Na rysunku 1 pokazano przykłady kształtów typowych półwytworów z TWW wytwarzanych techniką pultruzji [3]. Tabela 1 przedstawia właściwości półwytworów z TWW wytwarzanych na różnych poziomach technicznych.

Dwie pierwsze kolumny tej tabeli zawierają wartości średnie danych podawanych przez różne firmy, nato-



Rys. 1. Kształty typowych przekrojów półwytworów z TWW wytwarzanych techniką pultruzji

Fig. 1. Representative pultruded semi-finished product sections

miast dane w kolumnie trzeciej pochodzą z prognoz prezentowanych w literaturze [4, 5].

### OPIS PROCESU TECHNOLOGICZNEGO

Schemat blokowy typowego urządzenia stosowanego do produkcji wytworów z TWW metodą pultruzji obrazuje rys. 2. Wydajność tego rodzaju urządzeń wynosi 1,5–60 m/h i zależy od kształtu oraz wymiarów wytworów. Za pomocą takiej aparatury można produkować cienkie płaskowniki szerokości do 500 mm lub kształtowniki (teowniki, rury okrągłe albo prostokątne)

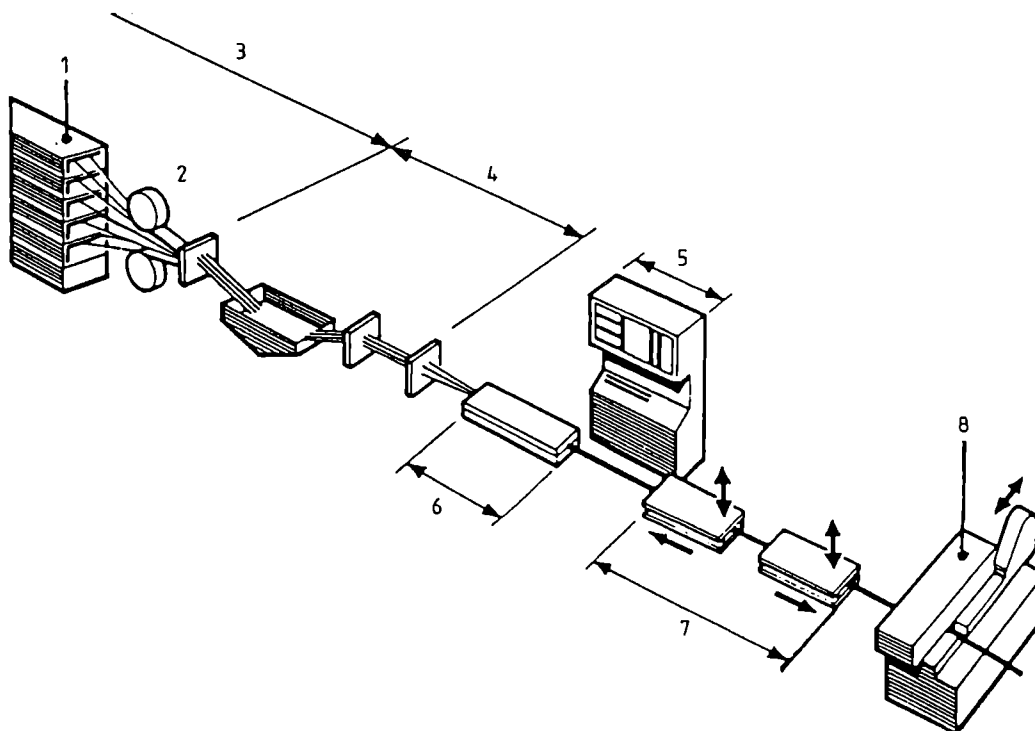
T a b e l a 1. Właściwości produkowanych metodą pultruzji prętów okrągłych z żywicy poliestrowej wzmocnionej włóknem szklanym

T a b l e 1. Property data on pultruded rod sections (polyester resin + glass fiber)

Właściwość	Poziom techniczny		
	krajowy	standard światowy	możliwości rozwojowe
Zawartość włókien szklanych, % mas.	55	69	75–80
Napężenie zrywające, MPa	500	883,2	2100
Moduł sprężystości przy rozciąganiu, MPa	28 000	36 570	74 000
Wytrzymałość na zginanie, MPa	650	1062,6	1700
Moduł sprężystości przy zginaniu, MPa	25 500	33 120	55 000
Wytrzymałość na ściskanie, MPa	280	400,2	1900
Moduł sprężystości przy ściskaniu, MPa	18 000	24 150	40 000
Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe, MPa	20	45	80–90

o maksymalnej wysokości 140 mm. Produkowane półwytwory charakteryzują się dobrą dokładnością wymiarowo-kształtową ( $\pm 1\%$ ).

Obecnie na świecie pracuje ok. 650 wysoce wydajnych maszyn pultruzyjnych, a ich roczna produkcja sięga ok. 100 000 ton. W Amerykańskim Stowarzyszeniu



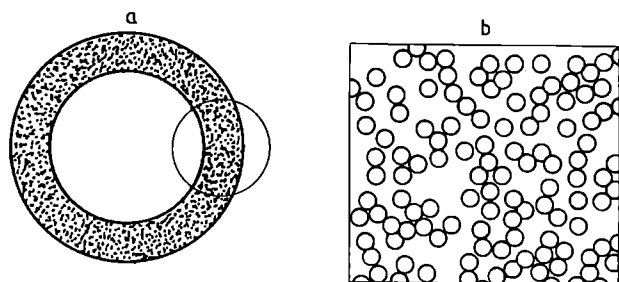
Rys. 2. Schemat blokowy typowego urządzenia do pultruzji (firmy Pultrex, Anglia): 1 — szpule rowingu; 2 — rolki maty; 3 — zespół zasilania; 4 — zespół przesycania i kształtowania wiązki włókien; 5 — zespół sterowania; 6 — zespół grzewczy; 7 — zespół pociągowy (zaciskowy) o ruchu okresowym; 8 — zespół odcinający

Fig. 2. The PULTREX Co. (England) pultrusion machine: 1 — roving racks, 2 — mat braider, 3 — material supply section, 4 — shaping and impregnating section, 5 — control section, 6 — hot die section, 7 — reciprocating gripper section, 8 — cut-off saw section

Testowania Materiałów zorganizowano specjalną sekcję zajmującą się wytworami wytwarzanymi metodą pultruzji (ASTM — Sekcja D 20-18.02) [5].

### Struktura wytworów

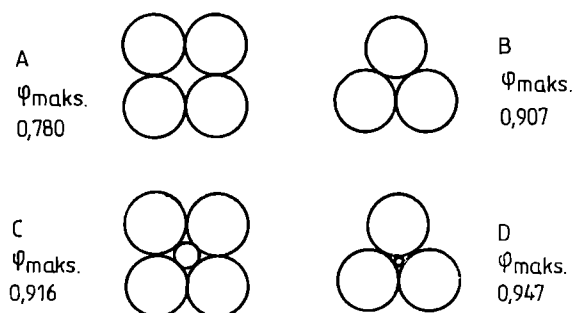
Przekrój typowego wytworu wytwarzanego opisywaną metodą oraz obraz jego rzeczywistej mikrostruktury jednokierunkowej ze wzmocnieniem rowingowym przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Przekrój typowego wytworu (rury) wytwarzanego metodą pultruzji (a) oraz schematyczne przedstawienie rzeczywistej mikrostruktury jednokierunkowej ze wzmocnieniem rowingowym (średnica włókien 10  $\mu\text{m}$ ) (b)

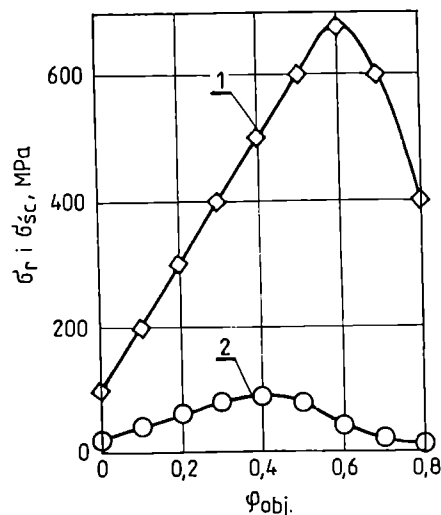
Fig. 3. (a) The cross section of a pultruded pipe; (b) the glass roving-reinforced monodirectional microstructure (fiber diam., 10  $\mu\text{m}$ )

Zawartość włókien wzmacniających gwarantująca uzyskanie maksymalnej wytrzymałości wytworu stanowi jednocześnie podstawowy wyznacznik jakości użytkowanej mikrostruktury i świadczy o poziomie realizowanej technologii wytwarzania. Rysunek 4 pokazuje



Rys. 4. Teoretyczne rozkłady włókien wzmacniających oraz maksymalne wartości objętościowej zawartości włókien wzmacniających ( $\phi_{maks.}$ ) odpowiadające tym rozkładom: A — rozkład kwadratowy, B — rozkład heksagonalny, C — zastosowanie włókien o różnych średnicach w układzie kwadratowym, D — zastosowanie włókien o różnych średnicach w układzie heksagonalnym

Fig. 4. Theoretical distributions of reinforcing fibers and the corresponding maximum fiber volume contents: A — square distribution, B — hexagonal distribution, C — square distribution with fibers of varying diameters, D — hexagonal distribution with fibers of varying diameters



Rys. 5. Zależność naprężenia zrywającego ( $\sigma_r$  — krzywa 1) i wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe ( $\sigma_{sc}$  — krzywa 2) od objętościowej zawartości włókien wzmacniających ( $\phi_{obj}$ )

teoretyczne rozkłady włókien wzmacniających i maksymalną objętościową zawartość włókien wzmacniających odpowiadającą tym rozkładom.

O właściwościach mechanicznych wytworu decyduje jednokierunkowa struktura jego rdzenia oraz zawartość włókien w tej strukturze, natomiast warstwy zewnętrzne pełnią funkcje ochronne [6, 7]. Rysunek 5 ilustruje zależność naprężenia zrywającego oraz wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe od zawartości włókien wzmacniających.

Jak już wspominaliśmy, gwarantujące konkurencyjność właściwości półwytworów, uzyskiwanych metodą pultruzji, silnie zależą od jakości ich mikrostruktury. Porównanie teoretycznych rozkładów włókien (rys. 4) z rozkładem rzeczywistym (rys. 3) wyjaśnia złożoność i skalę problemów technologii pultruzji. W procesie tym ma się do czynienia z milionami włókien elementarnych; np. gdy zawartość włókien wzmacniających w wytworze wynosi 50% obj., to wprowadza się ok. 300 tys. włókien średnicy 0,01 mm na 1  $\text{cm}^2$  powierzchni przekroju tego wytworu.

### WYMAGANIA MATERIAŁOWE

Na właściwości półwytworów o strukturze jednokierunkowej, mimo jej prostej budowy, bardzo silnie wpływa dobór podstawowych składników — osnowy żywicznej i włókien wzmacniających. Wzajemną zależność właściwości osnowy i włókien wzmacniających można ująć w postaci dwóch podstawowych grup, mianowicie:

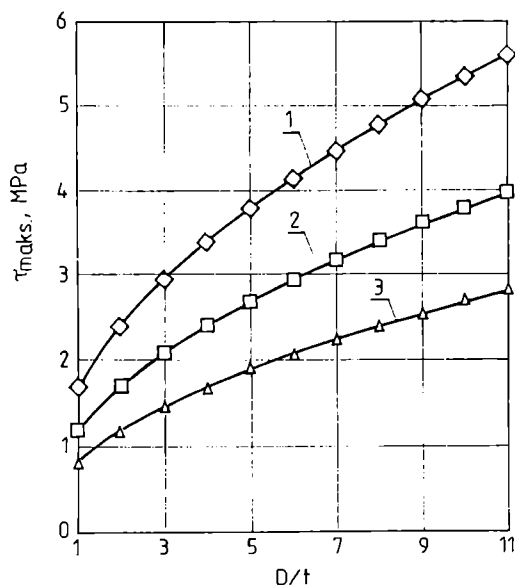
— sprzężenie cech włókien i osnowy żywicznej, takich jak moduły sprężystości, odkształcenia graniczne,

naprężenia zrywające, wytrzymałości na ścinanie, współczynniki rozszerzalności cieplnej itp.;

— odrębne właściwości technologiczne — lepkość osnowy żywicznej, zwilżalność i przesykalność włókien wzmacniających, przebieg utwardzania osnowy żywicznej itp.

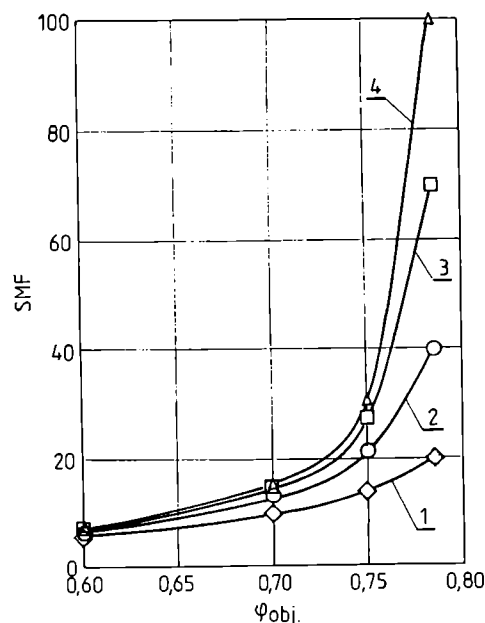
Właściwości włókien wzmacniających w sensie konstrukcyjnym można uznać za dominujące nad właściwościami żywicznej osnowy. Oznacza to, że materiał osnowy musi być dobrany tak, aby można było w sposób maksymalny wykorzystać właściwości włókien wzmacniających. Z podanego jako przykład rys. 5 można odczytać zakresy objętościowej zawartości włókien wzmacniających ( $\varphi_{obj}$ ) gwarantujące uzyskanie maksymalnych wartości naprężenia rozciągającego i wytrzymałości na ścinanie określonej struktury. Zakresy tych właściwości są różne i stanowią wskaźnik poprawności doboru składników struktury oraz jakości procesu technologicznego.

Utrzymanie spójności mikrostruktury jednokierunkowej w wytworach z TWW jest zagrożone występowaniem naprężeń stycznych w materiale osnowy — żywicy przesycającej, gdyż struktury te charakteryzuje mała wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe (tab. 1, rys. 5). Według Cortena [8] naprężenia styczne wys-



Rys. 6. Wpływ zawartości włókien wzmacniających (wyrażonej stosunkiem  $D/t$ ;  $D$  — średnica włókien,  $t$  — odległość między włóknami) oraz modułu sprężystości postaciowej osnowy żywicznej ( $G_v$ ) na wartość naprężeń stycznych ( $\tau_{maks}$ ); wartości  $G_v$ : 1 — 2000 MPa, 2 — 1000 MPa, 3 — 500 MPa. Do obliczeń przyjęto we wzorze (1):  $\sigma = 100$  MPa;  $c = 0,1$ ;  $E_w = 70\,000$  MPa

Fig. 6. Shearing stress ( $\tau_{maks}$ ) in relation to reinforcing fiber content (expressed as fiber-diameter-to-interfiber-distance ratio,  $D/t$ ) and to modulus of volume elasticity of resin matrix,  $G_v$ ; 1 — 2000, 2 — 1000, 3 — 500 MPa; values taken in eqn. (1) for calculations are:  $\sigma = 100$  MPa,  $c = 0,1$ ,  $E_w = 70\,000$  MPa



Rys. 7. Zależność współczynnika powiększenia wydłużenia (SMF = por. tekst) od objętościowej zawartości włókien ( $\varphi_{obj}$ ) oraz od stosunku  $E_o/E_w$  ( $E_o$  i  $E_w$  — odpowiednio moduły sprężystości osnowy żywicznej i włókien wzmacniających); wartości  $E_o/E_w$ : 1 — 1:20, 2 — 1:40, 3 — 1:70, 4 — 1:100 (kwadratowy układ włókien — por. rys. 4)

Fig. 7. The strain magnification factor (SMF) in relation to volume content of fiber ( $\varphi_{obj}$ ) and to ratio of modulus of volume elasticity of resin matrix to that of reinforcing fibers,  $E_o/E_w$ ; 1 — 1:20, 2 — 1:40, 3 — 1:70, 4 — 1:100 (square distribution of fibers, cf. Fig. 4)

ępujące w strukturze jednokierunkowej podczas rozciągania można wyrazić wzorem:

$$\tau_{maks} = c \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{G_v \cdot D}{E_w \cdot t}} \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma$  — naprężenie rozciągające działające w kierunku ułożenia włókien, MPa;  $\tau_{maks}$  — naprężenie styczne w materiale osnowy żywicznej, MPa;  $c$  — stała charakterystyczna ( $c = 0,1-1,0$ ),  $G_v$  — moduł sprężystości postaciowej osnowy żywicznej, MPa;  $E_w$  — moduł sprężystości wzdłużnej włókna, MPa;  $D$  — średnica włókien wzmacniających;  $t$  — odległość między włóknami.

Iloraz  $D/t$  stanowi wskaźnik zawartości objętościowej włókien wzmacniających.

Rysunek 6 przedstawia wpływ zawartości włókien wzmacniających na wartość naprężeń stycznych ( $\tau_{maks}$ ) podczas rozciągania w kierunku długości włókien w odniesieniu do różnych wartości modułów sprężystości postaciowej materiału osnowy żywicznej ( $G_v$ ). Wpływ ten jest bardzo wyraźny. Elastyczna osnowa żywiczna (małe wartości  $G_v$  — krzywa 3) daje znacznie mniejsze wartości naprężeń stycznych ( $\tau_{maks}$ ) podczas rozciągania struktury jednokierunkowej, co oznacza zwiększenie wytrzymałości struktury na ścinanie międzywarstwowe.

Rysunek 7 pokazuje zależność stosunku wydłużeń względnych materiału osnowy żywicznej ( $\epsilon_o$ ) do odkształcenia poprzecznego makrostruktury ( $\epsilon_p$ ), wyrażonego tzw. współczynnikiem powiększenia wydłużenia (*Strain Magnification Factor* — SMF) [9], od stosunku modułów sprężystości osnowy żywicznej i włókien wzmacniających ( $E_o/E_w$ ) oraz od zawartości tych włókien. Współczynnik SMF wyznacza więc dopuszczalną wartość odkształceń poprzecznych struktury ( $\epsilon_p$ ) w odniesieniu do określonych wartości granicznych odkształceń żywicznej osnowy ( $\epsilon_o$ ).

Z rysunku 7 wynika, że bardziej sztywna osnowa (większa wartość  $E_o$  — krzywa 1) odpowiada mniejszym wartościom SMF, a więc zmniejsza wymagane wartości granicznych odkształceń materiału żywicznej osnowy.

Oprócz wyboru optymalnej elastyczności żywicznej osnowy bardzo istotny jest też wybór jej właściwości cieplnych. Jednak odpowiedni dobór obu tych cech żywicznej osnowy w wytworze stwarza problemy, których rozwiązanie staje się niemożliwe w świetle obecnego stanu techniki wytwarzania wytworów grubościennych lub niesymetrycznych; mogą w nich np. wystąpić naprężenia cieplne doprowadzające do niszczenia mikrostruktury.

#### PODSUMOWANIE

Najważniejszym problemem w omówionym procesie pultruzji jest optymalny dobór wzmocnień włóknistych i charakterystyk mechanicznych materiału żywicznej osnowy. Dlatego też do wytwarzania półwytworów o wysokiej jakości stosuje się specjalne gatunki żywic, których skład stanowi tajemnicę producentów. Jedno z możliwych i praktykowanych rozwiązań to ścisła

współpraca producentów półwytworów otrzymywanych metodami pultruzji z producentami włókien i materiałów żywicznej osnowy. Ponadto poziom konstrukcyjny maszyn pultruzyjnych powinien nadążać za rosnącymi wymaganiami dotyczącymi jakości wytworów. Precyzja mechanizmów prowadzenia włókien (wiązek) oraz systemów sterujących procesem utwardzania to problem równie ważny, jak zagadnienia materiałowe i technologiczne.

#### LITERATURA

1. *Pat. szwedzki 321 217* (1955).
2. Krywult B.: „Badania wpływu niektórych parametrów technologicznych przetwórstwa na własności mechaniczne laminatów z żywic wzmocnionych jednokierunkowo rowingiem”, praca doktorska, Politechnika Śląska 1972 r.
3. Katalog firmy Krempel (Niemcy) „Faserverstärkte Kunststoffe”.
4. Roginskii S. L.: „Vysokoprochnye stekloplastiki”, wyd. Khimiya, Moskwa 1979.
5. Katalog firmy Pultrex Ltd. (USA).
6. Lyubutin O. S.: „Avtomatizaciya proizvodstva stekloplastikov”, wyd. Khimiya, Moskwa 1969, str. 118—136.
7. Krywult B.: „CAE in Designing of Complex-macrostructures of Fiber Reinforced Polymer Composites”, mat. konf. TH Bielefeld 1995, str. 399—404.
8. Corten H. T.: „Reinforced Plastics”, SPE, Nowy Jork 1967, str. 100—101.
9. Krywult B.: „Polimerowe kompozyty włókniste”, wyd. SIMP-ZODOK 1988, str. 19—27.

Otrzymano 6 VII 2000 r.