

BRUNO KRYWULT

Politechnika Rzeszowska

Katedra Przeróbki Plastycznej

ul. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

Źródła uszkodzeń i zniekształceń wytworów z tworzyw wzmocnionych włóknami

THE REASONS FOR DAMAGE AND DEFORMATION IN FIBER-REINFORCED PLASTICS

Summary — Process-induced thermomechanical stresses give rise to crack initiation, crack growth, and final failure. Fundamentals of thermomechanical phenomena are presented (eqns. 1—8); possible reasons for stresses are outlined and illustrative CAD calculations are presented (Figs. 3—6).

Key words: fiber-reinforced plastics, shaping of articles, CAD calculations, computer-assisted modeling

Tworzywa wzmocnione włóknami (TWW) stanowią bardzo liczną i charakterystyczną grupę kompozytów polimerowych. Wybitne walory konstrukcyjne tej grupy potwierdziły jej efektywne techniczne zastosowania np. w rakietach, samolotach, statkach, łodziach lub sprzęcie sportowym. Wzrost zapotrzebowania na wytwory TWW (o bardziej powszechnym zastosowaniu) w ostatnim dwudziestoleciu spowodował konieczność wdrażania technologii seryjnych, a nawet masowych. Technologie te, oprócz wydajności, muszą zapewnić powtarzalność wymiarowo-kształtową oraz automatyzację produkcji. Okazało się jednak, że TWW to materiały bardzo trudne pod względem technologicznym, problem zaś wytworów wadliwych, a raczej ich zawracania (recyklingu) jest znacznie bardziej skomplikowany niż w przypadku wytworów metalowych. Zasadniczym celem artykułu jest uzasadnienie celowości prowadzenia badawczych prac doświadczalnych i teoretycznych w tej dziedzinie z przyjęciem następujących tez:

— Warunkiem uzyskiwania wyrobów wysokiej jakości wymiarowo-kształtowej jest rozpoznanie i kontrola zjawisk termomechanicznych zachodzących w toku cyklu technologicznego.

— Zjawiska termomechaniczne można analizować przy użyciu komputerowych programów symulacyjnych.

CHARAKTERYSTYKA PROBLEMU

Punktem wyjściowym do analizy problemu powinno być stwierdzenie, że TWW są materiałami zbudowanymi z dwóch bardzo odmiennych pod względem właściwości składników: włókien wzmacniających i podstawowego polimeru (osnowy). Odmiennosc

właściwości tych składników dotyczy przede wszystkim ich charakterystyk cieplnych i termomechanicznych [1]. Istotne różnice właściwości termomechanicznych materiałów włókien i osnowy polimerowej przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Istotne różnice właściwości termomechanicznych materiałów włókien wzmacniających i osnowy polimerowej TWW
Table 1. Thermomechanical property data in fibers and polymer matrix materials

Właściwość	Włókna wzmacniające	Osnowa polimerowa
Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej, deg ⁻¹	(-5 do +8) · 10 ⁻⁶	(20—180) · 10 ⁻⁶
Moduł sprężystości, GPa	70—280	3—5
Liczba Poissona	ok. 0,3	ok. 0,5
Wydłużenie, %	0,5—5	0,5—3
Typ materiału	sprężysto-anizotropowy	lepkosprężysto-izotropowy

Tabela 2 zawiera wartości liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej wybranych gatunków TWW.

Rysunek 1 ilustruje typowe efekty zjawisk termomechanicznych występujących w technologicznych procesach kształtowania wyrobów z TWW. Każdy z przedstawionych na rys. 1 efektów jest skutkiem błędów projektowania makrostruktury lub błędów technologicznych. W przypadku TWW tzw. technologiczność konstrukcji (określenie to jest znane dobrze wytwórcom wytworów metalowych, por. też dalszy tekst) nabiera szczególnego znaczenia i stanowi znacznie bardziej złożony problem. Podstawy teoretyczne oraz weryfika-

Tabela 1. Porównanie kosztów poszczególnych metod zapewniania jakości wyprasek poliamidu (w zł/sztukę) w zależności od osiągniętej zdolności procesu (C_p)T a b l e 1. Cost (PLN/piece) of each method studied to ensure good quality in polyamide moldings in relation to process ability (C_p)

C_p	Q	$1-Q$	δ^2	$(\delta_{AK})^2$	$L_{KI (100\%)}$	L_{KNS}	$L_{KNS + KI (100\%)}$
0,33	0,6827	0,3173	$\left(\frac{10}{2}\right)^2 = 25$	$(0,539)^2 \cdot \left(\frac{10}{2}\right)^2$	3,04915	—	—
0,66	0,9540	0,0455	$\left(\frac{10}{4}\right)^2 = 6,25$	$(0,88)^2 \cdot \left(\frac{10}{4}\right)^2$	1,2055	1,5075	1,2085
1,00	0,9973	0,0027	$\left(\frac{10}{6}\right)^2 = 2,777$	$(0,986)^2 \cdot \left(\frac{10}{6}\right)^2$	0,54407	0,59905	0,54707
1,33	0,9994	0,0006	$\left(\frac{10}{8}\right)^2 = 1,5625$	$(0,99)^2 \cdot \left(\frac{10}{8}\right)^2$	0,31928	0,3455	0,32228
1,67	0,999999	0,000001	$\left(\frac{10}{10}\right)^2 = 1$	$(0,999999)^2 \cdot \left(\frac{10}{10}\right)^2$	—	0,23	0,31928

— Łącząc liczbowy wskaźnik zdolności z funkcją strat uzyskuje się miarę jakości, za pomocą której można prognozować koszty jakości już na etapie przygotowania produkcji.

— Ekonomiczne uzasadnienie wyboru strategii zapewniania jakości można oprzeć na wskaźniku jakości wytworów w postaci funkcji strat.

— Analizy przeprowadzone na podstawie danych z produkcji wieloseryjnej wykazały, że koszty jednostkowe wynikające z niezadawalającej jakości wypraski mogą osiągać w skrajnych przypadkach nawet 50% kosztu wytworzenia wypraski. Koszty te można zmniejszyć nawet dwunastokrotnie, wprowadzając statystyczne nadzorowanie procesu wtryskiwania.

2. Montgomery D. C.: „Introduction to Statistical Quality Control”, John Wiley and Sons, 1991, str. 5—20.
3. Butler C., Koch T., Chlebus E., Bielski S., Dudzik R., Dziuba R., Zymonik Z., Hubicki M.: „Zarządzanie jakością. Część 3. Metody i techniki zapewniania jakości”, ITMiA Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995, str. 45—59.
4. Płaska S.: *Polimery* 1999, 44, 262.
5. Taguchi G., Elsayed E. A., Hsiang T. C.: „Quality Engineering in Production Systems”, Mc-Graw-Hill, Inc 1989, str. 12—24.
6. Płaska S.: „Ocena procesu za pomocą funkcji strat”, materiały konferencyjne „Skuteczność systemu zapewniania jakości”, PTE- Zakład Szkolenia i Doradztwa Sp.z o.o., Zakopane 1995, str. 102—122.

LITERATURA

1. Płaska S.: *Polimery* 2001, 46, 709.

Otrzymano 13 VIII 2000 r.

Rapid Communications

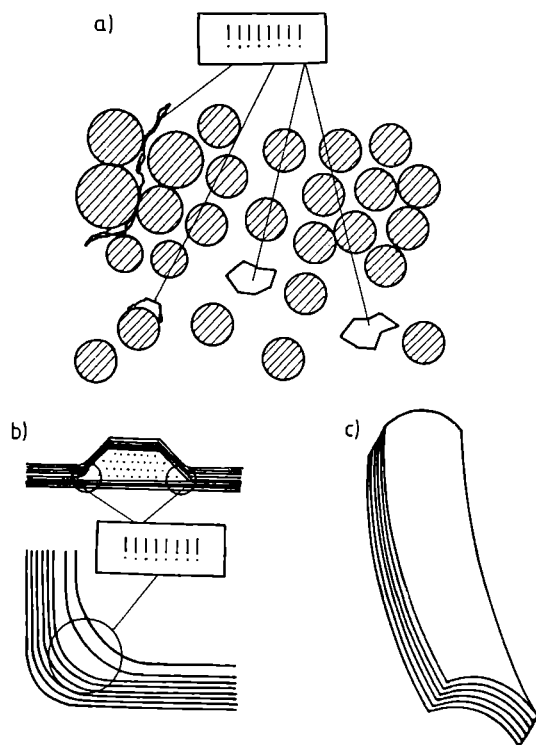
Przypominamy P.T. Autorom, że prowadzimy w naszym czasopiśmie dział typu **Rapid Communications**. Publikujemy w nim, **wyłącznie w języku angielskim, krótkie** (3—4 strony maszynopisu i ewentualnie 2—3 rysunki lub tabele) **prace oryginalne**, którym gwarantujemy szybką ścieżkę druku, co oznacza, że pojawią się one w czasopiśmie w okresie nieprzekraczającym 5 miesięcy od chwili ich otrzymania przez redakcję.

T a b e l a 2. Wartości liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej wybranych rodzajów TWW [2]

T a b l e 2. Linear thermal expansivities of fiber-reinforced plastics [2]

Gatunek ^{*)}	CFRP	CFRP	GFRP	KFRP	CFRTP	BFRP
Włókno	T300	AS	„E-glass”	„Kevlar 49”	APC-2	B(4)
Osnowa	N5208	H3501	EP	EP	PEEK	N5505
Współczynniki liniowej rozszerzalności cieplnej (deg ⁻¹): α_1 — w kierunku włókien; α_2 — w kierunku prostopadłym do włókien						
$\alpha_1 \cdot 10^6$	-0,11 [4]	-0,3 [3]	8,6 [3]	-4 [3]	30 ($T < T_g$) ^{**}	6,1
	0,02 [3]				75 ($T > T_g$)	
$\alpha_2 \cdot 10^6$	27,2 [4]	28,1 [3]	22,1 [3]	79 [3]	30 ($T < T_g$)	30,3
	22,5 [3]				75 ($T > T_g$)	

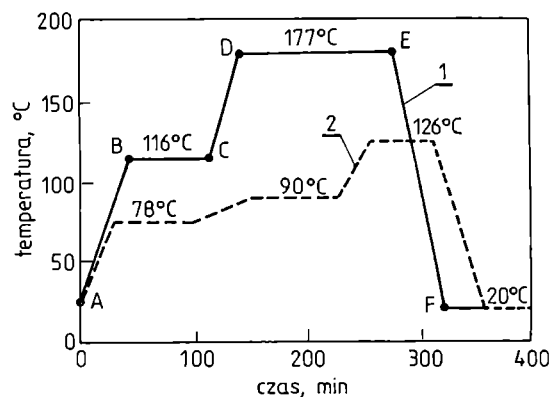
^{*)} CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) — tworzywa wzmocnione włóknami węglowymi; CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics) — tworzywa termoplastyczne wzmocnione włóknami węglowymi; GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) — tworzywa wzmocnione włóknami szklanymi; KFRP (Kevlar Fiber Reinforced Plastics) — tworzywa wzmocnione włóknami typu „Kevlar”; BFRP (Boron Fiber Reinforced Plastics) — tworzywa wzmocnione włóknami borowymi.
^{**)} T_g — temperatura zeszklenia.



Rys. 1. Typowe efekty zjawisk termomechanicznych występujących w technologicznych procesach kształtowania wyrobów z TWW: a) mikropęknięcia i nieregularność mikrostruktury, b) rozwarstwienia makrostruktury warstw elementarnych, c) zniekształcenia (ang. „twisting”) wytworu
Fig. 1. Illustrative thermomechanical phenomena occurring when fiber-reinforced plastics are formed: (a) microcracks and macrostructural irregularities, (b) delamination of macrostructure, (c) twisting

cię doświadczalną występowania naprężeń cieplnych w TWW jako pierwszy opublikował Hahn [3, 4]. Jedną z nielicznych prób całościowego ujęcia problemu technologiczności konstrukcji wytworów z TWW podjęli Tomaszewskii i Obrazcov w publikacji [5]. Niestety, problem ten jest nadal otwarty, m.in. z powodu bardzo skomplikowanych zjawisk zachodzących równocześnie podczas procesu kształtowania wytworów z TWW. Nowoczesne technologiczne rozwiązania tego procesu to realizacja „na gorąco”, tzn. w temperaturze podwyższonej. Rysunek 2 przedstawia profile zmian temperatury stosowane obecnie w przetwórstwie typowych gatunków TWW: EP/WW (CFRP), czyli żywica epoksydowa/włókno węglowe oraz UP/WS (GFRP), czyli nienasycona żywica poliestrowa/włókno szklane [6].

Profile zmian temperatury z rys. 2 odnoszą się do przestrzeni grzewczej (pieca, autoklawu, formy), natomiast profil temperatury wytworu w cyklu grzanie-chłodzenie nie pokrywa się z profilem zmian temperatury w przestrzeni grzewczej i stanowi złożoną funkcję wielu parametrów. Dotyczy to zwłaszcza kształtowania wytworów grubościennych [6]. Ustalenie profili zmian temperatury w przekroju utwardzanych wytworów jest możliwe jedynie pod warunkiem wykorzystywania programów komputerowych [5, 7, 8]. Właśnie takie profile są podstawą do przeprowadzania analiz zjawisk termomechanicznych, decydujących o końcowym efekcie kształtowania wytworów z TWW [6, 9, 10].



Rys. 2. Profile zmian temperatury stosowane w przetwórstwie typowych gatunków TWW: 1 — EP/WW (CFRP), czyli żywica epoksydowa/włókno węglowe; 2 — UP/WS (GFRP), czyli nienasycona żywica poliestrowa/włókno szklane
Fig. 2. Temperature profiles used in processing of: 1 — carbon fiber-reinforced epoxy resins, 2 — glass fiber-reinforced polyester resins

PODSTAWY TERMOMECHANIKI ODKSZTAŁCEN MAKROSTRUKTURY TWW

Kształtowanie i utwardzanie wytworów w podwyższonej temperaturze („na gorąco”) wprowadza — oprócz korzystnego skrócenia czasu cyklu technologicznego — szereg trudnych do opanowania i kontroli problemów. Jednym z nich jest problem naprężeń termicznych wy-

stępujących w makrostrukturze wytworów. Naprężenia te są naturalnym skutkiem zróżnicowania wartości liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej (tabela 2) i zmian temperatury wytworu podczas kształtowania (rys. 2). Zjawiska tego nie da się wyeliminować, natomiast można i należy kontrolować oraz sterować przebiegiem zmian naprężeń termicznych.

W celu ujawnienia i analizy tego złożonego problemu niezbędne jest zestawienie podstawowych zależności termomechaniki TWW. Zależność ujawniająca wartości sił i momentów termicznych działających na makrostrukturę TWW ma wg [3, 4, 8, 11] postać:

$$\{N^t; M^t\} = \sum_{k=1}^n Q_{ij}^{(k)} \cdot \alpha_j^{(k)} \cdot \Delta T \cdot \left[(h_k - h_{k-1}) \quad 0,5 \cdot (h_k^2 - h_{k-1}^2) \right] \quad (1)$$

gdzie: N^t, M^t — odpowiednio siły i momenty termiczne działające na makrostrukturę pod wpływem zmiany temperatury o wartość ΔT ; $(h_k - h_{k-1})$ — grubość warstwy elementarnej o numerze k (k z przedziału od 1 do n); n — całkowita liczba warstw elementarnych; $\alpha_j^{(k)}$ — współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej warstwy elementarnej o numerze k (wielkość tensorowa); $Q_{ij}^{(k)}$ — współczynnik sprężystości warstwy elementarnej o numerze k (wielkość tensorowa); Σ — sumowanie sił i momentów termicznych w warstwach elementarnych o numerach: 1 ... k ... n .

Podstawowy związek wartości sił i momentów termicznych z odkształceniami makrostruktury przedstawia wg [10—13] zależność:

$$\begin{Bmatrix} N^t \\ M^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ \rho \end{Bmatrix} \quad (2)$$

gdzie: ϵ — odkształcenia liniowe, ρ — krzywizna osi obojętnej, $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{D}$ — macierze współczynników sprężystości.

W przypadku makrostruktur „prostych” (np. symetrycznych) macierz \mathbf{B} ma wartość zerową. Powoduje to, że zależność (2) ulega istotnemu uproszczeniu do:

$$\begin{Bmatrix} N^t \\ M^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ \rho \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Zależność (3) można rozpisać w postaci:

$$\{N^t\} = [\mathbf{A}]\{\epsilon\}^{(c)} \quad (3a)$$

$$\{M^t\} = [\mathbf{D}]\{\rho\}^{(c)} \quad (3b)$$

Dokonując przekształceń otrzymuje się:

$$\{\epsilon\}^{(c)} = [\mathbf{A}]^{-1} \{N^t\} \quad (4a)$$

$$\{\rho\}^{(c)} = [\mathbf{D}]^{-1} \{M^t\} \quad (4b)$$

Ze skojarzenia równań (1), (3a) i (4a) wynika:

$$\sigma_i^{(k)} = Q_{ij}^{(k)} \cdot \left(\epsilon_j^{(c)} - \alpha_j^{(k)} \cdot \Delta T \right) \quad (5)$$

gdzie: $\sigma_i^{(k)}$ — naprężenie cieplne w warstwie o numerze k .

Równanie (5) stanowi podstawę do określania wartości $\sigma_i^{(k)}$ w kolejnych warstwach makrostruktury. Ze wzoru (5) wynika, że naprężenia termiczne są prostą funkcją gradientu temperatury ΔT w poszczególnych warstwach elementarnych. Przekształcając wzór (5), można otrzymać wzór służący do obliczania wartości odkształceń termicznych $\epsilon_i^{(k)}$:

$$\epsilon_i^{(k)} = S_{ij}^{(k)} \cdot \sigma_j^{(k)} + \alpha_i^{(k)} \cdot \Delta T \quad (6)$$

gdzie: $S_{ij}^{(k)}$ — macierz podatności warstwy k .

Wzór (5) w zapisie rozwiniętym ma postać:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}^{(k)} = [Q^{(k)}] \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_{12} \end{Bmatrix}^{(c)} - \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_{12} \end{Bmatrix}^{(k)} \cdot \Delta T \quad (7)$$

Na podstawie zależności (1) i (2) można uzyskać wzór do obliczenia naprężeń termicznych powstających w dowolnym typie makrostruktury (symetrycznej i niesymetrycznej):

$$\begin{Bmatrix} \sigma^{(k)} \end{Bmatrix} = [Q^{(k)}] \cdot \left\{ [\mathbf{A}]_+ x^{(k)} \cdot [\mathbf{B}] \cdot \{N^t\} + \right. \\ \left. + \left([\mathbf{B}]_+ x^{(k)} \cdot [\mathbf{D}] \right) \cdot \{M^t\} - \{\alpha^{(k)}\} \cdot \Delta T \right\} \quad (8)$$

gdzie: $x^{(k)}$ — współrzędna położenia warstwy k .

Zależność (8) jest bardzo skomplikowana i pracochłonna obliczeniowo. Dlatego przedmiot niniejszego artykułu stanowią wyłącznie struktury symetryczne, w odniesieniu do których naprężenia termiczne można obliczyć na podstawie prostszej zależności (5).

Wzór (7) wskazuje, że występowanie odkształceń postaciowych makrostruktury jest związane z wartościami współczynnika liniowej rozszerzalności cieplnej α_{12} . Wartości te są wielkościami tensorowymi, uzależnionymi od kąta pomiaru β . Zasadę przekształcania wielkości $\{\alpha_{ij}\}$, gdy następuje obrót o kąt β , przedstawia wzór (9) [7]:

$$\begin{Bmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{22} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ 2sc & -2sc & c^2 - s^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{22} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

gdzie: s, c — odpowiednio sinus i cosinus kąta β .

Wartość kąta $\beta = 0^\circ$ oznacza pomiar w kierunku włókien wzmacniających, a wartość kąta $\beta = 90^\circ$ oznacza pomiar w kierunku prostopadłym do kierunku ułożenia włókien wzmacniających. Tak więc pojawienie się wartości $\alpha_{12} \neq 0$ odpowiada ułożeniu włókien wzmacniających pod kątem różnym od 0° do 90° .

Z równań (1)—(8) wypływają następujące istotne wnioski:

— Podczas kształtowania wytworów w poszczególnych warstwach elementarnych powstają siły termiczne proporcjonalne do wartości iloczynów $Q_{ij}^{(k)} \cdot \alpha_j^{(k)} \cdot \Delta T$, tzn. do iloczynów wartości składowych macierzy sprężystości $Q_{ij}^{(k)}$, współczynników liniowej

rozszerzalności cieplnej $\alpha_j^{(k)}$ oraz gradientu temperatury ΔT .

— Siły termiczne w strukturach jednorodnych są proporcjonalne do gradientu temperatury ΔT , który jest złożoną funkcją grubości i kształtu przekroju makrostruktury. Mogą one spowodować naruszenie spójności mikrostruktury w przypadku kształtowania grubościennych wytworów jednorodnych (np. prętów lub kształtowników) i osiągają maksimum w trakcie cyklu kształtowania, maleją zaś do zera w warunkach swobodnego skurczu.

— W przypadku struktur złożonych lub hybrydowych (różne kąty ułożenia włókien lub różne gatunki warstw elementarnych) powstają siły i momenty termiczne uzależnione od konstrukcji makrostruktury.

— Momenty termiczne powstają w strukturach niesymetrycznych (pojawia się wówczas macierz blokowa **B** różna od zera) oraz w warunkach nierównomiernego przebiegu cyklu chłodzenia wytworu (różne wartości współczynnika przejmowania ciepła).

— Siły i momenty termiczne w strukturach wielowarstwowych są główną przyczyną rozwarstwień lub zniekształceń wyrobów z TWW (rys. 1b, c).

PROBLEMY OBLICZENIOWE

Podstawą prawidłowego zaprojektowania makrostruktury wytworów z TWW są obliczenia konstrukcyjne oraz technologiczne. Projekt makrostruktury musi zawierać następujące dane:

— układ warstw elementarnych w charakterystycznych przekrojach wytworu,

— rodzaj poszczególnych warstw elementarnych oraz ich charakterystyki mechaniczne i cieplne,

— wymiary geometryczne charakterystycznych przekrojów a także położenie poszczególnych warstw elementarnych.

Projekt makrostruktury będący wynikiem obliczeń konstrukcyjnych może być odrzucony na podstawie wyników obliczeń technologicznych. Problem ten jest znany pod nazwą „technologiczności konstrukcji” [5, 8] i dotyczy wytworów wykonywanych, praktycznie biorąc, z dowolnego materiału. Stwarza to konieczność wielokrotnego powtarzania obliczeń w celu uzyskania optymalnej makrostruktury (kompromis pomiędzy konstruktorem i technologiem).

Złożoność i pracochłonność wielokrotnych obliczeń konstrukcyjnych oraz technologicznych prowadzi do konieczności skorzystania z możliwości stwarzanych przez komputery.

W Katedrze Przeróbki Plastycznej Politechniki Rzeszowskiej opracowano pakiet prostych użytkowo programów komputerowych, częściowo rozwiązujących niektóre problemy obliczeniowe. Programy te wykorzystują możliwości standardowego arkusza kalkulacyjnego programu „Excel”. Pakiet ten składa się z następujących trzech modułów:

— moduł do obliczania charakterystyk sprężystych i termicznych dowolnych makrostruktur TWW,

— moduł do wyznaczania profili temperatury w przekroju makrostruktury w odniesieniu do różnych wariantów przebiegu cyklu grzanie—chłodzenie,

— moduł do obliczania sił, momentów termicznych oraz odkształceń makrostruktury w cyklach grzanie—chłodzenie dowolnych makrostruktur TWW.

Możliwości obliczeniowe opracowanych modułów ilustruje poniższy przykład. Do obliczeń wybrano płaską płytę grubości $g = 20$ mm wykonaną z kompozytu: EP/WS (GRP) (żywica epoksydowa + włókno szklane) o wzmocnieniu jednokierunkowym (zawartość włókna szklanego ok. 50% obj.). Właściwości mechaniczne i cieplne płyty miały następujące wartości [14]:

— współczynniki sprężystości:

$$E_1 = 38,6 \text{ GPa}; E_2 = 8,27 \text{ GPa}; G_{12} = 4,14; \nu_{12} = 0,26;$$

— współczynniki liniowej rozszerzalności cieplnej: $\alpha_1 = 8,6 \cdot 10^{-6}$; $\alpha_2 = 22 \cdot 10^{-6}$ (indeks 1 w obydwu przypadkach oznacza kierunek zgodny z ułożeniem włókien, indeks 2 — oznacza kierunek prostopadły do ułożenia włókien);

— współczynnik przewodności cieplnej: $\lambda = 0,25$ W/(m · K);

— gęstość: $d = 1700$ kg/m³;

— ciepło właściwe: $c_w = 1164$ J/(kg · K).

Wytwór jest kształtowany pomiędzy dwiema płaskimi płytami i po jego utwardzeniu poddany zostaje wymuszonemu chłodzeniu. Warunki chłodzenia: temperatura początkowa płyt kształtujących 200°C, temperatura końcowa płyt kształtujących 50°C.

Obliczenia przeprowadzono w odniesieniu do dwóch wariantów warunków chłodzenia:

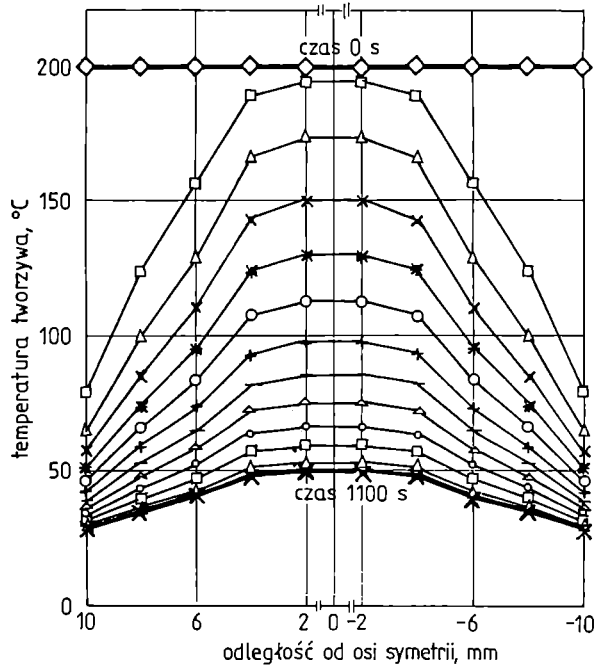
1) chłodzenie równomierne — jednakowe współczynniki przejmowania ciepła przez obie strony płyty: $a = 100$ W/(m² · K);

2) chłodzenie nierównomierne — różne współczynniki przejmowania ciepła wynoszące 100 W/(m² · K) — lewa strona płyty oraz 300 W/(m² · K) — prawa strona płyty.

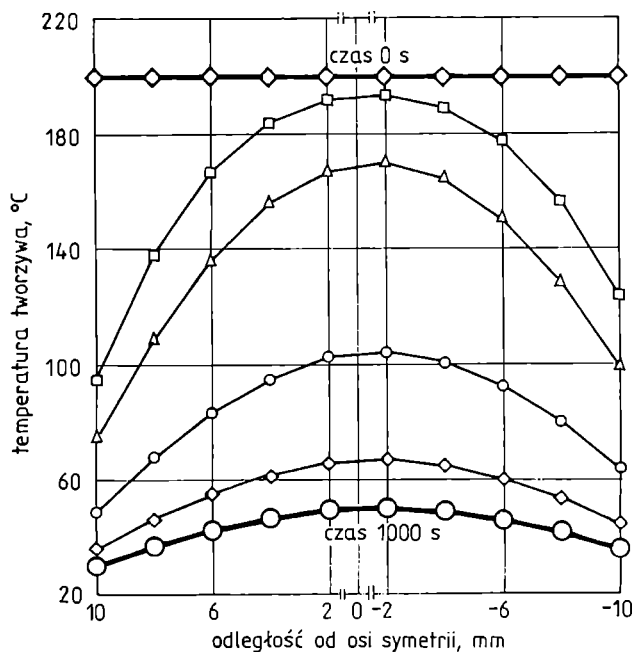
Rysunek 3 przedstawia przykład rozkładu temperatury (izochroniczny) w przekroju płyty w wariacie chłodzenia równomiernego, a rys. 4f — w wariacie chłodzenia nierównomiernego.

W odniesieniu do profili temperatury z rys. 3 i 4 obliczono przebiegi zmienności naprężeń cieplnych w kierunku ułożenia włókien. W obliczeniach przyjęto podział grubości makrostruktury na 10 warstw elementarnych. Rysunek 5 przedstawia zmienność naprężeń cieplnych w przypadku rozkładu temperatury z rys. 3, a rys. 6 dotyczy zmienności naprężeń cieplnych w odniesieniu do rozkładu temperatury z rys. 4.

Wyniki obliczeń wykazują, że podczas chłodzenia wytworu z TWW występują naprężenia cieplne zmienne w czasie, osiągające pewne maksimum i następnie malejące do zera. Wartości maksymalnych naprężeń są osiągane w tym samym czasie w warstwach zewnętrznych i wewnętrznych. W warstwach zewnętrznych są



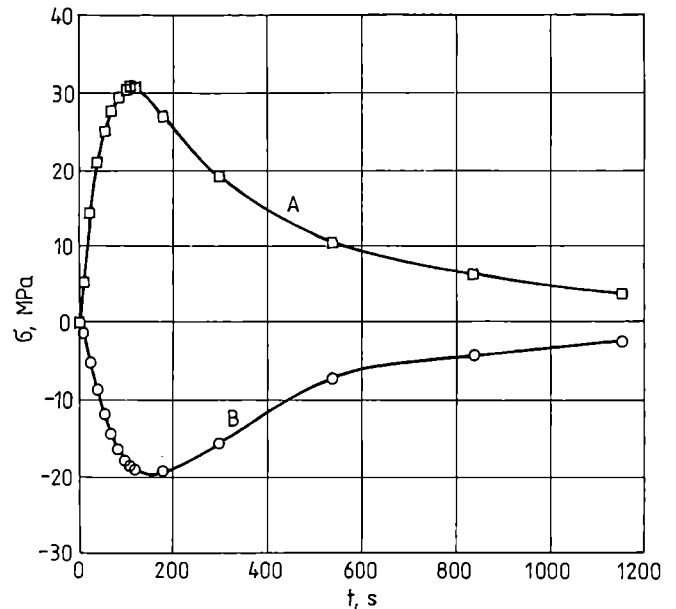
Rys. 3. Rozkład profili temperatury (izochron) w przekroju płyty w wariacie chłodzenia równomiernego
Fig. 3. Distribution of temperature profiles (isochrones) in the cross section of a uniformly cooled plate



Rys. 4. Rozkład profili temperatury (izochron) w przekroju płyty w wariacie chłodzenia nierównomiernego
Fig. 4. Distribution of temperature profiles (isochrones) in the cross section of a nonuniformly cooled plate

to naprężenia rozciągające, a w warstwach wewnętrznych — naprężenia ściskające. Naprężenia ciepłe przybierają wartości, które mogą przekraczać naprężenia graniczne, stając się przyczyną mikropęknięć lub rozwarstwień struktury (rys. 1a i b). W obliczeniach nie

uwzględniono jednak zjawisk relaksacyjnych, zachodzących zwłaszcza wyraźnie w stanie wysokoelastycznym materiału osnowy (żywicy), co w znacznym stopniu zmniejsza wartości występujących naprężeń. W przypadku chłodzenia równomiernego (rys. 3 i 5) wy-



Rys. 5. Przebieg zmian naprężeń cieplnych (σ) w funkcji czasu (t) w przypadku chłodzenia równomiernego (z rys. 3): A — naprężenia w skrajnych warstwach zewnętrznych makrostruktury, B — naprężenia w warstwie środkowej makrostruktury

Fig. 5. Thermal stresses (σ) in relation to time (t) on uniform cooling (cf. Fig. 3): A — stresses in outermost plies, B — stresses in medium ply

stępuje symetria wartości naprężeń, co oznacza zerową wartość momentu gnącego; natomiast w razie chłodzenia nierównomiernego (rys. 4 i 6) obserwuje się asymetrię wartości naprężeń prowadzącą do pojawienia się momentu gnącego, który jest przyczyną zniekształcenia wytworu (rys. 1c). Przeprowadzone przez nas obliczenia dotyczyły struktury jednorodnej i symetrycznej (jeden rodzaj warstw elementarnych o kącie ułożenia włókien $\beta = 0$). Znacznie groźniejsze zjawiska zachodzą w strukturach niejednorodnych (tzw. hybrydowych — różne rodzaje warstw elementarnych), w których wartości naprężeń cieplnych zależą nie tylko od gradientu temperatury, ale w sposób istotny również od wartości współczynników liniowej rozszerzalności cieplnej (por. tabela 2); dotyczy to np. struktur hybrydowych zawierających włókna szklane i włókna węglowe.

PODSUMOWANIE

Znajomość zjawisk zachodzących w trakcie cyklu utwardzania wytworów z TWW jest istotnym elemen-