ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992

Seria: MECHANIKA z. 107 Nr kol. 1154

Brunon Krywult

Zakład Przeróbki Plastycznej
Politechnika Rzeszowska

TECHNOLOGICZNOŚĆ MECHANIKI TWORZYW WZMOCNIONYCH WŁÓKNAMI - TWW

Streszczenie. W artykule podjęto próbę zestawienia podstawowych źródeł problemów technologicznych wytwarzania złożonych makrostruktur TWW. Zestawiono właściwości typowych warstw elementarnych i ujawniono podstawowe słabości tych materiałów. Wykonano szacunkowe obliczenia wartości naprężeń i odkształceń technologicznych dla wybranych makrostruktur żywic wzmocnionych włóknami (ŻWW).

Резюме. В статье рассматривается задача сопоставления главных источников технологических проблем переработки сложных макроструктур армированных пластиков. Сопоставлены свойства стандартных элементарных слоев и выявлены главные недостатки этих материалов. Сделаны расчеты величин технологических напряжений и деформации некоторых макроструктур.

Summary. An investigation was conducted to study main sources of technological problems during manufacturing of Fiber Reinforced Plastics (FRP). The fundamental properties of the standard elementary plies were submited and basic weaknesses of these materials were revealed. The values of technological stresses and strains of some Fibre Reinforced Resins (FRR) macrostructures were estimated.

1. WSTĘP

Tworzywa wzmocnione włóknami (TWW) to grupa nowoczesnych i atrakcyjnych konstrukcyjnie materiałów. Oryginalne właściwości TWW i nowe zastosowania są doskonałym chwytem reklamowym producentów surowców i półwyrobów. Znajdują oni poparcie w niezwykle licznych opracowaniach teoretycznych, ujawniających możliwości projektowania właściwości przez celową i świadomą kombinację składników makrostruktury. Szczególnie szybko i intensywnie rozwijającą się grupą są tzw. laminaty, czyli TWW o strukturze warstwowej tworzonej z warstw elementarnych (preimpregnatów) wytwarzanych w bardzo obszernym asortymencie przez wyspecjalizowanych producentów.

W artykule podjęto próbę dokumentacji wybranych problemów technologicz-

nych wytwarzania wyrobów z żywic wzmocnionych włóknami (ŻWW), utrudniających lub limitujących swobodę projektowania makrostruktur oraz konstrukcji wyrobów.

2. KONSTRUKCJA WYROBÓW Z ŻWW

2.1. Warstwy elementarne

Podstawowe informacje o właściwościach warstw elementarnych, niezbędne do prowadzenia wstępnych analiz teoretycznych różnych wariantów konstrukcyjnych, zestawiono w tablicy 1. Dane dotyczą warstw elementarnych o wzmo-

Tablica 1

Właściwości sprężyste, wytrzymałościowe i cieplne warstw elementarnych ŻWW o wzmocnieniu jednokierunkowym: [1],[2],[3],[4].

Właściwości	Oznaczenie	Rodzaj warstw elementarnych			
		WS / ŻE	WW / ŻE		WO / ŻE
			HM	HS	
Właściwości sprężyste					
Moduł sprężystości wzdłużnej [GPa]:	E_L	45	145	220	76
	E_T	12	10	6,9	5,5
Moduł sprężystości postaciowej [GPa]:	G_{LT}	5,5	4,8	4,8	2,1
Liczba Poissona:	ν_{LT}	0,28	0,25	0,25	0,34
Właściwości wytrzymałościowe					
Wytrzymałość na rozciąganie [GPa]:	σ^r_L	1,02	1,24	0,76	1,24
	σ^r_T	0,04	0,04	0,03	0,03
Wytrzymałość na ściskanie [GPa]:	σ^c_L	0,60	1,24	0,69	0,23
	σ^c_T	0,14	0,17	0.17	0,14
Wytrzymałość na ścinanie międzywarstw. [GPa]:	τ_{LT}	0,07	0,08	0,07	0,06
Właściwości cieplne					
Wsp. liniowej rozszerz. cieplnej $x10^6$ [1/deg]:	α_L	5,54	0,08	0,08	-5,97
	α_T	43,6	62,8	62,8	82,2

Indeksy: L - kierunek WW, T - kierunek prostopadły do WW,
r - rozciąganie, c - ściskanie

cnieniu jednokierunkowym i zawartości włókien wzmacniających (WW) φ = 60%. Materiał osnowy: żywica epoksydowa (ŻE).

Dane zawarte w tabeli 1 uwidaczniają kilka podstawowych źródeł zagrożeń technicznych dla projektantów i wytwórców wyrobów z ŻWW:

- silna anizotropia właściwości mechanicznych i cieplnych szczególnie w przypadkach stosowania włókien węglowych i organicznych,
- niskie wartości modułów sprężystości w kierunku WW, w porównaniu z wartościami wskaźników wytrzymałości w tym kierunku,
- duża podatność na odkształcenia postaciowe przy bardzo niskiej wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe,
- ujemne wartości współczynników liniowej rozszerzalności cieplnej (WLRC) w przypadku włókien organicznych,
- niskie wartości wytrzymałości przy ściskaniu w kierunku WW dla włókien szklanych i organicznych,
- bardzo niskie wartości wytrzymałości przy rozciąganiu w kierunku prostopadłym do WW.

Konsekwencje wymienionych charakterystyk właściwości warstw elementarnych są silnie wzmocnione przez właściwości reologiczne nie tylko materiału osnowy, lecz także WW w przypadku włókien organicznych (typu KEVLAR): [5], [6].

2.2. Makrostany ŻWW

Konstrukcja makrostruktury ŻWW zawiera kilka zasadniczych informacji:

a) ilość i rodzaj warstw elementarnych,
b) kolejność i kąt ułożenia warstw elementarnych.

Sposób podawania tych informacji jest na etapie normalizacji w skali światowej, np. makrostruktura:
$[0^0_2 / \pm 45^0_5 / 90^0_3]_s$ - zawiera informacje o liczbie, kolejności i kącie ułożenia warstw elementarnych oraz symetryczności makrostruktury. Oznaczenie to jednak nie zawiera informacji o rodzaju kolejnych warstw elementarnych.

3. PROBLEMY TECHNOLOGICZNE

3.1. Typowe źródła problemów technologicznych.

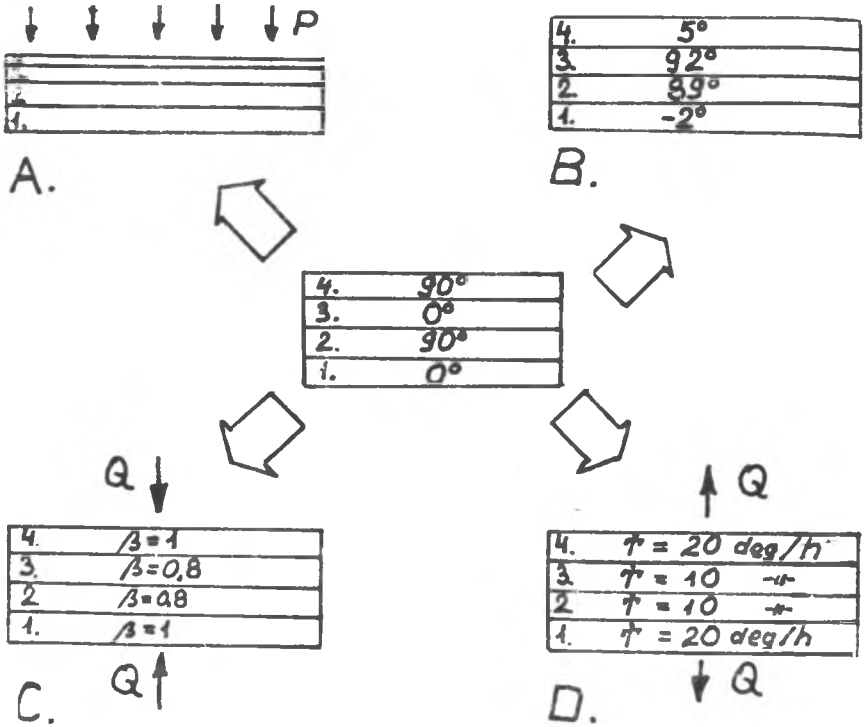
Proces technologiczny wprowadza do projektowanej makrostruktury szereg istotnych zakłóceń. Na rysunku 1. przedstawiono kilka z ważniejszych źródeł tych zakłóceń na przykładach realnych przypadków:

A - nierównomierny rozkład grubości i zawartości żywicy w kolejnych warstwach elementarnych,

B - błędy kierunku i nieliniowości ułożenia warstw elementarnych,

C - nierównomierność stopnia utwardzenia żywicy (curing-degree - β),

D - nierównomierność szybkości chłodzenia makrostruktury T = dT/dt.



Rys. 1. Typowe źródła problemów technologicznych wytwarzania makrostruktur warstwowych z ŻWW

Fig. 1. Typical sources of technological problems during the manufacturing of multilayer macrostructures of FRR

Wymienione źródła skutkują w istotnych zmianach właściwości warstw elementarnych i całej makrostruktury.

Projekt technologiczny kształtowania i zestalania wyrobów z ŻWW wymaga uwzględnienia kilku zasadniczych procesów towarzyszących jego realizacji:

- proces płynięcia żywicy przez warstwy elementarne (wysycanie),
- utwardzanie żywicy i towarzyszące zjawiska, np. efekty egzotermiczne,
- zestalanie warstw elementarnych i zmiany wymiarowo-kształtowe przy chłodzeniu makrostruktury,
- zmienność charakterystyk warstw elementarnych w funkcji temperatury i czasu,
- charakter i wielkość naprężeń technologicznych,
- dopuszczalne odchyłki od założonych projektem właściwości makrostruktury.

Znajomość wymienionych procesów umożliwia kontrolę i sterowanie przebiegiem parametrów technologicznych w sposób gwarantujący uzyskanie makrostruktury o optymalnych właściwościach: [6].

3.2. Ocena skali zjawisk towarzyszących procesomtechnologicznym

W celu ustalenia skali zjawisk zachodzących w procesach technologicznych kształtowania wyrobów z ŻWW, można przyjąć pewne istotne uproszczenia:

- warstwa elementarna WW wykazuje skokową zmianę właściwości mechanicznych i cieplnych przy przejściu przez zakres temperatur zeszklenia materiału osnowy (żywicy) - T_g = 80 - 120^{0}C (średnia: T_g = 100^{0}C),
- istnieje określona temperatura T_0 powyżej której naprężenia wewnętrzne w makrostrukturze są równe 0 (stress - free temperature), przy czym: $T_u > T_0 > T_g$ (T_u - temp. utwardzania),
- chłodzenie wyrobu przebiega w sposób jednorodny na przekroju makrostruktury ze stałą szybkością,
- współczynniki liniowej rozszerzalności cieplnej (WLRC) warstw elementarnych mają stałą wartość, skokowo zmieniającą się w zakresie przez temperaturę zeszklenia: T_g

Do analizy wybrano makrostruktury wykonywane z warstw elementarnych: WS/ŻE - gat. AG-4S (prod. ZSRR) oraz WO/ŻE - gat.SWM (prod.ZSRR).

Obliczenia wykonano dla makrostruktur złożonych z 4 warstw elementarnych o jednakowej grubości, przyjmując charakterystyki z tablicy 1 oraz $\Delta T = T_0 - T_k = 150^0$ C

Obliczono wartości maksymalnych odkształceń liniowych i postaciowych oraz krzywizny makrostruktury. Obliczono maksymalne wartości naprężeń wewnętrznych w warstwach elementarnych. Dane z obliczeń zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Maksymalne wartości naprężeń i odkształceń w warstwach elementarnych oraz krzywizny makrostruktury po utwardzeniu dla różnych wariantów układów WW

GATUNEK WARSTW ELEMENT	Napężenia		Odkształcenia		Krzywizna
Symbol makrostruktury	σ_{max}	τ_{max}	ε_{max}	γ_{max}	κ_{max}
	σPa		%	x10^{-2}	m^{-1}
WO / ŻE					
1. $[0 / 90]_s$	± 61,5	0	± 1,14	0	0
2. [5 / 95 / 90 / 0]	± 61,5	± 11,5	± 1,14	0,25	0,85
3. [45 / -45 / -45 / 45]	0	± 61,5	+ 0,51	± 1,24	0
4. [45 / -45 / +45 / -45]	± 24	± 84	± 0,48	± 1,32	1,36
WS / ŻE					
1. $[0 / 90]_s$	± 12,6	0	+ 0,17	0	0
2. [5 / 95 / 90 / 0]	± 12,6	+ 2,4	+ 0,16	+ 0,04	0,09
3. [45 / -45 / -45 / 45]	0	± 12,6	+ 0,06	± 0,19	0
4. [45 / -45 / +45 / -45]	± 3,6	± 16,5	± 0,05	± 0,23	0,48
WO + WS / ŻE					
1. [0-WO / 0-WS]	± 40	0	+ 0,51	0	0
2. [0-WO / 90-WS]	± 50	0	+ 0,91	0	0
3. [0-WS / 45-WO]	± 14,2	± 24	+ 0,4	- 0,66	0
4. [0-WO / 45-WS]	± 34,5	± 4	+ 0,6	+ 0,21	0

4. WNIOSKI

Możliwość uzyskiwania znaczących efektów przez optymalizację konstrukcji makrostruktur ŻWW jest dostatecznie udowodniona, lecz nadal mało rozpowszechniona, głównie ze względu na niski poziom technologii wytwarzania. Utrzymywanie ścisłych i kontrolowanych przebiegów procesów technologicznych jest podstawowym warunkiem wytwarzania konkurencyjnych jakościowo wyrobów. Wykazane w tabeli 2 wysokie wartości naprężeń i odkształceń oraz możliwość ich obniżania musi być brana pod uwagę już na etapie projektowania makrostrutury.

LITERATURA

[1] Hancox N.L.: Fibre Composite Hybrid Materials. Applied Science Publishers. London 1981.

[2] Garg S.K. Svalbonas V. Gurtman G.A.: Analysis of Structural Composite Materials. Marcell Dekker.Inc. New York 1973.

[3] Pagano N.J.: Interlaminar Response of Composite Materials. Elsevier. Amsterdam 1989.

[4] Matthews F.L.: The Failure of Reinforced Plastics. MEP. London 1989.

[5] Bogetti T.A. Gillespie J.W.: Two - Dimensional Cure Simulation of Thick Thermostting Composites. Journal of Composite Materials. Vol. 25 NO.3/ March 1991. pp. 229-273.

[6] Tomaszewski W.T.: O zadaczach miechaniki i tiechnołogii kompozitnych matieriałow. Miechanika kompozitnych matieriałow 1982, nr 3, s.486-502.

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE MACROMECHANICS OF FIBER REINFORCED PLASTICS (FRP)

The basic units used to manufacture advanced composite structures are the unidirectional composite plies (prepregs). Fiber Reinforced Resins (FRR) macrostructures are made by bonding together two or more individual plies in different directions. The fundamental sources of technological problems demonstrate a striking dependence on process quality and detailed stacking sequence. The basic properties of standard elementary plies are summarized in Table 1 and some weaknesses of these properties are listed. Manufacturing technology brings into being new oryginal problems Some of these problems are presented in Fig.1. General overview of these problems gives the theoretical analysis of the maximal values of the stresses and strains emphasized in curing cycle. These values for typical stacking sequence of Kevlar/Epoxy, Glass/Epoxy and hybrid Kevlar-Glass/Epoxy elementary plies are presented in Table 2. This work, represents an inital step towards the better knowledge of the designing and manufacturing of FRP products.