

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

BRUNO KRYWULT

**WYBRANE ZAGADNIENIA KSZTAŁTOWANIA
I JAKOŚCI ZŁOŻONYCH MAKROSTRUKTUR ŻWW**



MECHANIKA

**Z. 101
GLIWICE
1990**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1081

BRUNO KRYWULT

**WYBRANE ZAGADNIENIA
I JAKOŚCI KSZTAŁTOWANIA
ZŁOŻONYCH MAKROSTRUKTUR ŻWW**

OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Stanisław MAZURKIEWICZ

Prof. dr hab. inż. Andrzej P. WILCZYŃSKI

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY — Prof. dr hab. inż. Jan Węgrzyn

REDAKTOR DZIAŁU — Prof. dr hab. inż. Józef Wojnarowski

SEKRETARZ REDAKCJI — Mgr Elżbieta Leško

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Eugenia Mandrak

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Druk z makiet przygotowanych przez Autora

PL ISSN 0434-0817

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 150+85	Ark. wyd. 7,5	Ark. druk. 6,875	Papier offset. kl. III 70x100. 70g
Oddano do druku 27.09.90	Podpis. do druku 27.09.90	Druk ukończ. w grudniu 1990	
Zam. 379/90			Cena zł 4 900,—

Fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

	Str.
1. WSTĘP	7
2. SKRÓTY I OZNACZENIA	9
3. PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES PRACY	11
4. WŁAŚCIWOŚCI PODSTAWOWYCH SKŁADNIKÓW MIKROSTRUKTURY TWW	13
4.1. Żywice syntetyczne	14
4.2. Włókna wzmacniające	29
5. KSZTAŁTOWANIE WYROBÓW Z TWW	33
6. ZJAWISKA TERMOMECHANICZNE TOWARZYSZĄCE ZESTALANIU MIKRO- I MA- KROSTRUKTURY TWORZYW WZMOCNIONYCH WŁÓKNAMI	37
6.1. Uwagi ogólne	37
6.2. Naprężenia cieplne w mikrostrukturze warstw elementarnych ...	38
6.3. Naprężenia cieplne w makrostrukturze TWW	43
6.4. Uwagi końcowe	51
7. TEZY PRACY	53
8. PROBLEMY JAKOŚCI WYROBÓW Z TWW	55
8.1. Uwagi ogólne	55
8.2. Typowe wady technologiczne wyrobów z TWW	56
8.3. Jakość makrostruktury TWW	62
8.4. Analiza i ocena wyników badań jakości TWW	71
9. NAPRĘŻENIA CIEPLNE W MAKROSTRUKTURACH TWW	75
9.1. Uwagi ogólne	75
9.2. Naprężenia szczątkowe	76
9.2.1. Przedmiot badań	76
9.2.2. Metodyka i wyniki badań wstępnych	76
9.2.3. Wstępna analiza wyników	76
9.3. Badania odkształcalności cieplnej makrostruktur	78
9.3.1. Uwagi ogólne i badania wstępne	78
9.3.2. Badania dylatometryczne	80
9.4. Obliczenia teoretyczne	93
9.4.1. Wartości szczątkowych naprężeń cieplnych	93
9.4.2. Wartości "zamrożonego" odkształcenia materiału osnowy.	9
9.4.3. Ocena wyników obliczeń teoretycznych	98
9.5. Ogólna ocena wyników badań naprężeń cieplnych	98
10. UWAGI OGÓLNE I WNIOSKI KOŃCOWE	101
11. WYKAZ LITERATURY	103

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. ВВЕДЕНИЕ	7
2. СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ	9
3. ПРЕДМЕТ, ЦЕЛЬ И ОБЪЕМ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	11
4. СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ МИКРОСТРУКТУРЫ ССАВ	13
4.1. Синтетические смолы	14
4.2. Армирующие волокна	29
5. ФОРМИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ССАВ	33
6. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ВО ВРЕМЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ МИКРО И МАКРОСТРУКТУРЫ ССАВ	37
6.1. Общие примечания	37
6.2. Термические напряжения в микроструктуре элементарных слоев ..	38
6.3. Термические напряжения в макроструктуре ССАВ	43
6.4. Заключительные примечания	51
7. ТЕЗИСЫ РАБОТЫ	53
8. ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ССАВ	55
8.1. Общие примечания	55
8.2. Типичные технологические дефекты изделий из ССАВ	56
8.3. Качество макроструктуры ССАВ	62
8.4. Анализ и оценка результатов исследований качества ССАВ	71
9. ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МАКРОСТРУКТУРАХ ССАВ	75
9.1. Общие примечания	75
9.2. Остаточные напряжения	76
9.2.1. Предмет исследований	76
9.2.2. Методика и результаты предварительных исследований ..	76
9.2.3. Предварительный анализ результатов	76
9.3. Исследования термической деформативности макроструктур	78
9.3.1. Общие применения и предварительные исследования	78
9.3.2. Дилатометрические исследования	80
9.4. Теоретические вычисления	93
9.4.1. Величина остаточных напряжений	93
9.4.2. Величина "замороженных" деформации материала основы ..	96
9.4.3. Оценка результатов теоретических вычислений	98
9.5. Общая оценка результатов исследований термических напряжений.	98
10. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ПРИМЕЧАНИЯ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ	101
11. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	103

CONTENTS

	Page
1. INTRODUCTION	7
2. GLOSSARY AND ABBREVIATIONS	9
3. RANGE AND AIM OF THE RESEARCH WORK	11
4. PROPERTIES OF THE BASIC COMPONENTS OF THE FRP MICROSTRUCTURE.....	13
4.1. Synthetic resins	14
4.2. Reinforcing fibers	29
5. MANUFACTURING OF THE FRR PRODUCTS	33
6. THERMOMECHANICAL EFFECTS DURING THE CURE CYCLE OF FRR STRUCTURES .	37
6.1. General conditions	37
6.2. Thermal stresses in the microstructure of the elementary plies	38
6.3. Thermal stresses in FRR macrostructures	43
6.4. Final remarks	51
7. THESES OF THE WORK	53
8. QUALITY PROBLEMS OF THE FRR PRODUCTS	55
8.1. General conditions	55
8.2. Typical technological defects of the FRR products	56
8.3. Quality of the FRR macrostructures	62
8.4. Analysis and estimation of the FRR quality-test results	71
9. THERMAL STRESSES IN FRR MACROSTRUCTURES	75
9.1. General conditions	75
9.2. Residual stresses	
9.2.1. The subject of tests	76
9.2.2. Methodology and results of preliminary tests	76
9.2.3. Preliminary analysis of the tests results	76
9.3. Thermal expansion measurements of FRR macrostructures	78
9.3.1. General conditions and preliminary tests	78
9.3.2. Dilatometric measurements	80
9.4. Theoretical calculations	93
9.4.1. Values of residual thermal stresses	93
9.4.2. The value of the "frozen" strain in the matrix ma- terial	96
9.4.3. Estimation of theoretical calculation results	98
9.5. General estimation of the thermal stresses test results	98
10. GENERAL REMARKS AND FINAL CONCLUSIONS	101
11. REFERENCES	103

1. WSTĘP

Tworzywa wzmocnione włóknami (T W W) - to odrębna, obszerna grupa materiałów konstrukcyjnych. Nazwa tej grupy materiałów stanowi odpowiednik powszechnie używanych nazw w językach obcych:

- волокнистые армированные пластики,
- faserverstärkte Plaste (Kunststoffe) - F V P (F V K),
- fiber reinforced plastics - F R P.

W języku potocznym - nie tylko polskim - funkcjonują również inne nazwy: laminaty, kompozyty, tworzywa zbrojone. Pomimo licznych i efektywnych zastosowań T W W w krajowym przemyśle, materiały te traktowane są wciąż jeszcze jako "prototypowe". Jest to w wielu przypadkach całkowicie uzasadnione, chociażby ze względu na brak norm przedmiotowych oraz przepisów określających warunki konstrukcyjne i eksploatacyjne dla tych materiałów. Istniejące, fragmentaryczne opracowania krajowe oraz liczne i dostępne opracowania zagraniczne powinny stanowić podstawę do szybkiego uregulowania tej kwestii. TWW są bowiem ważnym elementem zbioru nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, mającym już liczne, potwierdzone praktycznie i bardzo efektywne zastosowania. Dowodem są obszerne monografie [1, 2, 3].

Wprowadzenie T W W do zbioru materiałów konstrukcyjnych poprzedzone zostało wieloletnimi pracami badawczymi w ośrodkach naukowych, związanych głównie z przemysłem obronnym oraz kosmicznym.

Pierwsze normy przedmiotowe, określające warunki oceny jakości T W W (ZWS), opracowane zostały w Naval Ordnance Laboratory (NOL) - USA, rozpowszechnione na świecie przez bardzo skuteczne w ocenie włókien wzmacniających: próbki NOL [4, 5].

Upowszechnienie stosowania TWW w przemyśle cywilnym mogło nastąpić po opracowaniu materiałów i technologii wytwarzania, gwarantujących wymaganą wydajność i opłacalne technicznie koszty. Pojawili się wytwórcy obszernej gamy półwyrobów i wyrobów z TWW, np.: preimpregnatów, taśm, prętów, kształtowników, rur, zbiorników. Wytwórcy ci narzucili dostawcom surowców i materiałów pomocniczych wysokie wymagania technologiczne i jakościowe, wymuszając intensywny rozwój opracowań nowych jakościowo gatunków żywic syntetycznych, włókien wzmacniających, środków pomocniczych. TWW stały się materiałami, których zastosowanie zabezpieczają liczne placówki naukowo-badawcze.

Opisana sytuacja ma miejsce w krajach o wysokim poziomie technik wytwarzania materiałów i urządzeń w dużym stopniu niezależnych od importu. Kra-

jiowi wytwórcy i potencjalni użytkownicy TWW są niestety w sytuacji znacznie mniej korzystnej, oddziela ich od innych krajów nie tylko dystans czasowy, lecz również - a może przede wszystkim - brak realnej perspektywy wykorzystania krajowych materiałów i urządzeń do wytwarzania wyrobów z TWW.

Pozostaje więc rozwiązanie w postaci importu i zakupów licencji, które umiejętnie wykorzystane mogą stać się czynnikiem likwidującym dystans technologiczny i gwarantującym utrzymanie poziomu wytwarzanych wyrobów.

W takiej sytuacji znajduje się krajowy przemysł lotniczy, dla którego struktury TWW są jednym z podstawowych, nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych.

Uruchomienie licencyjnej produkcji wyrobów z TWW stawia ich wytwórcę wobec licznych, zupełnie nowych problemów konstrukcyjnych i technologicznych. Nawet bardzo konkretne i szczegółowe instrukcje technologiczne, przekazane przez licencjodawcę, nie zapewniają szybkiego i efektywnego ekonomicznie uruchomienia produkcji.

O powodzeniu uruchomienia produkcji tych wyrobów decyduje w dużym stopniu poziom opanowania złożonych i precyzyjnych operacji kształtowania i zestawiania struktur TWW. Jest to szczególnie ważne, ponieważ jakość wyrobów z TWW jest wynikiem wpływu znacznie większej liczby czynników technologicznych i konstrukcyjnych w porównaniu z analogicznymi wyrobami wytwarzanymi ze stopów aluminium.

Identyfikacja tych czynników jest sprawą decydującą o możliwościach ich kontrolowania, a tym samym skutecznego eliminowania powstających wad technologicznych. Możliwości takie stwarzają badania mikro- i makrostruktury wyrobów, których wytwarzanie znajduje się w stadium rozruchu technologicznego, a których wykonanie podjęto w niniejszej pracy. Wykonanie tego zadania badawczego wymagało pomocy i zrozumienia ze strony wytwórcy tych wyrobów - WSK-PZL Mielec.

Pragnę wyrazić podziękowanie recenzentom pracy: prof. dr hab. inż. Stanisławowi Mazurkiewiczowi oraz prof. dr hab. inż. Andrzejowi Wilczyńskiemu, za cenne uwagi i przychylność w ocenie jej treści.

Podziękowania chciałbym również złożyć prof. zw. dr hab. inż. Józefowi Wojnarowskiemu za cenne uwagi i pomoc w redakcji pracy.

2. SKRÓTY I OZNACZENIA

- DSC - Differential Scanning Calorimetry,
KSI - kilopound per square inch (tysiąc funtów na cal kwadratowy:
1 KSI \cong 6,89 MPa),
MES - metoda elementów skończonych,
TS - tworzywa sztuczne,
TWW - tworzywa wzmocnione włóknami,
WB - włókna borowe,
WC - włókna węglowe,
WLRC - współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej - α ; K^{-1} ,
WM - włókna metalowe,
WO - włókna organiczne,
WORC - współczynnik objętościowej rozszerzalności cieplnej - β ; K^{-1} ,
WPC - współczynnik przewodności cieplnej - λ ; W/m.K,
WS - włókna szklane,
WW - włókna wzmacniające,
Ż E - żywice epoksydowe,
Ż P - żywice poliestrowe,
Ż S - żywice syntetyczne,
ŻWC - żywice wzmocnione włóknami węglowymi,
ŻWM - żywice wzmocnione włóknami metalowymi,
ŻWO - żywice wzmocnione włóknami organicznymi:
np. KEVLAR [®], NOMEX [®],
ŻWS - żywice wzmocnione włóknami szklanymi,
ŻWW - żywice wzmocnione włóknami,
 ζ - odkształcenie względne, postaciowe - %,
 ξ - odkształcenie względne, liniowe - %,
 η - lepkość dynamiczna - Pa.s,
 ν - liczba Poissona,
 σ - naprężenie normalne - MPa,
 τ - naprężenie styczne - MPa,
 τ_{max} - wytrzymałość przy ścinaniu międzywarstwowym - MPa,
 φ - krzywizna - m^{-1} ,
E - moduł sprężystości wzdłużnej - MPa,
E_g - moduł sprężystości przy zginaniu - MPa,
E_r - moduł sprężystości przy rozciąganiu - MPa,

- G - moduł sprężystości postaciowej - MPa,
- K - moduł sprężystości objętościowej - MPa,
- M - momenty - N.m,
- N - siły wzdłużne - N,
- P - ciśnienie - MPa,
- R_g - wytrzymałość na zginanie - MPa,
- R_m - wytrzymałość na rozciąganie - MPa,
- t - czas - s,
- T - temperatura - K (°C),
- T_g - temperatura zeszklenia,
- T_u - temperatura utwardzania,

Oznaczenie przyjęte w opracowaniu statystycznym wyników:

- \bar{X} - wartość średniej arytmetycznej,
- σ - wartość oszacowania odchylenia standardowego,
- R - rozstęp wyników.

3. PRZEDMIOT, CEL I ZAKRES PRACY

Przedmiotem pracy są struktury konstrukcyjne z TWW stosowane w przemyśle lotniczym do wytwarzania wybranych elementów poszycia samolotów. Stosowanie struktur TWW w krajowym przemyśle lotniczym ma już swoją tradycję sięgającą lat sześćdziesiątych, ale dotyczy to właściwie tylko jednej grupy tych materiałów - ŻWS. Struktury ŻWS były i są stosowane z dużym powodzeniem technicznym w krajowych konstrukcjach szybowców. Duże doświadczenia w stosowaniu struktur ŻWS ma również krajowy przemysł stoczniowy, produkujący udane konstrukcje jachtów, łodzi ratunkowych oraz większych jednostek pływających. Stosowanie struktur ŻWS w krajowym przemyśle ogranicza się jednak do struktur kształtowanych "na zimno" - określenie przyjęte z obróbki plastycznej oznacza, że w procesach kształtowania i zestalania nie stosuje się ogrzewania. Wytwarzanie tych struktur opiera się głównie na tzw. laminowaniu ręcznym. Wymienione wyżej warunki wytwarzania wyrobów z ŻWS są typowe dla produkcji jednostkowej i małoseryjnej. Właściwości mechaniczne tak wytwarzanych struktur ŻWS są znacznie niższe od rzeczywistych możliwości mikrostruktury, określonych właściwościami włókien wzmacniających. Potwierdzają to liczne publikacje, np. [6, 7, 8].

Warunkiem zasadniczym wprowadzenia struktur TWW do konstrukcji lotniczych jest ich konkurencyjność techniczna w stosunku do materiałów tradycyjnych - głównie stopów Al. Dlatego wzrosły istotnie wymagania jakościowe i technologiczne gwarantujące powtarzalną, wysoką jakość wyrobów z TWW. Zasadnicze zagadnienia wynikające z powyższego stwierdzenia zostały omówione w publikacjach, np. [3, 9, 10, 11].

Rozwiązanie tych zagadnień wymaga podjęcia obszernych prac badawczych oraz analiz teoretycznych o charakterze podstawowym, których wyniki mogą stworzyć warunki pełnej, rzetelnej kontroli procesów technologicznych oraz jakości wyrobów. Jest to szczególnie ważne w produkcji wyrobów, których asortyment obejmuje setki, różnych pod względem struktury, kształtu i wymiarów wyrobów z TWW.

Zasadniczym celem pracy jest próba jakościowego i ilościowego ujęcia niektórych zjawisk towarzyszących procesom kształtowania i zestalania (utwardzania) struktur TWW. Analizie poddano wyroby wytwarzane w WSK-PZL Mielec i stosowane w konstrukcji samolotu AN-28. Wyroby stanowiące bardzo zróżnicowane pod względem konstrukcyjnym i materiałowym struktury, wytwarzane są na technologii licencyjnej. Technologię tę można określić już jako przemysłową, mimo występujących jeszcze przejściowo tymczasowych warunków technicznych wytwarzania.

Podstawową nowością tej technologii dla krajowego wytwórcy jest podział na odrębne, szczegółowe operacje technologiczne. Wynik tych operacji określają warunki techniczne, przestrzeganie których powinno gwarantować właściwy wynik całego procesu technologicznego.

Szczególną nowością tego procesu technologicznego jest operacja kształtowania i zestalania wyrobu z zastosowaniem ciśnienia oraz ogrzewania do temperatur tzw. utwardzania na gorąco. Warunki tymczasowe dopuszczają przejściowe stosowanie kształtowania podciśnieniowego, przewidując docelowe stosowanie kształtowania ciśnieniowego w autoklawach. Jest sprawą oczywistą, że wdrożenie tej nowej i skomplikowanej technologii wytwarzania będzie wymagać od producenta przejścia na wyższy poziom organizacyjny i technologiczny. Wynik procesu produkcyjnego określa wiele czynników, których opanowanie i kontrola wymaga poznania podstawowych zjawisk towarzyszących poszczególnym operacjom technologicznym. Stwierdzenie to wyjaśnia i uzasadnia potrzebę realizacji prac badawczych, a tym samym również niniejszej pracy.

W pracy uwzględniono głównie struktury i wyroby z ŻWS, które ze względu na ich znaczący udział w produkcji można uznać za decydujące o powodzeniu prac wdrożeniowych. Badania przeprowadzono na próbkach pobranych z bieżącej produkcji WSK-PZL Mielec.

Zakres pracy obejmuje:

- przegląd literatury tematycznej i zestawienie informacji istotnych dla przyjętych tez pracy,
- badania jakościowe makrostruktur TWW,
- zestawienie typowych wad technologicznych na poziomach mikro- i makrostruktury,
- badania naprężeń szczątkowych,
- badania odkształcalności cieplnej,
- analizę teoretyczną i ocenę wyników badań.

4. WŁAŚCIWOŚCI PODSTAWOWYCH SKŁADNIKÓW MIKROSTRUKTURY TWW

Podstawowym źródłem bardzo interesujących technicznie właściwości TWW jest niewątpliwie ich mikrostruktura, która kojarzy wartościowe cechy jej dwóch podstawowych składników:

- osnowy (matrycy),
- włókien wzmacniających.

Charakterystyka geometryczna oraz mechanika odkształceń idealizowanej mikrostruktury TWW stanowią przedmiot licznych publikacji i monografii, np. [12, 13, 14, 15].

Informacje zawarte w tych pozycjach dają wystarczające podstawy do wstępnej oceny teoretycznych możliwości mikrostruktur TWW z udziałem różnych gatunków włókien wzmacniających: szklanych, węglowych, borowych, metalowych i innych.

Możliwości konstrukcyjne mikrostruktur TWW, mierzone wytrzymałością, sztywnością oraz niską gęstością, są rzeczywiście imponujące w zestawieniu z typowymi materiałami, np. stalami, stopami Al. Prospekty handlowe oraz liczne publikacje o charakterze reklamowym eksponują wyłącznie zalety TWW, nie informując rzetelnie potencjalnych wytwórców o rzeczywistych, istotnych problemach technologicznych i konstrukcyjnych wynikających już przy tworzeniu mikrostruktury.

Informacje z tego zakresu są dobrze znane praktykom, którzy mają już za sobą pierwsze, nie zawsze pozytywne doświadczenia produkcyjne. Wnioski wyciągane z tych doświadczeń można sprowadzić do następujących uwag:

- proces tworzenia mikrostruktury, stanowiący gwarancję dobrej jednorodności oraz powtarzalności jej właściwości, jest pod względem technologicznym bardzo złożony i trudny,
- składniki mikrostruktury stawiają wysokie wymagania technologiczne, szczególnie w zakresie kontroli i regulacji parametrów przetwórstwa, np. temperatury, ciśnienia, lepkości,
- mikrostruktura TWW wykazuje szczególną czułość na rozwarstwienie, co wymaga specjalne i złożone metody obróbki wykańczającej oraz łączenia części.

Powyższe uwagi można znacznie rozszerzyć, co doprowadziłoby do ogólnego stwierdzenia:

tworzenie i użytkowanie mikrostruktur TWW musi opierać się na ścisłych i trudnych do ominięcia, jednoznacznych przepisach technicznych gwarantujących właściwą jakość wyrobów.

Stwierdzenie to ma charakter sloganowy, jego treść powinna się odnosić do każdego materiału i wyrobu. W przypadku TWW użycie tego stwierdzenia ma charakter szczególnie ostrzegawczy, ponieważ są to materiały kosztowne, a wytworzone braki technologiczne są niemożliwe do ponownego wykorzystania oraz szkodliwe ekologicznie.

Dlatego w przypadku struktury TWW obserwuje się niezwykłą liczebność opracowań teoretycznych i eksperymentalnych, traktujących o możliwościach i warunkach otrzymania właściwej, optymalnej jakości mikrostruktury oraz metodach jej kontroli, np. [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21].

W ostatnich latach nastąpiło istotne uproszczenie dotychczasowych problemów. Pojawili się poważni wytwórcy preimpregnatów i półwyrobów, na wzór półwyrobów metalowych, tzn. taśm, płyt, rur, kształtowników itp. Wytwórcy ci, w ścisłej współpracy z producentem żywicy syntetycznych i włókien wzmacniających, opracowali technologie i materiały gwarantujące otrzymywanie obszernej gamy mikrostruktur TWW - w tym najnowszych, tzw. hybrydowych. Do producentów takich należy firma KREMPEL z RFN. Informacje o asortymencie produkcyjnym tej firmy można uzyskać z katalogu [22].

Preimpregnaty o wysokiej jakości mikrostruktury i długiej "żywności" technologicznej stanowią niezwykle atrakcyjny materiał konstrukcyjny, pozwalający na projektowanie i kształtowanie złożonych mikrostruktur TWW. Stanowi to bardzo poważny argument techniczny i ekonomiczny dla szybkiego rozszerzenia asortymentu zastosowań TWW.

4.1. Żywice syntetyczne (ŻS)

Żywice syntetyczne należą do odrębnej obszernej grupy tworzyw sztucznych określanej nazwą:

tworzywa utwardzalne - duroplasty.

Grupa ta posiada wiele indywidualnych właściwości, z których kilka pre dysponuje je szczególnie do spełniania funkcji osnowy (matrycy) w mikrostrukturze TWW. Należą do nich:

- dobre zdolności technologiczne: niska lepkość w stanie płynnym, dobra adhezja do typowych włókien wzmacniających, możliwość utwardzania "na zimno" i "na gorąco", itd.
- zdolności "regulacyjne" właściwości potrzebnych do właściwej współpracy z włóknami wzmacniającymi: odkształcenie graniczne, moduł sprężystości, skurcz technologiczny, itp.,
- korzystne i oryginalne właściwości użytkowe: elektryczne, cieplne (wytrzymałość cieplna), mała gęstość, niski koszt surowca itp.

Wymienione grupy właściwości zdecydowały o powszechności zastosowań ŻS jako osnowy w mikrostrukturze TWW. Trudno jest aktualnie omówić, chociażby skrótowo, kryteria wyboru konkretnych gatunków ŻS. Jest to praktycznie nie-

możliwe ze względu na aktualny stan wytwarzania, obejmujący setki różnych gatunków ŻS o indywidualnych "przydziałach" do specyficznych zastosowań TWW. Kryteria tych "przydziałów" są bardzo zróżnicowane, tak jak różnorodny jest aktualny katalog zastosowań TWW. Nie budzą one wątpliwości w przypadkach szczególnych zastosowań, takich jak: materiały elektroizolacyjne, o podwyższonej odporności cieplnej, niepalności, odporności chemicznej itp. W innych przypadkach kryteria "przydziału" nie są tak jednoznaczne czy oczywiste, a ich szczegółowe treści teoretyczne i praktyczne rzadko publikowane.

Szczególne wymagania narzuca materiałowi osnowy teoretyczne ujęcie problemu tzw. "idealnej osnowy". Jest to zbiór właściwości fizycznych i fizykochemicznych, gwarantujący najlepsze wykorzystanie właściwości danej mikrostruktury TWW. Fragmentaryczne informacje na ten temat można uzyskać z literatury, np. [13, 15, 16, 20, 23].

Znacznie bardziej obszerne i liczne są publikacje o możliwościach syntezy, strukturze i właściwościach ŻS, np. [7, 24, 25, 26, 27].

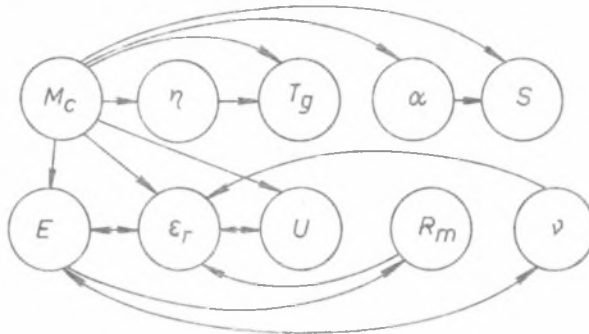
Omówione dotychczas problemy stosowania ŻS jako osnowy TWW mają charakter kompleksowy oraz istotne znaczenie dla krajowych wytwórców wyrobów. Nie rozwijając tego stwierdzenia, potencjalny krajowy wytwórca wyrobów musi być zorientowany w istotnych zagadnieniach podstawowych decydujących o powodzeniu technicznym zastosowanych materiałów, szczególnie importowanych. Niektóre z tych zagadnień postaramy się omówić i ocenić ilościowo, mając na uwadze przyjęty cel i zakres pracy.

Problemem zasadniczym dla oceny przydatności ŻS, jako osnowy TWW, są możliwości "regulowania" właściwości i tym samym uzyskania materiału optymalnego pod względem technologicznym i użytkowym. Jest to problem dotyczący wszystkich materiałów, zmuszający do ścisłej współpracy wytwórców materiałów z wytwórcami wyrobów. Właściwości technologiczne i użytkowe mogą być przedstawione przez reprezentatywne wskaźniki. Niektóre z takich wskaźników oraz schemat ich wzajemnego oddziaływania przedstawiono na rys. 1.

Przedstawiony na rys. 1 schemat wzajemnych oddziaływań wskaźników ma charakter poglądowy, ale obrazuje skalę i złożoność problemu opracowania tzw. "idealnej" osnowy. Uzyskane w wyniku rozważań teoretycznych optymalne wskaźniki właściwości mechanicznych osnowy mogą się stać zupełnie sprzeczne z wymogami technologicznymi. Nie oznacza to jednak impasu - ponieważ intensywne prace w dziedzinie syntezy nowych gatunków przynoszą rewelacyjne efekty. Informacje na temat nowych gatunków ŻS oraz ich właściwości, opracowanych specjalnie dla potrzeb TWW można uzyskać np. z literatury [6, 11, 24, 26, 28, 29].

Złożone i wielostronne zależności wiążące poszczególne właściwości ŻS wynikają z ich mikrostruktury. ŻS należą do polimerów utwardzalnych, których zasadniczą cechą jest nieodwracalność zmian właściwości fizycznych następujących w reakcji sieciowania przestrzennego. Oznacza to dla technológów przetwórstwa polimerów jednorazowość stanu plastyczno-płynnego surowca,

w odróżnieniu od polimerów termoplastycznych - zdolnych do wielokrotnego uplastyczniania,



Rys. 1. Wskaźniki określające ważniejsze właściwości technologiczne i mechaniczne polimeru oraz ich wzajemne oddziaływanie:

M_C - masa cząsteczkowa segmentu między węzłami sieci strukturalnej; $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, η - lepkość; $\text{Pa} \cdot \text{s}$, T_g - temperatura zeszklenia; K , α - współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej - WLRC; K^{-1} , S - skurcz technologiczny; %, E - moduł sprężystości; MPa , ϵ_r - wydłużenie przy zerwaniu; %, U - udarność; $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$, R_m - wytrzymałość przy rozciąganiu; MPa , ν - liczba Poissona

Fig. 1. Factors describing major technological and mechanical properties of polymers and their interaction:

M_C - molecular mass of the segment between nodes of the structural network; $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, η - viscosity; $\text{Pa} \cdot \text{s}$, T_g - glass transition temperature; K , α - coefficient of linear thermal expansion; K^{-1} , s - technological shrinkage; E - modulus of elasticity; MPa , ϵ_r - ultimate unit elongation; U - impact strength; MPa , ν - Poisson ratio

Z punktu widzenia fizyki ciała stałego, ŻS należą do materiałów o strukturze bezpostaciowej, której tradycyjnymi przedstawicielami są szkła - np. szkło organiczne - PMMA. Zjawiska charakterystyczne dla tych struktur są niezwykle interesujące dla badaczy (np. światłowodów), ale ich ujęcie w ogólne prawa i reguły jest bardzo trudne. Stąd wiele spośród znanych i badanych zjawisk zachodzących w tych strukturach oczekuje na wiarygodne i uniwersalne opracowanie teoretyczne.

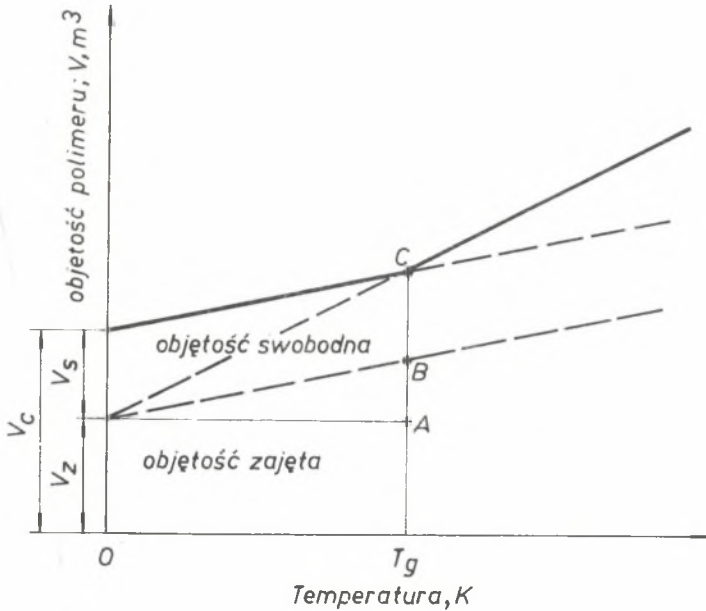
Próbnymi takimi opracowań są monografie, np. [30, 31, 32, 33, 34].

Skoncentrujemy się więc na niektórych zjawiskach mających bardzo istotne znaczenie dla praktyki konstrukcyjnej i technologicznej stosowania ŻS jako osnowy TW. Zjawiska te omówimy w pewnej kolejności, umożliwiającej uzasadnienie przyjętych tez pracy oraz programu badań.

O b j ę t o ś ć w ł a ś c i w a

Jest to wielkość fizyczna o podstawowym znaczeniu dla charakterystyki mikrostruktury polimerów, w tym ŻS. Zależność objętości właściwej od tem-

peratury oraz jej podział i nazewnictwo, wg Rabka [30], ilustruje i wyjaśnia rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyczne objętości właściwe polimeru bezpostaciowego, wg Rabka: [30]

Fig. 2. Characteristic specific volumes of the amorphous polymers, according to Rabek [30]

Przyjęcie takiej interpretacji zjawisk i charakterystyki mikrostruktury ZS pozwala na ustalenie kilku ważnych zależności teoretycznych.

Zmianę objętości właściwej polimeru ze wzrostem temperatury charakteryzuje WORC (współczynnik objętościowej rozszerzalności cieplnej);

$$\beta = \frac{1}{V_c} \cdot \left[\frac{\partial V}{\partial T} \right]. \quad (1)$$

Z rys. 2. wynikają następujące zależności:

$$V_c = V_z + V_s. \quad (2)$$

Dla temperatur: $T < T_g$

$$\beta = \beta_g = \frac{AB}{T_g} \cdot \frac{1}{V_c} \quad (3)$$

Dla temperatur: $T > T_g$

$$\beta = \beta_{we} = \frac{AC}{T_g} \cdot \frac{1}{V_c} \quad (4)$$

Wartości β łączy zależność:

$$\Delta\beta = (\beta_{we} - \beta_g) = \frac{AC - AB}{T_g} \cdot \frac{1}{V_c} \quad (5)$$

$$\Delta\beta = \frac{V_s}{V_c} \cdot \frac{1}{T_g} = f_s \cdot \frac{1}{T_g} \quad (5a)$$

gdzie:

V_c, V_z, V_s - odpowiednio objętości: całkowita, zajęta, swobodna,

f_s - względna objętość swobodna:

$$f_s = \frac{V_s}{V_c} = \frac{V_s}{V_z + V_s} \quad ,$$

β_g, β_{we} - odpowiednio WORC: w stanie szklistym, w stanie wysokoelastycznym, K^{-1} ,

T_g - temperatura zeszklenia (zeszklenie - mięknienie strukturalne), K.

Bartniew i Zieleniew [32] podają również następujące ujęcie ogólnego równania stanu polimerów:

$$\beta = \delta \cdot \frac{C_v}{V \cdot K_T} \quad (6)$$

gdzie:

β - WORC; K^{-1} ,

C_v - ciepło właściwe przy stałej objętości; $\frac{J}{kg \cdot K}$,

K_T - objętościowy (izotermiczny) moduł ściśliwości;

$$\frac{N}{m^2} \quad , \quad K_T = -V \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right) \quad ,$$

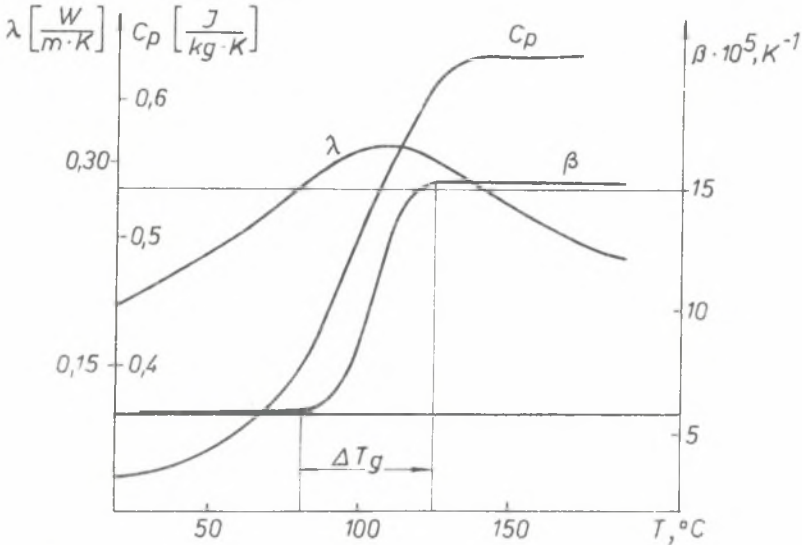
δ - parametr Gruneisena,

$$\delta = -\frac{V}{\beta} \cdot \left(\frac{\partial \beta}{\partial V} \right)_T \quad , \quad (\text{dla } \text{ZS}, \delta = 4) \quad ,$$

V - objętość właściwa; $\frac{m^3}{kg}$,

ν - częstość drgań normalnych; s^{-1} .

Przedstawione powyżej zależności stanowią podstawę do weryfikacji doświadczalnej, której wyniki przedstawione są w licznych publikacjach. Wybrane, istotne dla praktyki technologicznej oraz dalszych rozważań, informacje przedstawiają rys. 3 do 5.



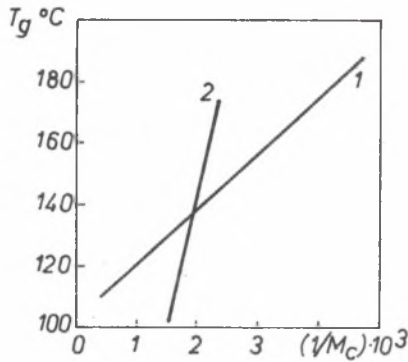
Rys. 3. Zmiany wartości ciepła właściwego: c_p ; WPC: λ , oraz WORC: β , w obszarze przemiany stanu szklistego w stan wysokiej elastyczności - dla typowego polimeru bezpostaciowego, wg [32]

Fig. 3. Values variation of the specific heat: C_p , thermal conductivity λ and coefficient of volume thermal expansion β in a region of glass-high elasticity state transformation for typical amorphous polymers [32]

Rys. 3 przedstawia ważną dla praktyki informację o dodatkowych zjawiskach towarzyszących zmianom temperatury, tzn. zmianie wartości ciepła właściwego oraz WPC (współczynnika przewodności cieplnej). Zmiany te wykazują istotny skok w zakresie temperatur zeszklenia T_g .

Rys. 4. przedstawia wpływ mikrostruktury na wartość temperatury zeszklenia: T_g . Wielkością charakteryzującą mikrostrukturę polimerów usieciowanych wg [30] jest wartość masy cząsteczkowej \bar{M}_c ; [kg/mol], wyrażająca średnią masę segmentu struktury pomiędzy węzłami sieci. Wpływ wielkości \bar{M}_c na wartość temperatury T_g skutkuje w bardzo znaczący sposób na możliwości użytkowania ŻS oraz na przebieg i charakter zjawisk towarzyszących procesom technologicznym zestalania TWW.

Rys. 5 ilustruje wpływ dwóch ważnych parametrów technologicznych przetwórstwa TWW, tzn. ciśnienia oraz temperatury T na wartość objętości właściwej utwardzonego tworzywa amorficznego oraz położenie obszaru przemiany stanów fizycznych: szklistego i wysokiej elastyczności.

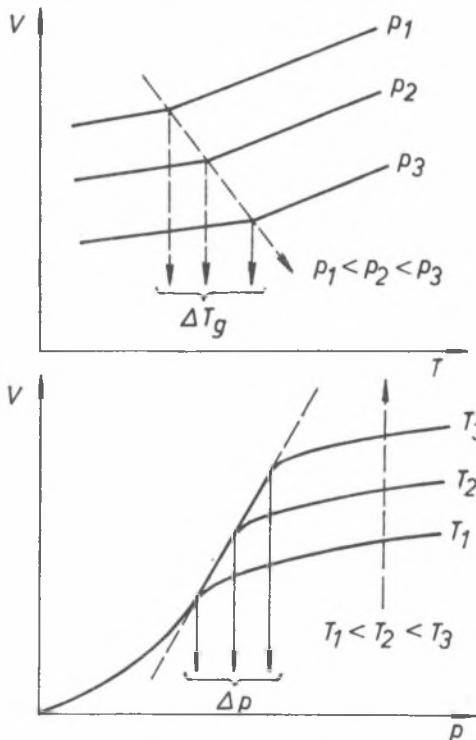


Rys. 4. Wpływ wielkości masy cząsteczkowej polimeru: M_c - na wartość temperatury zeszklenia: T_g - dla żywic epoksydowych, wg [26]:

1 - żywica ED-20, utwardzana aminami aromatycznymi, 2 - żywica epoksydowo-novolakowa utwardzana żywicami nowolakowymi

Fig. 4. Glass transition temperature value vs. the polymer molecular mass for epoxy resins [26]:

1 - epoxy resin ED-20 cured with aromatic amino resins, 2 - epoxy novolaks resin cured with novolaks resin



Rys. 5. Wpływ ciśnienia (a) i temperatury (b) na objętość właściwą polimerów bezpostaciowych

Fig. 5. Influence of pressure (a) and temperature (b) on the specific volume of amorphous polymers

Przedstawione w postaci wykresów na rys. 3 do 5 informacje dostarczają wystarczająco silnych argumentów przemawiających za koniecznością prowadzenia badań podstawowych mikrostruktury ŻS. Szczególnie ważny dla technologii przetwórstwa TWW jest skutek zastosowanych parametrów technologicznych, uwidocznionych np. w wartości objętości właściwej polimerów i jej wahaniami przy zmianie tych parametrów. Objętość właściwa decyduje o wartościach wymiarów liniowych materiału osnowy w mikrostrukturze TWW, a tym samym o równowadze wewnętrznej oddziaływania dwóch zasadniczych składników: włókien wzmacniających i ŻS.

Zmiany objętości właściwej są zewnętrznym przejawem zmian zachodzących w mikrostrukturze polimeru. Charakter tych zmian określa przynależność polimerów do materiałów lepkosprężystych. Zmiany te muszą mieć charakter relaksacyjny, co wprowadza do analizy zachowania się tych mikrostruktur dodatkowe, znaczące utrudnienia.

W a r u n k i t e c h n o l o g i c z n e u t w a r d z a n i a Ż S

Podstawowymi parametrami technologicznymi przetwórstwa TWW są: temperatura - ciśnienie - czas.

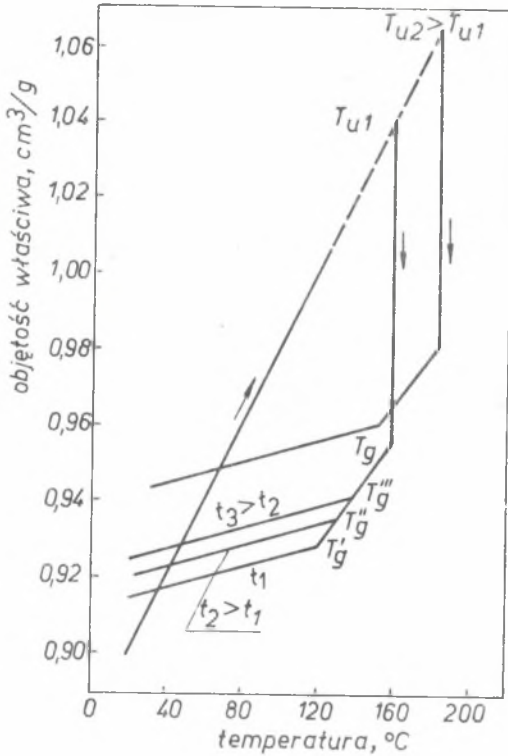
Szczególne znaczenie techniczne ma czas trwania operacji utwardzania, który determinuje wydajność produkcji. Utwardzanie ŻS jest procesem chemicznym o bardzo zróżnicowanych możliwościach realizacyjnych. Informacje na ten temat dostarcza literatura z zakresu chemii polimerów, np. [24, 25, 26]. Wspólnym problemem, łączącym różne gatunki ŻS niezależnie od zastosowanych systemów utwardzania chemicznego, jest uzależnienie wyniku utwardzania od zastosowanych parametrów technologicznych. Problem ten ilustruje rys. 6.

Interpretacja wyników badań przedstawionych na rys. 6 jest zawarta w monografii [26]. Wypływające z niej ważniejsze wnioski są następujące:

- wartość temperatury utwardzania: T_u nie wpływa zasadniczo na wielkość izotermicznego skurczu ŻS (linie pionowe na rys. 6),
- wyższe wartości temperatur utwardzania: T_u i czasów utwardzania: t , prowadzą do uzyskania większych wartości objętości właściwych, tzn. mniejszych gęstości polimeru,
- najwyższą gęstość polimeru (najmniejszą objętość właściwą) można uzyskać stosując temperatury utwardzania: T_u o wartościach wyższych o 20 do 30°C od temperatury zeszklenia: T_g .

Wymienione wnioski wystarczająco uzasadniają znaczenie tzw. "historii" utwardzania, przy ocenie zachowania się mikrostruktury w warunkach użytkowania jako osnowy TWW. Potwierdzają to również wyniki badań zamieszczone w literaturze: [26, 32], których zasadnicze znaczenie ilustrują rys. 7 i 8.

Powtórne nagrzewania utwardzonej mikrostruktury polimeru ujawnia przebieg i charakter przejścia przez obszar przemiany stanu fizycznego w obszarze temperatury zeszklenia: T_g . Zjawiska zachodzące w tym obszarze związane są z przebudową mikrostruktury, która w danych warunkach termodynamicz-



Rys. 6. Wpływ temperatury utwardzania: T_u oraz czasu utwardzania: t , na wartość objętości właściwej po utwardzeniu żywicy epoksydowo-novolakowej, wg [26]

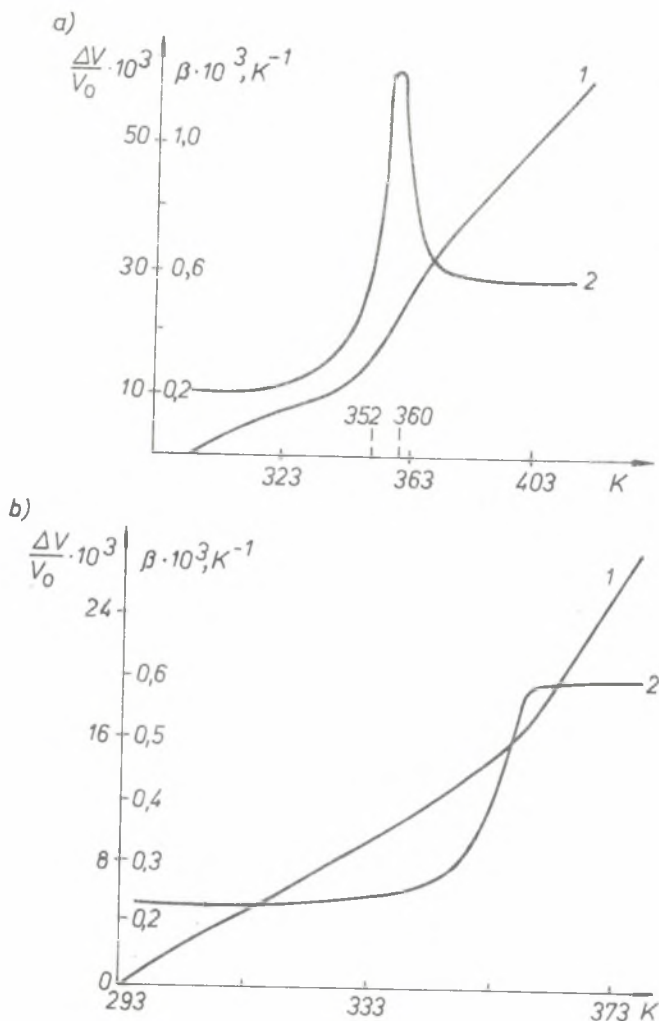
Fig. 6. Specific volume value after curing of epoxy-novolaks resins vs. cure temperature T_u and cure time t [26]

nych zachodzi z określoną prędkością. Prędkość przebudowy mikrostruktury można oszacować na podstawie wskaźników uzależnionych od energii aktywacji i temperatury:

$$P = P_0 \cdot \exp \left(- \frac{U}{K \cdot T} \right), \quad (7)$$

gdzie:

- P, P_0 - prawdopodobieństwo dyfuzji makrocząsteczek,
- U - energia aktywacji makrocząsteczek; J/molekuła,
- T - temperatura; K,
- k - stała Boltzmana; J.molekuła⁻¹.K⁻¹.

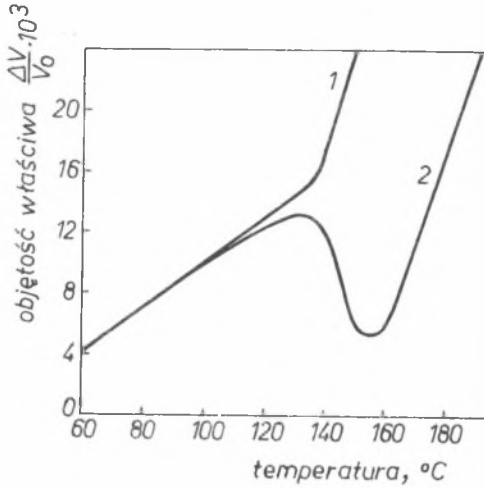


Rys. 7. Zmiana objętości właściwej (1) oraz WORC (2) w zależności od temperatury i szybkości nagrzewania dla polistyrenu, wg [32]:

a) szybkość nagrzewania: $0,5 K \cdot \text{min}^{-1}$, (20 razy większa od szybkości wstępnego chłodzenia), b) szybkość nagrzewania: $0,4 K \cdot \text{min}^{-1}$ (w przybliżeniu równa szybkości wstępnego chłodzenia)

Fig. 7. Variation of specific volume (1) and coefficient of thermal expansion (2) as a function of temperature and heating rate for polystyrene [32]:

a) heating rate: $0,5 K \cdot \text{min}^{-1}$ (20 times greater than precooling rate),
 b) heating rate: $0,4 K \cdot \text{min}^{-1}$ (approximate to precooling rate)



Rys. 8. Krzywe uzyskane z badań dylatometrycznych cienkich powłok z żywic epoksydowych, wg [26]:
 1 - pierwsze nagrzewanie, 2 - drugie nagrzewania. Szybkość nagrzewania: ok. 1 K.min^{-1}

Fig. 8. Dilatometric curves of the epoxy resins thin coats [26]:
 1 - first heating, 2 - second heating. Heating rate: ca 1 K.min^{-1}

Oznaczając szybkość chłodzenia

$$w^- = \frac{dT}{dt}, \quad (8)$$

to wg Bartieniewa i Zieleniewa [32] można ustalić ważny dla praktyki związek pomiędzy szybkością chłodzenia i położeniem obszaru przemiany fazowej określonym wartością temperatury zeszklenia: T_g , w postaci równania:

$$(w^-) \cdot \tau = \frac{k \cdot T_g^2}{U} = C ; K, \quad (9)$$

gdzie:

- τ - czas relaksacji "strukturalnej"; s,
- k - stała Boltzmana; $J \cdot \text{molekuła}^{-1} \cdot K^{-1}$,
- U - energia aktywacji; $\frac{J}{\text{molekuła}}$,
- C - stała charakteryzująca daną strukturę bezpostaciową:
 $C = 20 \text{ K}$ - dla tzw. szkieł nieorganicznych,
 $C = 10 \text{ K}$ - dla tzw. szkieł organicznych.

W literaturze [32] zamieszczono prosty wzór o charakterze empirycznym, wiążący wartość temperatury zeszklenia: T_g z szybkością chłodzenia: W w postaci:

$$T_g^{-1} = C_1 - C_2 \cdot \log W^{-1}; K. \quad (10)$$

gdzie:

C_1, C_2 - stałe doświadczalne charakteryzujące mikrostrukturę polimeru, związane zależnością:

$$C_2 = 0,031 \cdot C_1. \quad (11)$$

Przedstawione powyżej zależności stanowią dobrą podstawę do dokonania wstępnej, przybliżonej oceny skali zjawisk towarzyszących procesom utwardzania i użytkowania ŻS, jako osnowy TWW.

Dotychczasowy przegląd niektórych zjawisk zachodzących w mikrostrukturze ŻS ujawnił w pełni sens i znaczenie temperatury zeszklenia: T_g . Pojęciu temu należy poświęcić jednak więcej uwagi ze względu na jego wieloznaczność wynikającą z silnego uzależnienia od sposobu i warunków badań.

Temperatura zeszklenia: T_g

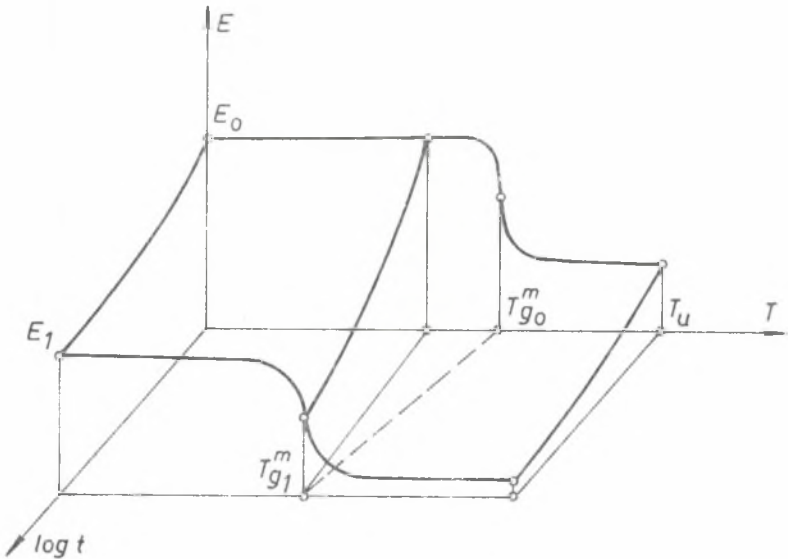
Jest to pojęcie, które zawiera wiele istotnych informacji ważnych dla technologów i użytkowników polimerów, w tym ŻS. Szczególnej wagi nabiera to pojęcie w świetle zmian właściwości mechanicznych. Ilustruje to w sposób uproszczony rys. 9.

Rys. 9 ilustruje w sposób uproszczony charakter zjawisk mechanicznych zachodzących w obszarze temperatur zeszklenia. Dla rozdzielenia zjawisk wyróżniających się zmianami strukturalnymi (WORC), od zjawisk wyróżniających się zmianami właściwości sprężystych (moduły sprężystości), wprowadzono dwa pojęcia:

- temperatura zeszklenia strukturalnego: T_g^s ,
- temperatura zeszklenia mechanicznego: T_g^m .

Temperatura zeszklenia mechanicznego: T_g^m , podobnie jak temperatura zeszklenia strukturalnego: T_g^s , mają charakter relaksacyjny. Ze względu na ważność temperatury zeszklenia mechanicznego: T_g^m dla oceny właściwości i jakości polimeru, warunki jej wyznaczania określają odpowiednie normy. Szczegółowe omówienie różnych metod badania temperatury zeszklenia zawiera literatura [30, 31, 35].

Ilustrację wyniku badania temperatury zeszklenia mechanicznego, zgodnie z normą DIN 53 445, przedstawia rys. 10.



Rys. 9. Wykres zmian modułu sprężystości: E w funkcji temperatury: T i czasu: t , dla typowych żywic syntetycznych:

T_u - temperatura utwardzania, T_g - temperatura zeszklenia

Fig. 9. Plot of elastic moduli changes E vs. temperature T and time t for typical synthetic resins:

T_u - cure temperature, T_g - glass transition temperature

Wykresy zmian modułu sprężystości postaciowej G oraz logarytmicznego dekrementu drgań mechanicznych Δ , wyrażają w sposób wyraźny istotność zmian właściwości mechanicznych w obszarze temperatury zeszklenia.

Relaksacyjny charakter przejścia ze stanu szklistego w stan wysokiej elastyczności w świetle towarzyszącym mu zjawisk mechanicznych wyraża fundamentalna teoria tzw. równoważności temperaturowo-czasowej oraz mniej rozpowszechniona teoria tzw. równoważności naprężeniowo-czasowej [31, 36, 37, 38].

Równanie WLF (Williams-Landl-Ferry), wyrażające istotę analogii temperaturowo-czasowej, ma postać

$$\log (a_T) = \frac{C_1 \cdot (T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}, \quad (12)$$

gdzie:

a_T - wartość przesunięcia czasowego wykresów pełzania (relaksacji), uzależniona od przesunięcia temperaturowego:

$$\Delta T = T - T_0,$$

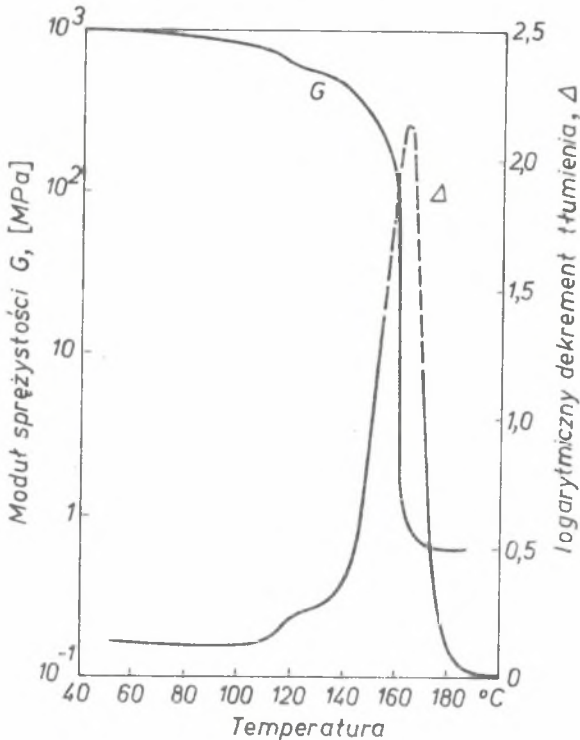
ΔT - przesunięcie temperaturowe:

T - temperatura bieżąca (analizowana),

T_0 - temperatura odniesienia (stała) - przyjmowana często jako temperatura zeszklenia: T_g .

C_1, C_2 - stałe charakterystyczne polimeru: dla typowych polimerów bezpostaciowych:

$C_1 = 8,86; C_2 = 101,6$.

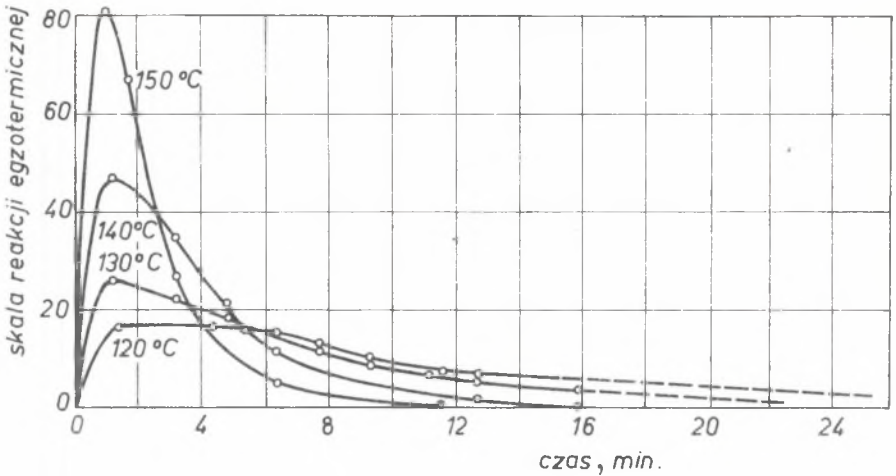


Rys. 10. Moduł sprężystości postaciowej: G i logarytmiczny dekrement tłumienia: Δ , w funkcji temperatury dla żywicy epoksydowej: Araldit F - metoda badania wg DIN 53445

Fig. 10. Plot of the shear modulus G and the logarithmic decrement Δ vs. temperature for the epoxy resin Araldit F [40], according to DIN 53445

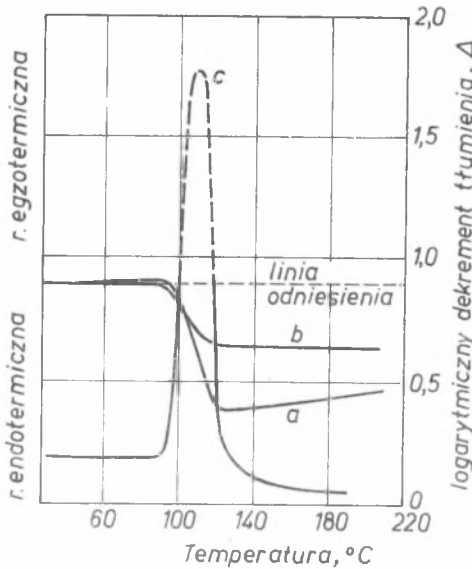
Równanie (12) ma bardzo duże znaczenie w prognozowaniu zjawisk mechanicznych dla dużych przedziałów czasowych [36]. Wg Zenera [39], szybkość zmian relaksacyjnych zachodzących w mikrostrukturze można ocenić z wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia Δ , na podstawie równania:

$$\Delta = -\frac{\pi}{2} \left[\frac{d \ln \delta}{d \ln t} \right]. \quad (13)$$



Rys. 11. Wykresy DSC dla utwardzania izotermicznego żywicy epoksydowej: Araldit F, [40]

Fig. 11. DSC plot for isothermal curing of the epoxy resin Araldit F [40]



Rys. 12. Wykresy DSC dla utwardzania żywicy epoksydowej: Araldit F, wg [40]:
a - czysta żywica, b - ŻWS o zawartości 65% włókna szklanego, c - logarytmiczny dekrement tłumienia - dla porównania. Szybkość nagrzewania: 16 K.min⁻¹

Fig. 12. DSC plots for curing of epoxy resins:

a - pure resin Araldit F, b - GFRA with 65% glass fiber vol. fraction, c - logarithmic decrement Δ . Heating rate: 16 K.min⁻¹

Szybkość relaksacji we wzorze (13) wyraża iloraz:

$$w_R = \frac{d \ln \delta}{d \ln t} . \quad (14)$$

Zjawiska towarzyszące przejściu polimeru przez obszar przemiany stanu fizycznego, które mają szczególne znaczenie, spowodował rozwój nowych, precyzyjnych metod badawczych. Do metod takich należy: DSC (Differential Scanning Calorimeter) [35].

Ilustracje wykresów uzyskiwanych metodą DSC, przedstawiają wykresy na rys. 11 i 12.

Dodatkowe interesujące zależności teoretyczne i wyniki badań eksperymentalnych z zakresu poruszonych w tym rozdziale zagadnień zawiera literatura [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49].

4.2. Włókna wzmacniające (WW)

Włókna wzmacniające wywodzą swoją nazwę od zasadniczej funkcji jaką spełniają w mikrostrukturze TWW - wzmocnienie materiału osnowy (ZS). Pojęcie "włókno" określa twór geometryczny o bardzo małej średnicy w stosunku do długości. Wielkość średnicy włókien wykonywanych z różnych materiałów jest bardzo zróżnicowana, a jej minimalne wartości determinują w dużym stopniu możliwości technologiczne wytwarzania. Wartości te wahają się od $1 \mu\text{m}$ dla włókien typu "whiskers", do $150 \mu\text{m}$ dla włókien borowych i metalowych. Technika przemysłowego wytwarzania WW została wymuszona potrzebami lotnictwa wojskowego i kosmonautyki. Pierwszą i zarazem fundamentalną monografią omawiającą możliwości produkcyjne, właściwości i zastosowanie najbardziej efektywnych WW napisał Polak - C.Z. Karoll Porczyński [1], autor wielu przełomowych wynalazków z zakresu technologii wytwarzania, m.in. włókien wzmacniających.

Najbardziej rozpowszechniony i bardzo efektywny technicznie WW jest aktualnie włókno szklane, które wytwarzane jest na skalę przemysłową już od około czterdziestu lat. Możliwości techniczne, technologiczne i użytkowe WS zawiera podstawowa monografia [4]. Mimo tak długiej historii wytwarzania przemysłowego WS, technologia ich wytwarzania nie jest chętnie udostępniana w postaci licencji, co świadczy o aktualności strategicznego znaczenia tych półwyrobów.

Wprawdzie wytwarzanie, właściwości i zastosowanie poszczególnych rodzajów WW są przedmiotem wielu monografii, ale podobnie jak w przypadku ZS informacje w nich zawarte mają przeważnie charakter reklamowy. Problemy technologiczne i użytkowe związane z zastosowaniem WW w produkcji TWW są omawiane wyrywkowo, przeważnie w postaci wybranych przykładów. W świetle tej sytuacji niezwykle cenne są publikacje zagraniczne, dostępne na naszym ryn-

ku księgarskim [6, 50, 51, 52], które mają charakter poradników technicznych i pozwalają na uzyskanie wielu rzeczowych informacji.

W niniejszym rozdziale podjęto próbę zestawienia informacji o WW, mających podstawowe znaczenie w produkcji wyrobów z TWW oraz decydujący wpływ na występowanie rozważanych w pracy problemów technologicznych i jakościowych. Nie jest to zadanie łatwe ze względu na różnorodność gatunków WW oraz specyfikę ich właściwości. Można jednak ustalić kilka grup charakterystycznych zagadnień, wspólnych dla tych półwyrobów.

A. Włókna wzmacniające można scharakteryzować pod względem geometrycznym, używając wakażnika wyrażającego iloraz powierzchni zewnętrznej włókna F i jego objętości V :

$$P = \frac{F}{V} = \frac{4}{d} ; m^{-1} , \quad (15)$$

gdzie:

d - średnica włókna; m .

Wartości P , dla typowych przedstawicieli WW, wynoszą:

$$P = 3 \cdot 10^4 m^{-1} - \text{dla WB i WM},$$

$$P = 4 \cdot 10^5 m^{-1} - \text{dla WS i WW},$$

$$P = 3 \cdot 10^6 m^{-1} - \text{dla włókien typu "whiskers"}.$$

Zestawione wartości P - określane często jako "powierzchnia właściwa", mają wspólną cechę - są bardzo duże. Tak duże wartości powierzchni właściwej wywierają istotny wpływ na przebieg i charakter zjawisk zachodzących na powierzchni rozdziału składników mikrostruktury: włókien i osnowy. Stwierdzenie to potwierdzają liczne rozważania teoretyczne oraz badania eksperymentalne, których wyniki zamieszcza literatura, np. [13, 16, 51, 53, 54].

B. Włókna wzmacniające posiadają specyficzną mikrostrukturę, która istotnie różni się od mikrostruktury surowca, z którego zostały wykonane. Szczegółowe informacje na ten temat można uzyskać z literatury, np [1, 16, 28, 32].

Na przykład:

- włókna węglowe wykazują szczególnie wyraźną anizotropię właściwości sprężystych: moduł sprężystości w kierunku wzdłużnym jest ok. dziesięciokrotnie większy od modułu sprężystości w kierunku poprzecznym do osi włókna,
- włókna organiczne typu Kevlar, wykazują bardzo duże zróżnicowanie rozszerzalności cieplnej:

WLRC - wynoszą odpowiednio:

$$\alpha_1 = -2 \cdot 10^{-6} ; K^{-1} - \text{wzdłuż osi włókna},$$

$$\alpha_2 = +60 \cdot 10^{-6} ; K^{-1} - \text{prostopadle do osi włókna}.$$

Wpływ mikrostruktury WW na zachowanie się TWW w czasie wytwarzania i eksploatacji jest stosunkowo słabo rozpoznany. Sygnalne informacje z tego zakresu podaje literatura [13, 51]. Znane są natomiast liczne negatywne skutki anizotropii właściwości mechanicznych i cieplnych WW, występujące w praktyce wytwarzania i stosowania TWW, np. zniekształcenia wyrobów, rozwarstwienia struktury. Szczególne problemy występują w strukturach hybrydowych, zbudowanych z dwóch lub więcej różnych gatunków WW, np. szklanych i węglowych.

C. Włókna wzmacniające wykazują w większości cechy materiałów doskonale sprężystych, co w praktyce oznacza liniową charakterystykę wykresów: obciążenie - odkształcenie. Możliwości nagromadzenia energii sprężystej przez WW wielokrotnie przewyższają możliwości typowych materiałów konstrukcyjnych. Dla przykładu, wartości energii sprężystej nagromadzonej w próbie prostego rozciągania wynoszą:

$$L = 22,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Nm}}{\text{m}^3} = 8,85 \cdot 10^3 \frac{\text{Nm}}{\text{kg}} - \text{dla WS,}$$

$$L = (18,75 \text{ do } 31,25) \cdot 10^6 \frac{\text{Nm}}{\text{m}^3} = (10,7 \text{ do } 17,8) \cdot 10^3 \frac{\text{Nm}}{\text{kg}} - \text{dla WW,}$$

$$L = 28,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Nm}}{\text{m}^3} = 19,8 \cdot 10^3 \frac{\text{Nm}}{\text{kg}} - \text{dla włókien Kevlar.}$$

5. KSZTAŁTOWANIE WYROBÓW Z TWW

Dużą i zarazem bardzo charakterystyczną grupę wyrobów wytwarzanych z TWW stanowią wyroby w kształcie powłok o powierzchni nierozwijalnej. Odpowiednikiem tej grupy oraz w wielu przypadkach zamiennikiem są wyroby metalowe, tzw. wytłoczki. Grupę tych wyrobów cechuje duże zróżnicowanie kształtów i wymiarów, spowodowane różnorodnością funkcji, spełnianych w konstrukcji maszyn, urządzeń lub pojazdów. Tak duże zróżnicowanie utrudnia, a nawet w wielu przypadkach uniemożliwia ustalenie jednolitych norm i instrukcji technologicznych.

"Łatwość" technologiczna TWW jest pojęciem prawdziwym tylko dla stosunkowo prostych pod względem kształtu wyrobów wytwarzanych jednostkowo i przy niezbyt wygórowanych wymaganiach technicznych. Przejście od takiej produkcji do produkcji seryjnej złożonych kształtowo i odpowiedzialnych konstrukcyjnie wyrobów, np. stosowanych w przemyśle lotniczym, prowadzi do zdecydowanej zmiany poglądów i uzmysławia szybko olbrzymią skalę problemów technologicznych. Szczególnie ostro ujawniają się trudności technologiczne przetwórstwa TWW w zestawieniu z kształtowaniem wyrobów z tradycyjnych materiałów metalowych: blach i taśm stalowych lub aluminiowych. W tym zestawieniu TWW są materiałami, których technologiczność może być podważona przez nieuzasadnione i nadmierne oczekiwania techniczne.

Przełamaniu tej bariery poświęca się aktualnie najwięcej uwagi ze względu na rosnące szybko zapotrzebowanie na te nowoczesne materiały konstrukcyjne. Efektem jest uruchamianie nowych gatunków TWW w postaci półwyrobów o znacznie uproszczonej technologii kształtowania. Informacje o kierunkach rozwoju nowych "technologicznych" gatunków TWW zamieszcza literatura [6, 29, 54, 56].

Są to jednak materiały drogie i praktycznie stosowane głównie w produkcji wojskowej, a ich przejście do produkcji cywilnej jest jeszcze kwestią wielu lat. Dlatego równoległe niezbędne jest prowadzenie badań tradycyjnych gatunków TWW, mających na uwadze istotną poprawę ich technologiczności oraz jakości wytwarzanych wyrobów. Informacje z tego zakresu zawiera literatura, np. [7, 53, 54].

Podstawą do uzyskania optymalnych i realnych wyników technologicznych jest gruntowne rozpoznanie procesów i zjawisk zachodzących w czasie kształtowania wyrobów z TWW. Problem ten nie należy do łatwych, uzasadnienie tego stwierdzenia wynika między innymi z właściwości składników mikrostruktury, które zostały omówione w rozdziale 4.

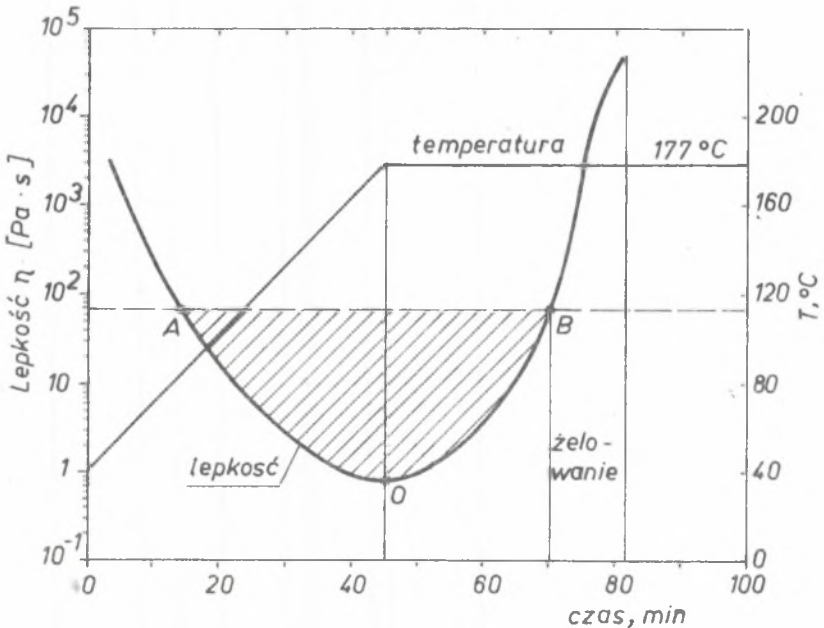
Przedmiotem tej pracy są złożone makrostruktury TWW stosowane w konstrukcjach lotniczych. Rodzaje tych struktur oraz procesy technologiczne wytwarzania przedstawiono w publikacji [9]. Proces technologiczny kształtowania wyrobów z TWW wykorzystuje właściwości fizyczne materiału osnowy (ZS), które stanowią podstawę do określania parametrów technologicznych:

temperatury - ciśnienia - czasu.

Zasadniczy proces kształtowania wyrobu realizowany na wzorniku (formie) składa się z dwóch zasadniczych etapów:

- etap, w którym materiał osnowy uzyskuje właściwości plastyczne, umożliwiające dobre przesycenie i połączenie składników mikro- i makrostruktury (warstw elementarnych) oraz ukształtowanie wyrobu zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi wyrobu,
- etap, w którym materiał osnowy ulega zestaleniu i utworzona zostaje trwała struktura materiału, zapewniająca po obniżeniu temperatury "bezpieczne" zdjęcie wyrobu z formy.

Właściwości fizyczne osnowy w czasie kształtowania wyrobu charakteryzuje w sposób rzetelny przebieg zmian lepkości. Przebieg zmian lepkości osnowy (ZS) w czasie kształtowania wyrobu obrazuje jakościowo i ilościowo rys. 13 [53].



Rys. 13. Przebieg zmian lepkości w czasie utwardzania "na gorąco" typowej żywicy syntetycznej

Fig. 13. Variation of viscosity value during the cure cycle for typical synthetic resins

Właściwości plastyczne osnowy, określające zdolność do właściwego ukształtowania struktury TWW, charakteryzuje wielkość powierzchni oraz szerokość obszaru "upłynnienia" oznaczonego na rys. 13, jako zakreskowane pole: O A B. Położenie tego obszaru na skali lepkości oraz zakres czasu istotnie decydują o wyniku operacji kształtowania wyrobów z TWW. Zbyt niska lepkość minimalna (punkt O) powoduje, że ŻS wycieka ze struktury warstw elementarnych. Lepkość oznaczona położeniem punktów A i B, wyznacza początek i koniec stanu fizycznego osnowy, w którym jest możliwa realizacja właściwej operacji kształtowania struktury TWW. Ustalenie, kontrola i utrzymanie optymalnego zakresu "upłynnienia" są wynikiem dwóch przeciwstawnych kinematycznie zjawisk:

- spadku lepkości wywołanego wzrostem temperatury,
- wzrostu lepkości wywołanego wzrostem stopnia usieciowania mikrostruktury.

Kinematyka tych zjawisk nie jest jeszcze dostatecznie rozpoznana. Próby ujęcia teoretycznego i weryfikacji doświadczalnej procesów zachodzących w obszarze "upłynnienia" ŻS są przedmiotem ciekawych i ważnych praktycznie publikacji, np.: [7, 8, 24, 56].

Zagadnieniem o podstawowym znaczeniu dla technologii jest ustalenie czasu utwardzania wyrobu. Można przyjąć, że utwardzanie wyrobu jest zakończone w momencie uzyskania pewnej granicznej wartości lepkości materiału osnowy - punkt B na rys. 13. Dla technologa punkt B oznacza uzyskanie przez materiał osnowy pewnej minimalnej wartości modułu sprężystości E lub G, charakterystycznej dla stanu wysokiej elastyczności. Przejście do stanu wysokiej elastyczności oznacza również stabilizację wartości modułów sprężystości (np. rys. 9 i 10). Jest to stwierdzenie uproszczone w świetle informacji zawartych w rozdz. 4.1, o relaksacyjnym charakterze zmian zachodzących w mikrostrukturze ŻS, ale mające duże znaczenie praktyczne, ze względu na możliwości kontroli wartości modułu sprężystości, np. metodami ultradźwiękowymi [6, 17].

Zakończenie procesu utwardzania (sieciowania osnowy) oznacza dla technologa rozpoczęcie procesu chłodzenia wyrobu do temperatury gwarantującej "bezpieczne" zdjęcie wyrobu z formy (wzornika). Chłodzenie oznacza przejście materiału osnowy ze stanu wysokiej elastyczności do stanu szklistego.

Przejście to oznacza również uzyskanie przez materiał osnowy pewnej charakterystycznej wartości modułów sprężystości stabilnych ze zmianą temperatury (p. rys. 9 i 10). Złożone zjawiska towarzyszące temu przejściu są szczególnie ważne dla uzyskania właściwej jakości wyrobów z TWW. Niektóre z tych zjawisk omówiono w rozdz. 4.

Zjawiska termomechaniczne towarzyszące chłodzeniu wyrobów z TWW zostaną omówione w rozdz. 6.

O efektywności wytwarzania wyrobów z TWW decyduje wiele czynników - jednym z ważniejszych jest czas, decydujący o kosztach energetycznych i eksploatacyjnych stosowanych urządzeń. Koszty te są bardzo znaczące w przypadku stosowania urządzeń grzewczych o dużych mocach (np. moc grzewcza śred-

niej wielkości autoklawu wynosi kilkaset kW), a więc liczą się nawet minuty. Wyznaczenie precyzyjnych parametrów technologicznych kształtowania wyrobów z TWW stanowi więc podstawowe zagadnienie, decydujące o jakości wyrobów i opłacalności ekonomicznej procesów wytwarzania. O randze tego zagadnienia świadczy specjalna seria wydawnicza ukazująca się w ZSRR i poświęcona wyłącznie tym problemom [17]. Zagadnienie to nabiera szczególnej wagi, bowiem opłacalność ekonomiczna wytwarzania wyrobów z TWW jest jeszcze kwestionowana. Jedno jest pewne, że dopuszczenie wyrobów z TWW do odpowiedzialnych zastosowań konstrukcyjnych jest uwarunkowane opanowaniem skomplikowanych i kosztownych procesów technologicznych.

Do najważniejszych czynników technologicznych, wpływających istotnie na jakość wyrobów z TWW, należą:

- właściwości osnowy i włókien wzmacniających,
- postać i sposób przygotowania półwyrobów (preimpregnatów) warstw elementarnych,
- układ i precyzja wykonania makrostruktury,
- rodzaj oprzyrządowania technologicznego i materiałów pomocniczych,
- system ogrzewania i regulacji temperatury,
- sposób wywierania nacisku (ciśnienia) kształtowania,
- przebieg zmian podstawowych parametrów technologicznych:
temperatura - ciśnienie - czas.

Wymienione czynniki stanowią indywidualnie obszerny zestaw zagadnień, których rozwiązanie wymaga szczegółowych analiz i badań eksperymentalnych.

6. ZJAWISKA TERMOMECHANICZNE TOWARZYSZĄCE ZESTALANIU MIKRO- I MAKROSTRUKTURY TWORZYW WZMOCNIONYCH WŁÓKNAMI

6.1. Uwagi ogólne

Zestalanie mikro- i makrostruktury jest końcowym etapem operacji procesu kształtowania wyrobów TWW o podstawowym znaczeniu dla jakości i wydajności produkcji. Zestalanie jest uproszczonym określeniem złożonych procesów chemicznych i fizycznych zachodzących w strukturze TWW, których wynikiem powinno być otrzymanie właściwej jakościowo struktury materiału i wyrobów. Jest to więc etap, którego zakończenie następuje w momencie zdejmowania wyrobu z formy (wzornika). Trudniej jest określić początek tego etapu, zasadnicze tego przyczyny omówiono w rozdz. 5, tzn. trudności rozdzielenia procesów chemicznych od procesów fizycznych zachodzących jednocześnie w materiale osnowy (p. rys. 9 i 13).

Złożoność i niejednoznaczność analizy zjawisk zachodzących w czasie trwania etapu zestalania struktury, zmusza wielu badaczy do przyjmowania częściowych założeń upraszczających. Mogą mieć one następujące treści:

- proces sieciowania mikrostruktury osnowy przebiega w warunkach izotermicznych ($T = \text{const.}$, p. rys. 23) i zostaje zakończony w momencie rozpoczęcia cyklu chłodzenia wyrobu,
- zakończenie sieciowania mikrostruktury osnowy oznacza osiągnięcie stabilnej wartości modułu sprężystości: E i przejście materiału w stan wysokiej elastyczności,
- cykl chłodzenia wyrobu polega na obniżeniu jego temperatury od wartości równej temperaturze utwardzania: T_u , do temperatury: T_0 - gwarantującej bezpieczne usunięcie wyrobu z formy (wzornika),
- sposób realizacji cyklu chłodzenia charakteryzuje prędkość obniżania temperatury wyrobu: $\dot{V}_T = \frac{dT}{dt} \cdot K \cdot s^{-1}$,
- w czasie chłodzenia wyrobu materiał osnowy przechodzi przez obszar przemiany stanu fizycznego, ze stanu wysokiej elastyczności w stan szklisty -
- obszar ten wyznacza temperatura zeszklenia: T_g ,
- procesy zeszklenia strukturalnego i mechanicznego zachodzą z tą samą prędkością, co umożliwia przyjęcie faktu skokowych zmian: $WOCR$ i modułu sprężystości: E przy przekraczaniu temperatury zeszklenia: T_g , (p. rys. 3 i rys. 9),
- procesy zestalania materiału osnowy przebiegają z tą samą prędkością we wszystkich warstwach elementarnych makrostruktury TWW,

- warstwy elementarne makrostruktury TWW przyjmują stabilne właściwości cieplne i mechaniczne, których wartości określa stan fizyczny materiału osnowy,
- właściwości cieplne i mechaniczne materiału WW, w rozpatrywanych przedziałach temperatur dla stanów fizycznych: szklistego i wysokoelastycznego są stałe, a włókna mają charakterystykę materiałów idealnie sprężystych, niezależną od wartości temperatur.

Tak duża ilość przyjmowanych założeń wydawać się może przesadą. Tak nie jest, ponieważ jest to warunek stwarzający możliwość uzyskania częściowych, przejrzystych rozwiązań analitycznych, niezbędnych dla wyjaśnienia skali i znaczenia praktycznego zachodzących zjawisk.

Przedmiotem rozważań zawartych w tym rozdziale są zjawiska, które określamy jako termomechaniczne, ze względu na silne sprzężenie właściwości cieplnych z właściwościami mechanicznymi i strukturą TWW. Zjawiska zachodzące w strukturze TWW przy zmianie temperatury mają już swoje obszerne i potwierdzone eksperymentalnie podstawy teoretyczne, ściśle związane z mechaniką odkształceń materiałów anizotropowych. Informacje z tego zakresu zawiera obszerna literatura podstawowa, np. [6, 12, 13, 14, 15, 16, 21, 57, 58, 59].

Z tych względów ograniczymy się do omówienia wybranych zagadnień, przyjmując ich podział na dwie zasadnicze grupy:

- zagadnienia dotyczące mikrostruktury warstw elementarnych,
- zagadnienia dotyczące makrostruktury układu warstw elementarnych.

6.2. Naprężenia cieplne w mikrostrukturze warstw elementarnych

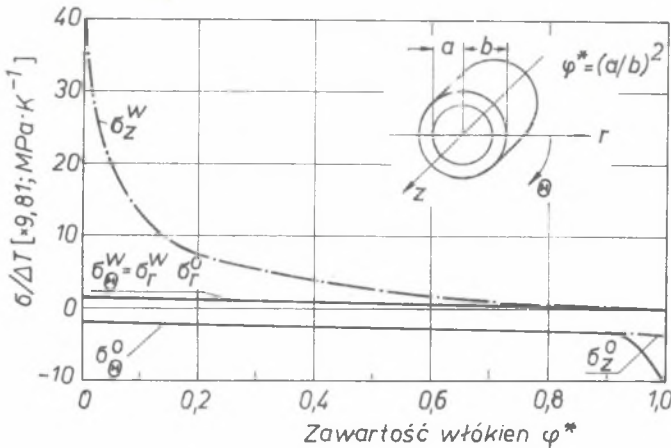
Warstwa elementarna jest określeniem umownym, które może być różnie interpretowane. Dla rozważań teoretycznych przyjmuje się najczęściej, że warstwa elementarna to składnik makrostruktury TWW w postaci powłoki, płyty, w którym włókna wzmacniające są ułożone w tym samym kierunku. Takie założenie znakomicie upraszcza i ułatwia analizę teoretyczną mikrostruktury oraz obliczenia konstrukcyjne makrostruktury. Założenie to jest zgodne z konstrukcją makrostruktur wytwarzanych z półwyrobów o wzmocnieniu jednokierunkowym. Półwyroby takie są aktualnie produkowane w formie preimpregnatów przez czołowe firmy zachodnie, np. [22].

Problem ten komplikuje interpretacja pojęcia warstwy elementarnej w przypadku stosowania półwyrobów, jak dotychczas standardowych, w postaci: mat, tkanin. Przyjęcie wymienionej definicji warstwy elementarnej do tych półwyrobów oznacza, że mata jest makrostrukturą złożoną z odpowiednio dużej ilości warstw elementarnych, gwarantującej izotropowość właściwości, a tkanina jest makrostrukturą złożoną z dwóch warstw elementarnych ułożonych pod kątem 90° i tworzących strukturę ortotropową.

Wymienione wyżej uwagi są niezbędne dla uzasadnienia przedstawianych wyników badań i ich interpretacji oraz przy ocenie ich przydatności praktycznej.

Opracowania teoretyczne, pozwalające na ocenę wartości i zmian naprężeń cieplnych w mikrostrukturze TWW, są przedmiotem dużej ilości publikacji, np. [60, 61].

Wyniki tych opracowań można ocenić na przykładzie tzw. modelu cylindryczno-walcowego, analizowanego wnikliwie w publikacji [60]. Schemat geometryczny tego modelu oraz wyniki analizy teoretycznej przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Wartości naprężeń cieplnych (normowanych) w zależności od zawartości objętościowej WW, dla modelu walcowo-cylindrycznego mikrostruktury ŻWS, wg [60]:

ΔT - zakres zmian temperatury, $\sigma/\Delta T$ - naprężenia normowane - naprężenie odpowiadające zmianie temperatury o jeden stopień: $\text{MPa}\cdot\text{K}^{-1}$

Fig. 14. Values of the thermal stresses (normalized) vs. volume fraction of the reinforcing fibers for the roll-cylinder model of FRP microstructure [60]

Przedstawione w formie wykresalnej wyniki, obliczone ze wzorów teoretycznych, wyrażają tzw. naprężenia normowane, obrazujące zmianę ich wartości przy zmianie temperatury o jeden stopień. Wyznaczone tą metodą wartości naprężeń cieplnych są naprężeniami o wartościach niezależnych od współrzędnych: r, z, θ , wyrażają one pewne wartości średnie dla powierzchni przekroju poprzecznego włókna i osnowy.

Podstawowymi czynnikami ustalającymi wartości tych naprężeń są właściwości sprężyste i cieplne zasadniczych składników mikrostruktury: WW i ŻS. Właściwości te ustalają również wartości WLRC warstwy elementarnej. Przyjęcie tzw. modelu cylindryczno-walcowego mikrostruktury TWW umożliwia usta-

lenie zależności teoretycznych dla wyznaczania WLRC warstwy elementarnej o wzmocnieniu jednokierunkowym.

$$\alpha_1^0 = \alpha_w + \frac{\alpha_m - \alpha_w}{\left[\frac{\varphi \cdot E_w}{(1-\varphi) \cdot E_m} + 1 \right]}, \quad (16)$$

$$\alpha_2^0 = \alpha_m - (\alpha_m - \alpha_w) \cdot A, \quad (17)$$

gdzie:

$$A = \left[\frac{(1 - \frac{x}{2}) \cdot (\nu_m \cdot x - 2)}{Y + X \cdot W - \frac{\nu_w}{E_w}} \cdot \frac{1,1 + \varphi}{E_m \cdot (1 - 1,1 \varphi)} - \nu_m \cdot Z \right],$$

$$W = \frac{\nu_w}{E_w} + \frac{\nu_m}{E_m} \cdot \frac{\varphi^*}{(1 - \varphi^*)},$$

$$X = \frac{2\nu_w + 2\nu_m \cdot \frac{E_w}{E_m} \cdot \frac{\varphi^*}{(1 - \varphi^*)}}{1 + \frac{E_w}{E_m} \cdot \frac{\varphi^*}{(1 - \varphi^*)}},$$

$$Y = \left[-\nu_m + \frac{(\varphi^* + 1)}{(\varphi^* - 1)} \right] \cdot \frac{1}{E_m},$$

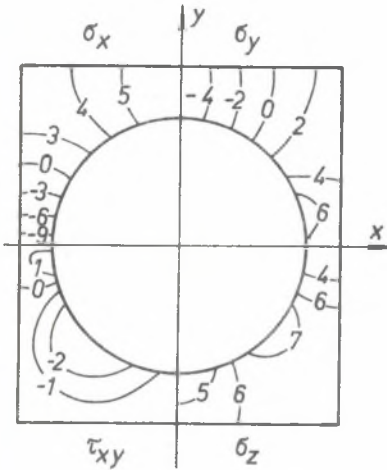
$$Z = \frac{\frac{E_w}{E_m}}{\frac{(1 - \varphi^*)}{\varphi^*} + \frac{E_w}{E_m}},$$

$$\varphi^* = 1,1 \cdot \varphi$$

Indeksy: "w" - włókno; "o" - osnowa (matryca).

Istotne uproszczenie zagadnienia, przyjmowane w ogólnej teorii, uzupełniają wyniki dokładniejszych analiz wykonanych z zastosowaniem MES i przedstawione w pracy [62]. Przykładowe wyniki tych analiz ilustrują rys. 15 i 16.

Wyniki przedstawione na rys. 14, 15, 16, pozwalają na ustalenie skali i charakterystyki zjawisk zachodzących w mikrostrukturze TWW. Nie można tych wyników porównać pod względem ilościowym, ponieważ dotyczą one różnych gałkunków mikrostruktur. Rys. 14 przedstawia wyniki dla mikrostruktury 2WS,



Rys. 15. Wartości naprężeń cieplnych w osnowie struktury jednokierunkowej ŻWB wyznaczone metodą elementów skończonych (MES), bez uwzględnienia cech reologicznych. Materiał osnowy: ŻE. Zmiana temperatury: $\Delta T = 153$ K. Wartości naprężeń w jednostkach angielskich: KSI (1 KSI = 6,89 MPa)

Fig. 15. Values of thermal stresses in polymer matrix of unidirectionally reinforced boron-resin calculated using finite element method (FEM), and disregarding rheological effects. Matrix material: epoxy resin. Temperature variation: $\Delta T = 153$ K. Values of stresses in English units: 1 KSI = 6.89 MPa

$$\sigma_z^W = -74,62 \text{ do } -32,62 \text{ MPa,}$$

$$\sigma_\theta^W = \sigma_r^W = \sigma_r^0 = -18,62 \text{ do } -9,24 \text{ MPa,}$$

$$\sigma_\theta^W = \sigma_\theta^0 = +46,62 \text{ do } +51,32 \text{ MPa,}$$

- wartości maksymalnych naprężeń cieplnych obliczone metodą MES dla ŻWB i przedstawione na rys. 15 i 16, wynoszą:

$$\sigma_x^M = 62,01 \text{ MPa,}$$

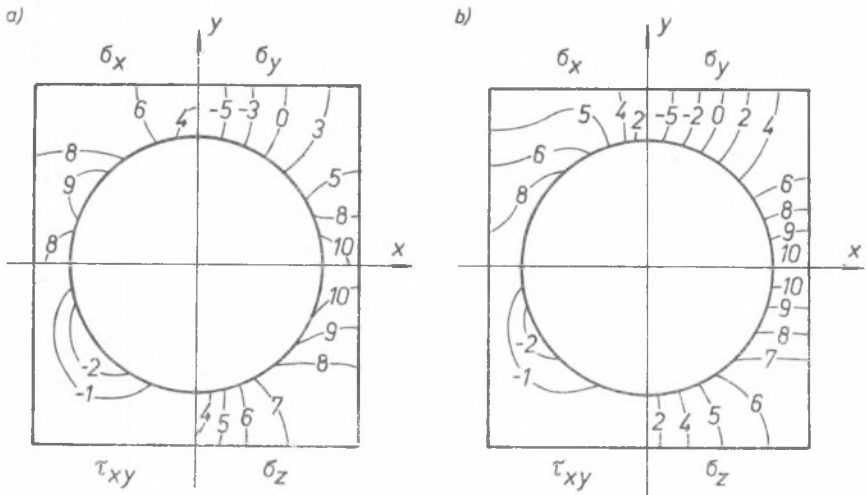
$$\sigma_x^M = 68,9 \text{ MPa,}$$

$$\sigma_z^M = -13,78 \text{ MPa,}$$

a rys. 15 i 16 dla mikrostruktury ŻWB - bez określenia przyjętej zawartości WW: φ .

Uwagi te nie stanowią jednak zasadniczej przeszkody dla ustalenia pewnych ogólnych prawidłowości:

- podstawową przyczyną występowania naprężeń cieplnych w mikrostrukturze TWW są bardzo duże różnice właściwości cieplnych, wyrażone w tym przypadku przez WRLC, które przy zmianie temperatury są przyczyną zróżnicowania wartości odkształceń: włókien i osnowy,
- powstający w wyniku zmian temperatury przestrzenny stan naprężeń, scharakteryzowany na rys. 14, 15, 16 wartościami głównych naprężeń, jest silnie uzależniony od charakterystyki geometrycznej przekroju mikrostruktury, wyrażonej na rys. 14 przez zawartość WW: φ , a także od zróżnicowania właściwości sprężystych składników mikrostruktury, wyrażonych przez moduły sprężystości,
- wartości naprężeń cieplnych, obliczone dla modelu cylindryczno-walcowego (rys. 14) oraz przy przyjęciu typowych wartości zawartości WW: $\varphi = 0,3$ do $0,5$ i zmiany temperatury $\Delta T = 140^\circ\text{C}$, wynoszą odpowiednio:



Rys. 16. Wartości naprężeń cieplnych w osnowie struktury dwukierunkowej (ortogonalnej) ŻWB, wyznaczone metodą elementów skończonych (MES), wg [62].
Materiał osnowy: ŻE. Zmiana temperatury: $\Delta T = 153$ K

a) bez uwzględnienia cech reologicznych osnowy, b) z uwzględnieniem cech reologicznych osnowy - po czasie: $t = 100$ godz. Wartości naprężeń w jednostkach angielskich: KSI. (1 KSI = 6,89 MPa)

Fig. 16. Values of thermal stresses in polymer matrix of orthogonally reinforced boron-resin structure calculated using finite element method (FEM).

a) disregarding rheological effects in polymer matrix, b) taking into account rheological effects in polymer matrix after the time $t = 100$ h. Matrix material: epoxy resin. Temperature variation: $\Delta T = 153$ K. Values of stresses in English units: 1 KSI = 6,89 Pa

- wymienione wartości naprężeń cieplnych świadczą o ważności zjawisk termomechanicznych zachodzących w mikrostrukturze TWW i możliwości ich wpływu na jakość wyrobów, co potwierdzają wyniki badań eksperymentalnych zamieszczone w literaturze, np. [9, 10, 13, 63].
- zasadniczym utrudnieniem rzetelnej oceny wartości naprężeń cieplnych, a tym samym możliwości ustalenia optymalnych parametrów technologicznych jest konieczność uwzględnienia zjawisk reologicznych zachodzących w materiale osnowy, które omówiono w rozdz. 4.1,
- częściową odpowiedź w tym zakresie udzielają wyniki zestawione na rys. 16, sugerujące niewielki wpływ czasu na wartości naprężeń cieplnych -
- niestety bez przedstawienia szczegółowych założeń dotyczących przyjętych właściwości włókien i osnowy i nie znajdujące dostatecznego potwierdzenia w innych pracach badawczych.

Przedstawione powyżej prawidłowości stanowią ważne dla praktyki informację, ich treści powinny być uwzględniane w programach prac badawczych. Oddrębnym, rzadko wspomnianym i analizowanym zagadnieniem jest dokładność przyjmowanych wartości skurczu, który jest skutkiem nie tylko zmian temperatury, lecz również charakterystyki utwardzonej mikrostruktury, wyrażają-

cej się np. stopniem utwardzenia (usieciowania). Duże wartości naprężeń wewnętrznych przy tzw. utwardzaniu na zimno są obserwowane w postaci wyraźnych mikropęknięć lub oderwań materiału osnowy od WW (p. rys. 25, rozdz. 8.2).

Omówione wyżej prawidłowości stanowią tylko sygnałne zaznaczenie problemów dotyczących naprężeń cieplnych w mikrostrukturze TWW, problemów o dużym znaczeniu praktycznym i pozostającym nadal do bardziej ścisłego rozwiązania. Problemy te są punktem wyjścia do rozważań zagadnień naprężeń cieplnych na poziomie makrostruktury TWW, które omówimy w dalszej części rozdziału.

6.3. Naprężenia cieplne w makrostrukturze (układzie konstrukcyjnym warstw elementarnych) TWW

Podstawowe uwagi o pojęciu "makrostruktura" TWW zostały przedstawione we wstępie rozdziału. Szersze informacje o stanie prac nad "normalizacją" tego pojęcia oraz możliwościach normatywnych opisów konstrukcji makrostruktury TWW można uzyskać z literatury, np. [3, 12, 14, 59].

Dla uniknięcia nieporozumień przyjmijmy następującą definicję makrostruktury:

makrostruktura wyrobów z TWW, jest to układ określonej ilości warstw elementarnych o jednoznacznej geometrii i kolejności ułożenia.

Geometrię warstw elementarnych określa się za pomocą kąta wyrażającego skręcenie głównych osi warstwy elementarnej względem głównych osi makrostruktury. Propozycję takiego opisu makrostruktury przedstawia literatura [3]. Na przykład opis:

$(0^{\circ}/45^{\circ})_8$ - oznacza makrostrukturę złożoną z 8 warstw elementarnych, ułożonych symetrycznie względem środka grubości, w kolejności od warstwy zewnętrznej:

- 2 warstwy pod kątem: 0°
- 1 warstwa pod kątem: $+45^{\circ}$
- 1 warstwa pod kątem: -45° .

Zasadniczym celem rozważań, które zostaną przeprowadzone w tym rozdziale, jest ustalenie charakteru i skali zjawisk termomechanicznych, na poziomie makrostruktury TWW. Uwzględniając uwagi omówione w rozdz. 6.2 oraz przyjętą definicję makrostruktury, będziemy traktować warstwę elementarną jako warstwę materiału o ściśle określonej charakterystyce termomechanicznej. Oznacza to pominięcie w prowadzonych rozważaniach wpływu zjawisk termomechanicznych na poziomie mikrostruktury, które omawiano w poprzednim rozdziale. Przyjęte uproszczenia są niestety niezbędne dla przejrzystości omówienia bardzo złożonych zjawisk zachodzących na poziomie makrostruktury.

Charakterystyki termomechaniczne warstw elementarnych

Podstawą rzetelności i wiarygodności rozważań teoretycznych jest ustalenie zasadniczych wskaźników charakteryzujących daną warstwę elementarną. Wskaźniki te powinny być mierzalne w sposób jednoznaczny i porównywalny dla różnych gatunków warstw elementarnych. Uwaga ta jest wynikiem obserwowanych niestety znacznych rozbieżności w określaniu i interpretacji tych wskaźników prezentowanych w różnych publikacjach.

W naszych rozważaniach uwzględnimy koncepcje i ustalenia publikowane i stosowane przez liczące się w tym zakresie ośrodki badawcze oraz czołowych producentów półwyrobów z TWW.

Charakterystykę mechaniczną warstw elementarnych musi poprzedzić istotne założenie o przydziale ich do określonej grupy materiałów. Jest bowiem powszechnie przyjęte, że TWW należą do grupy TS określanej jako materiały lepkosprężyste, wskazując w ten sposób na ich wyraźne właściwości reologiczne [3, 40, 62].

Jednak TWW są w tym zakresie znaczącym wyjątkiem, bowiem WW stanowiące zasadniczy składnik konstrukcyjny tych materiałów są materiałami o znikomym małych cechach lepkosprężystych i zaliczanych zdecydowanie do grupy materiałów liniowo-sprężystych [13, 16, 59]. Uprawnia to do przyjęcia większości konstrukcyjnych gatunków TWW do grupy materiałów liniowo-sprężystych, z zastrzeżeniem ograniczenia do obciążeń krótkotrwałych i temperatur niższych od temperatury zeszklenia materiału osnowy. Zachowanie się TWW w temperaturach wyższych od temperatury zeszklenia materiału osnowy (T_g): T_g stanowi jednak bardzo istotne zagadnienie dla prawidłowości oceny zjawisk termomechanicznych w makrostrukturze TWW - niestety jest ono w większości publikacji pomijane lub nazbyt upraszczane. Znacznie bardziej rzetelnym rozwiązaniem jest przyjęcie charakterystyki liniowo-sprężystej tych materiałów również w zakresie temperatur: $T > T_g$, z zastrzeżeniem uwzględniania znacznego spadku właściwości sprężystych. Spadek ten w przypadku wzmocnień tkaninowych, wg [40], może oznaczać około dziesięciokrotne zmniejszenie wartości modułu sprężystości E w kierunku prostopadłym do powierzchni warstwy elementarnej.

Wymienione dotychczas uwagi świadczą o zakresie i głębi zagadnień związanych z mechaniką odkształceń TWW, dotychczas nie rozwiązanych w sposób jednoznaczny dla praktyki konstrukcyjnej. W świetle tych stwierdzeń można już rozpocząć omawianie wskaźników charakteryzujących warstwy elementarne makrostruktur TWW.

Właściwości sprężyste makrostruktury

Właściwości sprężyste cienkich warstw elementarnych charakteryzuje się następującymi wskaźnikami:

$E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$ - odpowiednio nazywane: modułami sprężystości wzdłużnej i postaciowej oraz liczbą Poissona,

1 - oznacza kierunek osnowy,
2 - oznacza kierunek wątków.

Przyjęte wskaźniki pozwalają na ustalenie składowych macierzy sprężystości i podatności:

$$[\bar{C}] = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{66} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

z następujących zależności podstawowych:

$$E_1 = \frac{|\bar{C}|}{\bar{C}_{22} \cdot \bar{C}_{66} - \bar{C}_{26}^2}, \quad (19)$$

$$E_2 = \frac{|\bar{C}|}{\bar{C}_{11} \cdot \bar{C}_{66} - \bar{C}_{26}^2}, \quad (20)$$

$$G_{12} = \frac{|\bar{C}|}{\bar{C}_{11} \cdot \bar{C}_{22} - \bar{C}_{12}^2}, \quad (21)$$

$$\nu_{12} = \frac{\bar{C}_{12} \cdot \bar{C}_{66} - \bar{C}_{16} \cdot \bar{C}_{26}}{\bar{C}_{22} \cdot \bar{C}_{66} - \bar{C}_{26}^2}, \quad (22)$$

$$|\bar{C}| = \det [\bar{C}] \quad (23)$$

Macierz sprężystości wyrażona wzorem (18) ulega uproszczeniu w układzie współrzędnych zgodnych z głównymi kierunkami anizotropii: 1^0 i 2^0 i ma postać:

$$[\bar{C}]^0 = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11}^0 & \bar{C}_{12}^0 & 0 \\ \bar{C}_{12}^0 & \bar{C}_{22}^0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{C}_{66}^0 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Zależności (19 do 22) przyjmują w tym układzie bardziej prostą postać:

$$E_1 = \bar{C}_{11}^0 - \frac{(\bar{C}_{12}^0)^2}{\bar{C}_{22}^0}, \quad (25)$$

$$E_2 = \bar{C}_{22}^0 - \frac{(\bar{C}_{12}^0)^2}{\bar{C}_{11}^0}, \quad (26)$$

$$G_{12} = \bar{C}_{66}^0, \quad (27)$$

$$\nu_{12} = \frac{\bar{C}_{12}^0}{\bar{C}_{22}^0} = \nu_{21} \cdot \frac{\bar{C}_{11}^0}{\bar{C}_{22}^0}, \quad (28)$$

lub:

$$\bar{C}_{11}^c = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}, \quad (29)$$

$$\bar{C}_{22}^0 = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}, \quad (30)$$

$$\bar{C}_{12}^0 = \frac{E_2 \cdot \nu_{12}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}, \quad (31)$$

$$\bar{C}_{66}^0 = G_{12} \quad (32)$$

Zależności (19 do 23) oraz (25 do 32) stanowią podstawę do tworzenia macierzy sprężystości warstw elementarnych. Znacznik w postaci kreski nad literą oznaczającą składowe macierzy C , oznacza tzw. składowe zredukowane [15].

Wartości składowych macierzy sprężystości \bar{C} ulegają zmianom w zależności od położenia układu współrzędnych w płaszczyźnie warstwy elementarnej. Sposób przekształcenia wyznacza tensorowy charakter naprężeń i odkształceń, narzucający zasady przekształcania ich wartości przy obrocie układu współrzędnych [12, 23, 57, 64, 65].

Ze względu na złożoność postaci związków matematycznych, wyrażających reguły przekształceń wartości składowych macierzy sprężystości przy obrocie układu współrzędnych, używane są różne zapisy uproszczone [57]:

$$\bar{C}_{11} = V_1 + V_2 \cdot \cos 2\varphi + V_3 \cdot \cos 4\varphi, \quad (33)$$

$$\bar{C}_{12} = V_1 - 2V_2 \cdot \cos 2\varphi - V_3 \cdot \cos 4\varphi, \quad (34)$$

$$\bar{C}_{16} = \frac{1}{2} \cdot V_2 \cdot \sin 2\varphi + V_3 \cdot \sin 4\varphi, \quad (35)$$

$$\bar{C}_{22} = v_1 - v_2 \cdot \cos 2\varphi + v_3 \cdot \cos 4\varphi, \quad (36)$$

$$\bar{C}_{26} = \frac{1}{2} \cdot v_2 \cdot \operatorname{cisin} 2\varphi - v_3 \cdot \sin 4\varphi, \quad (37)$$

$$\bar{C}_{66} = v_4 - v_3 \cdot \cos 4\varphi, \quad (38)$$

gdzie:

$$v_1 = \frac{1}{8} \cdot (3\bar{C}_{11}^0 + 2\bar{C}_{12}^0 + 3\bar{C}_{22}^0 + 4\bar{C}_{66}^0),$$

$$v_2 = \frac{1}{2} \cdot (\bar{C}_{11}^0 - \bar{C}_{22}^0),$$

$$v_3 = \frac{1}{8} \cdot (\bar{C}_{11}^0 - 2\bar{C}_{12}^0 + \bar{C}_{22}^0 - 4\bar{C}_{66}^0),$$

$$v_4 = \frac{1}{8} \cdot (\bar{C}_{11}^0 - 2\bar{C}_{12}^0 + \bar{C}_{22}^0 + 4\bar{C}_{66}^0).$$

Podobne pod względem matematycznym związki można napisać dla składowych macierzy podatności [5].

Wzory (33) do (38) mają bardzo istotne znaczenie praktyczne i stanowią przedmiot ciekawych rozważań teoretycznych i weryfikacji doświadczalnych.

Właściwości cieplne

Dla przyjętego zakresu pracy istotnym wskaźnikiem właściwości cieplnych warstw elementarnych jest WLRC. Rozszerzalność cieplna materiału wyrażona przez WLRC, jest jednostkowym przyrostem odkształcenia przy zmianie temperatury. Ponieważ odkształcenie jest wielkością tensorową, to WLRC powinien mieć charakter tensorowy. Przekształcenie składowych WLRC można wyrazić wzorami:

$$\{\alpha\}^{\beta} = [T]_{\xi} \cdot \{\alpha\}^{\alpha} \quad (39)$$

lub:

$$\begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix}^{\beta} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & s \cdot c \\ s^2 & c^2 & -s \cdot c \\ -2s \cdot c & 2s \cdot c & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \alpha_1^0 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix}, \quad (40)$$

gdzie:

- $s = \sin \beta$; $c = \cos \beta$;
 β - kąt obrotu układu współrzędnych z położenia 1^0-2^0 do 1^β do 2^β ,
 $\alpha_1^0 \alpha_2^0$ - WLRC dla kierunków głównych osi anizotropii (1^0 - osnowa ; 2^0 - wątek) ,
 $\alpha_1^\beta , \alpha_2^\beta \cdot \alpha_{12}^\beta$ - WLRC w układzie współrzędnych: $1^\beta - 2^\beta$.

Charakterystyki termomechaniczne makrostruktury

Ogólna zależność opisująca liniowo-sprężystą charakterystykę makrostruktury, z uwzględnieniem obciążeń mechanicznych i cieplnych, ma postać

$$\begin{Bmatrix} N^* \\ M^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \xi \end{Bmatrix}, \quad (41)$$

gdzie:

$\{N^*\}$, $\{M^*\}$ - wektory siły N^* i momentu M^* , pochodzące od obciążeń mechanicznych i cieplnych:

$\{N^*\}$, $\{M^*\}$ - $N^* = N^m + N^T$; $M^* = M^m + M^T$

Przy braku obciążeń zewnętrznych: $N^m, M^m = 0$

$$N^* = N^T ; M^* = M^T,$$

$\{\epsilon^0\}$, $\{\xi\}$ - wektory odkształcenia i krzywizny makrostruktury,

$\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}$ - macierz blokowa charakteryzująca sztywność makrostruktury.

Wzory pozwalające na obliczenie wartości składowych macierzy charakteryzującej sztywność makrostruktury mają postać:

$$(A_{1j}, B_{1j}, D_{1j}) = \int_{-H/2}^{+H/2} \bar{c}_{1j} \cdot (1, x_3, x_3^2) \cdot dx, \quad (42)$$

$$A_{1j} = \sum_{k=1}^n \bar{c}_{1j}^{(k)} [h_{k+1} - h_k], \quad (42a)$$

$$B_{1j} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \bar{c}_{1j}^{(k)} [h_{k+1}^2 - h_k^2], \quad (42b)$$

$$D_{1j} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \bar{c}_{1j}^{(k)} [h_{k+1}^3 - h_k^3], \quad (42c)$$

gdzie:

- X_3 - współrzędna prostopadła do powierzchni warstwy elementarnej,
 h_{k+1} , h_k - wartości współrzędnych X_3 dla warstw elementarnych:
 "k+1" i "k".

Dla uzyskania zależności pozwalającej ocenić wartości naprężeń cieplnych w makrostrukturze TWW należy we wzorze (41) przyjąć wartości: N^m i M^m równe zero. Wtedy uzyskamy następującą zależność

$$\{N_i^T, M_i^T\} = \sum_{k=1}^n \bar{C}_{ij}^{(k)} \cdot \alpha_j^{(k)} \cdot \Delta T \cdot [h_k - h_{k-1}; \frac{1}{2} (h_k^2 - h_{k-1}^2)] \quad (43)$$

X_3 - współrzędna określająca położenie warstwy elementarnej "k" względem głównych osi makrostruktury,

ΔT - zmiana temperatury wywołująca powstawanie sił i momentów wewnętrznych: N^T, M^T .

Z zależności (43) można wyprowadzić wzór na określenie wartości naprężeń cieplnych w poszczególnych warstwach elementarnych makrostruktury TWW:

$$\begin{aligned} \{\sigma^T\}^{(k)} &= [\bar{C}^\beta]^{(k)} \cdot \{[S]_1 \cdot \{N^T\} + [S]_2 \cdot \{M^T\} + \\ &+ X_3 \cdot \{[S]_2 \cdot \{N^T\} + [S]_3 \cdot \{M^T\}\} - \{\alpha\}^{(k)} \cdot \Delta T\}, \end{aligned} \quad (44)$$

$\begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_2 & S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1}$ - macierze blokowe odpowiednio: podatności i sprężystości makrostruktury TWW,

$[\bar{C}^\beta]$ - macierz zredukowanych stałych sprężystości: dla warstwy elementarnej "k" - ułożonej pod kątem w odniesieniu do głównych osi makrostruktury,

$\{\alpha\}^{(k)}$ - tensor WLRC - warstwy elementarnej "k" - ułożonej pod kątem β do głównych osi makrostruktury.

Wzór (44) ulega znacznemu uproszczeniu dla tzw. makrostruktur symetrycznych, dla których można przyjąć:

$$\{M^T\} = 0,$$

$$[S_3] = 0,$$

$$[B] = 0.$$

Wzór (44) będzie miał wtedy postać:

$$\{\delta^T\}^{(k)} = [\bar{c}]^{(k)} \cdot [S_1] \cdot \{N^T\} - \{\alpha^{(k)}\} \cdot \Delta T, \quad (45)$$

$$\begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}_T^{(k)} = [\bar{c}]^{(k)} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_{12} \end{Bmatrix} \cdot \Delta T, \quad (46)$$

gdzie

$$\{N_1^T\} = \sum_{k=1}^n \bar{c}_{1j}^{(k)} \cdot \alpha_j^{(k)} \cdot \Delta T \cdot [h_k - h_{k-1}]$$

$\{N_1^T\}$ - wektor sił termicznych na jednostkę szerokości makrostruktury;
N/m.

Wzór (46) zawiera w nawiasach kwadratowych różnicę odkształceń:

- makrostruktury: $\{\varepsilon\}^C$,
- warstwy elementarnej: $\{\alpha\}^{(k)} \cdot \Delta T$.

Wprowadzając oznaczenie:

$$\frac{\{\varepsilon^0\}^C}{\Delta T} = \{\alpha\}^C,$$

wówczas można napisać

$$\{\delta^T\}^{(k)} = [\bar{c}]^{(k)} \cdot [\{\alpha\}^C - \{\alpha\}^{(k)}]. \quad (47)$$

O wartości naprężeń cieplnych decyduje więc zasadniczo zróżnicowanie WLRC i właściwości sprężyste warstw elementarnych

$[\bar{c}]^{(k)}$ oraz różnica temperatur: ΔT .

6.4. Uwagi końcowe

Przedmiotem rozważań zawartych w rozdziale 6 były zjawiska termomechaniczne towarzyszące zestalaniu mikro- i makrostruktury TWW. Zawarte w tym rozdziale podstawy teoretyczne oraz informacje praktyczne świadczą o złożoności i obszerności poruszonych zagadnień. Wnioski wypływające z ich analizy stanowią zbiór podstawowych zaleceń przy projektowaniu makrostruktury TWW. Wnioski te dostarczają również informacji o przyczynach występowania określonych zjawisk przy wytwarzaniu i użytkowaniu makrostruktur TWW.

Postaramy się wyszczególnić kilka typowych błędów technologicznych i konstrukcyjnych, mogących istotnie zakłócić zamierzenia i możliwości wynikające z przedstawionych zależności teoretycznych:

- niesymetryczny układ warstw elementarnych, np. zróżnicowanie grubości lub właściwości sprężystych poszczególnych warstw,
- niesymetryczny rozkład właściwości sprężystych warstw elementarnych, np. zróżnicowanie zawartości WW, skrócenie lub zniekształcenie układu włókien,
- zróżnicowanie szybkości zestalania (utwardzania) materiału osnowy lub szybkości chłodzenia na grubości i powierzchni wyrobu,
- braki w "technologiczności" konstrukcji wyrobu, np. zróżnicowanie grubości makrostruktury, niewłaściwe krzywizny, skrępowanie skurczu itp.

Powyższe informacje mogą stanowić źródła wstępnych ocen obserwowanych zjawisk produkcyjnych. Nie oznacza to jednak, że mają to być oceny jednoznaczne. Złożoność procesu technologicznego wprowadza często wzajemną zależność przyczynowo-skutkową, wymuszającą całościowe traktowanie poruszanych zagadnień, zarówno na poziomach: makrostruktury i mikrostruktury, jak również na poziomie konstrukcji wyrobu.

7. TEZY PRACY

W rozdziałach 4 do 6 przedstawiono najbardziej istotne informacje i dane o właściwościach składników mikrostruktury oraz zjawiskach towarzyszących procesom technologicznym kształtowania i zestalania złożonych makrostruktur TWW. Przedstawione informacje i dane są wynikiem analizy literatury, własnych doświadczeń autora z badań laboratoryjnych i prób technologicznych wytwarzania TWW [66, 67, 68, 69] oraz współpracy z przemysłem [9, 10, 70, 71, 72].

Na tej podstawie ustalono tezy pracy, których weryfikacja analityczna i doświadczalna powinna dostarczyć rzeczowych informacji do wykorzystania przez konstruktorów wyrobów oraz technologów, jak również pracowników laboratoriów badawczych i kontroli technicznej.

Tezy pracy można przedstawić w następującej postaci:

- A. Proces technologiczny wytwarzania wyrobów z TWW wprowadza znaczną ilość nowych, nie ujętych w instrukcjach technologicznych czynników istotnie wpływających na jakość i właściwości założonej w projekcie konstrukcyjnym makrostruktury wyrobu.
- B. Do podstawowych warunków otrzymania właściwej jakości wyrobów należą "technologiczność" ich konstrukcji, stworzonej na etapie obliczania i projektowania makrostruktury.
- C. Procesom zestalania makrostruktury "na gorąco" towarzyszy występowanie naprężeń własnych i odkształceń cieplnych w warstwach elementarnych oraz makrostrukturze. W przypadkach granicznych ich występowanie może prowadzić do zniekształcenia lub nawet zniszczenia makrostruktury wyrobów.

Przedstawione tezy pracy mogą stwarzać wrażenie oczywistych, nie wymagających specjalnego potwierdzenia. Byłoby to może słuszne dla wyrobów, np. metalowych, których poziom wytwarzania jest już bardzo wysoki. Techniki wytwarzania wyrobów z TWW w naszym kraju są dopiero w stadium intensywnego rozwoju. Brak odpowiednich przepisów i zaleceń powoduje w wielu przypadkach bezkrytyczną adaptację wzorów z produkcji wyrobów metalowych. Jest to nie tylko poważny błąd, lecz również bardzo szkodliwe ekonomicznie zjawisko.

Z tych względów przyjęto tezy, których potwierdzenie pozwoli na rzeczowe wyjaśnienie niektórych problemów występujących w czasie uruchamiania aktualnej produkcji oraz przygotowanie odpowiednich zmian konstrukcyjnych i technologicznych, eliminujących te problemy w przyszłości.

8. PROBLEMY JAKOŚCI WYROBÓW Z TWORZYW WZMOCNIONYCH WŁÓKNAMI

8.1. Uwagi ogólne

Jakość wyrobów z TWW jest pojęciem bardziej złożonym od tego, które kojarzy się z produkcją wytłoczek z blach i taśm metalowych, tradycyjnych elementów konstrukcyjnych płatowców. Uzasadnia to i usprawiedliwia opory występujące przy dopuszczaniu TWW do odpowiedzialnych zastosowań konstrukcyjnych. Podstawową przyczyną braku zaufania jest niewątpliwie brak sprawdzonych i akceptowanych formalnie norm i przepisów krajowych. Dotychczasowe rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne są wzorowane na normach i przepisach światowych.

Obszerny zestaw norm i przepisów z zakresu TWW zawiera system amerykański ASTM (American Society for Testing and Materials) np. [73, 74, 75, 76, 77, 78].

Dużą liczbę norm i przepisów zawiera również system radziecki GOST, niestety nie zawsze zgodnych z systemem ASTM. Cenną pomocą jest w tym zakresie pozycja wydawnicza [18], zawierająca rzetelne, obszerne zestawienie i porównanie różnych systemów norm dotyczących TWW.

Niestety stan krajowych norm jest w tym względzie bardzo skromny. Dotyczy to zresztą nie tylko TWW, lecz całej grupy tworzyw sztucznych. Nieliczne normy przedmiotowe [79, 80, 81] traktują tworzywa sztuczne całościowo, nie uwzględniając podstawnych różnic dzielących TWW od innych gatunków - różnic, których skutkiem może być negatywna lub pochopnie zbyt optymistyczna ocena właściwości konstrukcyjnych TWW. Zasadniczym powodem jest konieczność uwzględniania znacznie większej ilości czynników wynikających głównie z anizotropii właściwości TWW. To bardzo obszerne zagadnienie omówiono w publikacji [10].

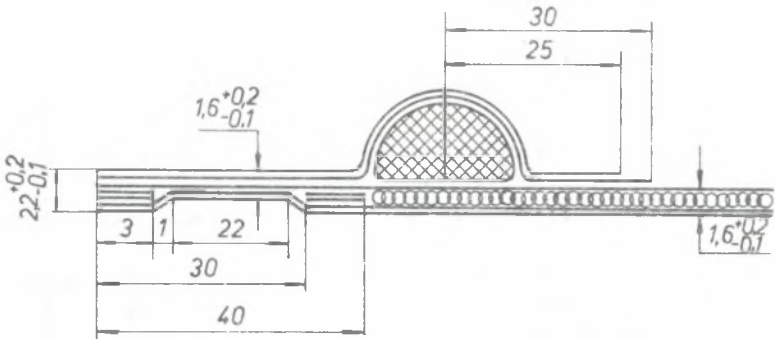
Wymienione na wstępie uwagi są konieczne, ponieważ tłumaczą przyjęty program prac oraz możliwości jego realizacji w warunkach krajowych.

Jakość wyrobów z TWW należy rozpatrywać jako kompleks właściwości, których kształtowanie zachodzi na trzech zasadniczych poziomach:

- poziom surowców i składników użytych do wytwarzania mikrostruktury warstw elementarnych,
- poziom konstrukcji wyrobu oraz makrostruktury (układu) warstw elementarnych,
- poziom technologii wytwarzania: kształtowania i zestalania makrostruktury oraz kontroli jakości wyrobów.

Na każdym z wymienionych poziomów mogą być popełnione istotne błędy decydujące o jakości wyrobu. Rozwiązania techniczne eliminujące lub zmniejszające to ryzyko są niezwykle cenione i intensywnie poszukiwane. Na świecie prowadzone są intensywne prace badawcze i rozwojowe, których celem jest uproszczenie technologii wytwarzania i eliminacja możliwości popełnienia błędów. Przykładem może być intensywny rozwój produkcji półwyrobów: taśm, płyt, rur, kształtowników zdolnych do kształtowania i gwarantujących ściśle określone właściwości. Wytwórca wyrobów przestaje więc być odpowiedzialny za poziom przygotowania składników mikrostruktury, co znacznie ułatwia i upraszcza jego działalność.

Szczególną i wprowadzającą nowe problemy jest sprawa opisu konstrukcyjnego wyrobów z TWW. Przykład typowego rysunku konstrukcyjnego wyrobu lotniczego z ŻWS (fragment) pokazuje rys. 17.



Rys. 17. Przykład rysunku konstrukcyjnego (fragment) typowego wyrobu lotniczego z TWW

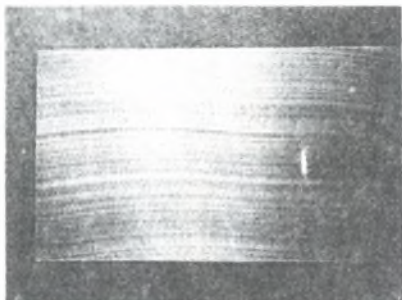
Fig. 17. Example of the engineering drawing (fragment) of typical aircraft products manufactured from FRP

Rys. 17 uwidacznia istotę różnic dzielących ten rysunek od typowych rysunków maszynowych dla wyrobów z materiałów metalowych. Jednym z podstawowych problemów wynikających z przyjętej konstrukcji wyrobu jest uzyskanie właściwej jakościowo makrostruktury kształtowanej i zestawianej w procesie technologicznym. Problem, który musi rozwiązać technolog, a jego sukces zależy w bardzo dużym stopniu od znajomości przez konstruktora realnych możliwości procesów technologicznych - czyli "technologiczności" konstrukcji. Pojęcie technologiczności konstrukcji jest w tym przypadku niezwykle ważne dla uzyskania właściwej jakości wyrobów.

8.2. Typowe wady technologiczne wyrobów z TWW

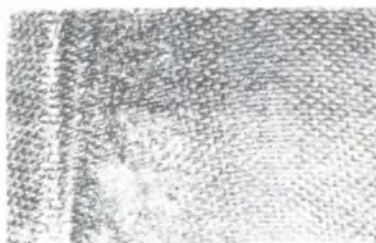
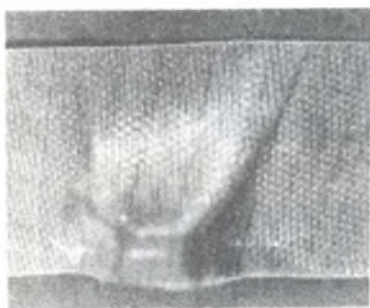
Problem ustalania i klasyfikacji typowych wad technologicznych jest problemem o podstawowym znaczeniu dla kontroli jakości wyrobów. W przypadku wyrobów z TWW jest to problem bardzo słabo rozpoznany, a ilość informacji li-

teraturowych na ten temat bardzo mała, np. [8, 9, 79]. Z tych zasadniczych powodów podjęto próbę ustalenia i udokumentowania fotograficznego niektórych powtarzalnych i typowych wad technologicznych wyrobów z TWW. Nie jest to oczywiście rozwiązanie zagadnienia, lecz próba zwrócenia uwagi na realne możliwości identyfikacji wad, możliwość ich klasyfikacji oraz oceny ich wpływu na jakość wyrobów. Niektóre z wad technologicznych pozwalają na stosunkowo łatwą identyfikację błędów technologicznych, umożliwiając ich bieżącą korektę.



Rys. 18. Zniekształcenie przebiegu WW w warstwach zewnętrznych makrostruktury ŻWO

Fig. 18. Distortion of the fibers orientation on the outer plies of the macrostructure manufactured from organic (aramid) laminates



Rys. 19. Fałdy i zakładki na powierzchniach zewnętrznych makrostruktur ŻWS

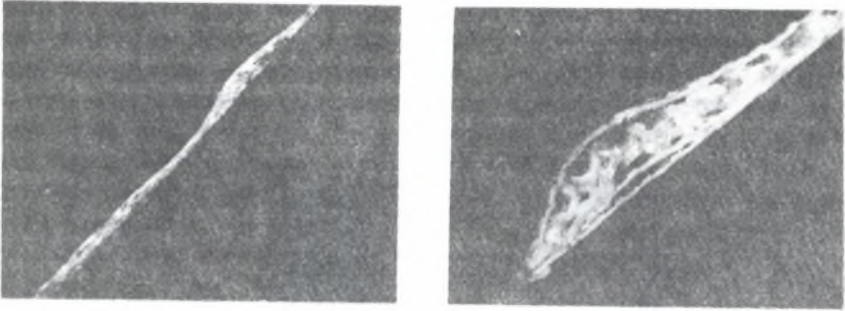
Fig. 19. Folds and overlaps on outer surfaces of the GFRP macrostructure

Obserwowane wady technologiczne można podzielić na dwie grupy, przy zastosowaniu kryterium ich wielkości, a tym samym widzialności:

A. Wady widoczne okiem nieuzbrojonym lub przy niewielkim powiększeniu optycznym. Należą do nich:

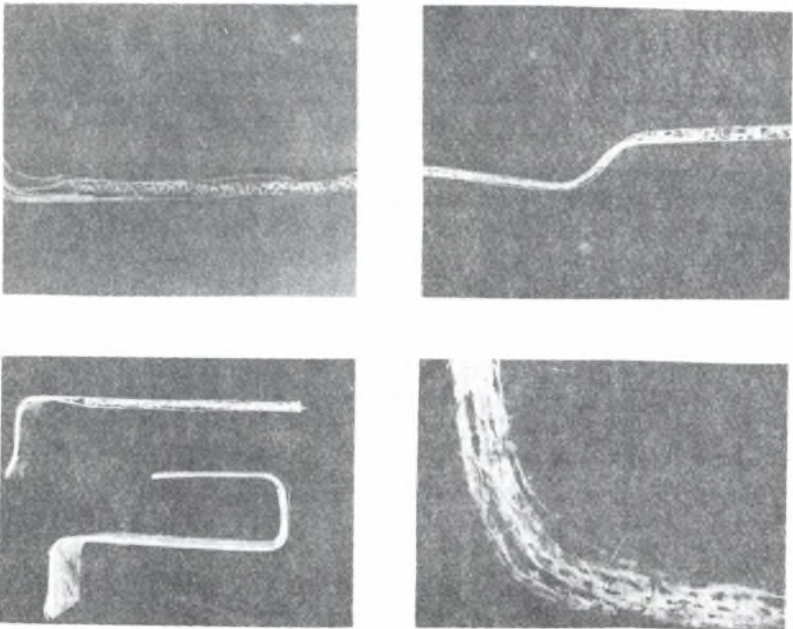
- zniekształcenie przebiegu włókien wzmacniających,
- fałdy i zakładki warstw zewnętrznych tkanin,
- miejscowe pocienienie lub zgrubienie przekroju makrostruktury wyrobów o tym samym układzie warstw elementarnych,

- rozwarstwienia makrostruktury oraz pęcherze wewnętrzne,
- narosty żywicy na zewnętrznych warstwach elementarnych,
- zniekształcenie zarysu geometrycznego przekrojów wyrobów.



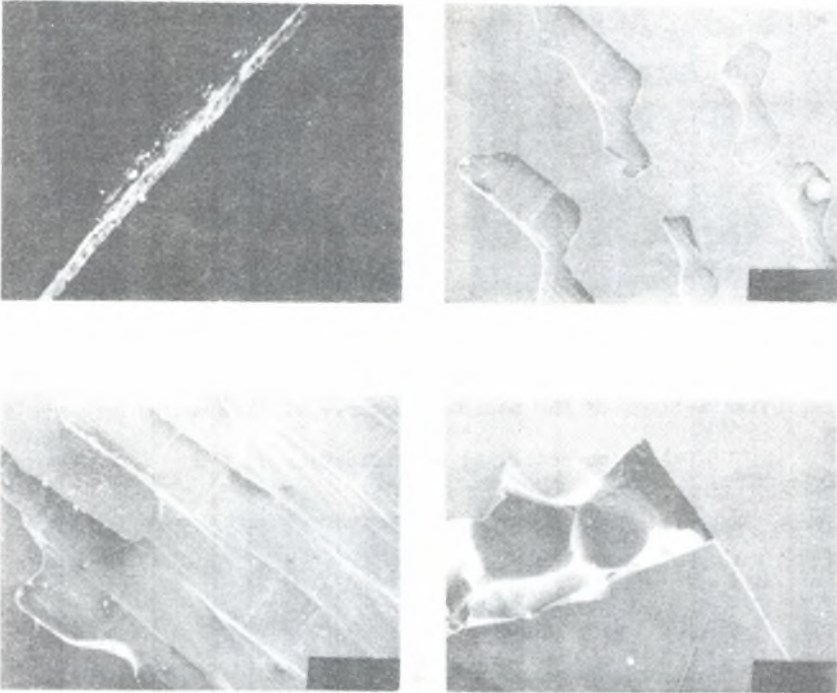
Rys. 20. Miejscowe pocienienia lub pogrubienia makrostruktur ŻWS:
2T15/Ł0-0,5/1T15 - osnowa: 5-211BN

Fig. 20. Local contractions and thickenings on the cross-section of the GRP
macrostructures: 2T15/Ł0-0,5/1T15. Matrix material: 5-211BN



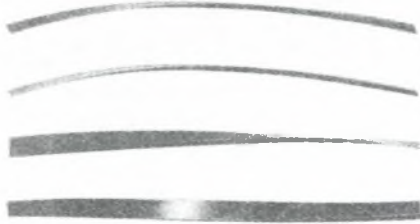
Rys. 21. Rozwarstwienia przekrojów makrostruktur ŻWS

Fig. 21. Delaminations in a cross-section of the GFRP macrostructures

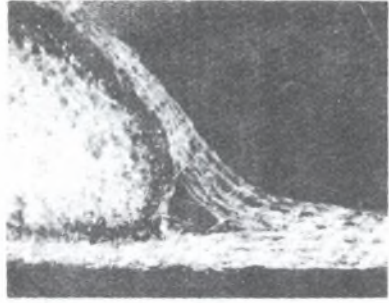
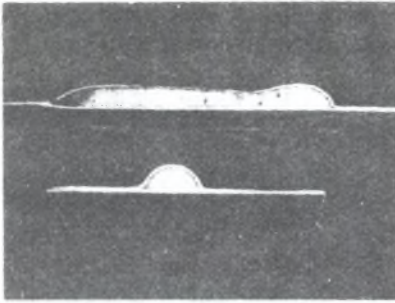


Rys. 22. Pęcherze żywicy na powierzchniach zewnętrznych makrostruktur ŻWS:
a) przekrój poprzeczny, b) widok z góry

Fig. 22. Resin bears on outer surfaces of GFRP macrostructures:
a) cross-section view, b) top view



Rys. 23. Zniekształcenie zarysu geometrycznego makrostruktur
Fig. 23. Distortion of the geometric profile of FRP macrostructures

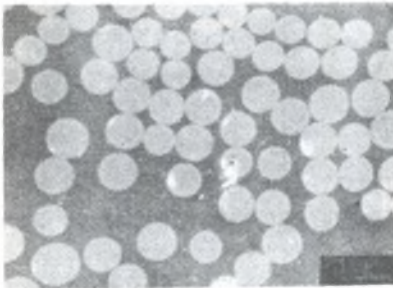


Rys. 24. Rozwarstwienia makrostruktur TWW, zauważalne przy powiększeniu mikroskopowym:

a) skala makro-, b) powiększenie: 12,5 x

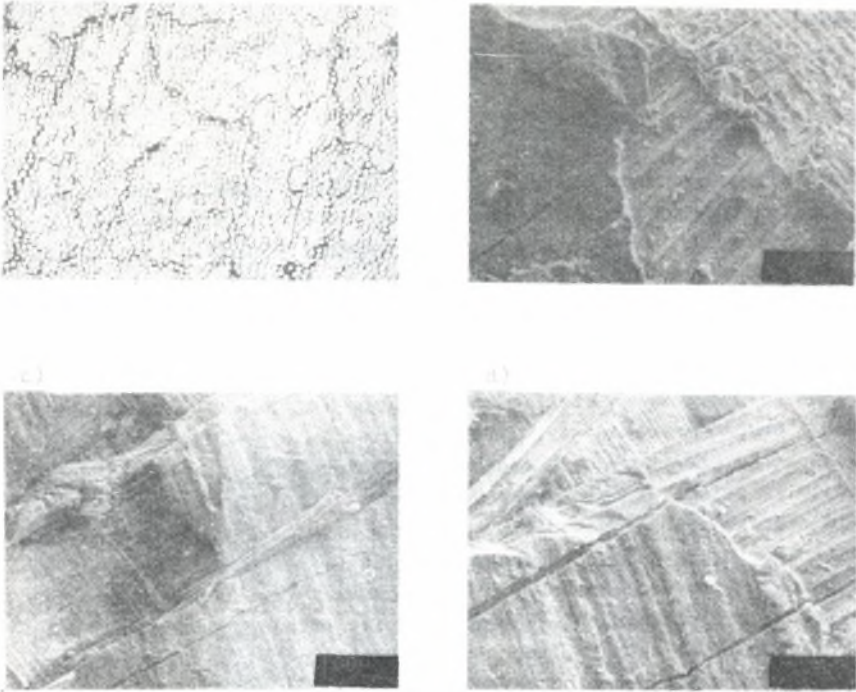
Fig. 24. Delaminations of FRP macro structures visible at a microscopic scale

a) macro scale, b) magnification 12,5 x



Rys. 25. Nierównomierny rozkład zawartości WW w mikrostrukturze TWW - ŻWS

Fig. 25. Non-uniform distribution of the volume fractions of reinforcing fibers in GFRP macrostructures



Rys. 26. Pęknięcia w mikrostrukturze TWW - ŻWS:

- a) struktura o wzmocnieniu jednokierunkowym WS (roving) pow. 100 x,
b,c,d) struktury warstwowe: 2T15/Ł0-0,5/1T15

Fig. 26. Cracks in GFRP microstructures:

- a) unidirectional reinforced structure (roving), magnification 100 x,
b,c,d) multilayer structure: 2T15/Ł0-0,5/1T15

B. Wady widoczne w obserwacjach mikroskopowych. Należą do nich:

- rozwarstwienia wewnętrzne przekroju makrostruktury,
- nierównomierna pod względem wartości zawartość WW,
- pęknięcia i odsłojenia w mikrostrukturze.

Wynikiem obserwacji wad technologicznych występujących w bieżącej, seryjnej produkcji wyrobów, jest zestaw obrazów mikro- i makrostruktury TWW utrwalonych na zdjęciach zamieszczonych na rys. 18 do 26.

Jakość prezentowanych zdjęć w wielu przypadkach nie jest niestety najlepsza. Częściowym wytłumaczeniem jest brak doświadczeń technicznych w fotografowaniu tych nowych materiałów. Szczególnie trudne problemy wynikają przy obserwacjach na mikroskopie skaningowym. TWW nie przewodzą prądu elektrycznego i każda nieciągłość napyłanej warstwy przewodzącej stanowi zakłócenie obrazu mikroskopowego. Przeprowadzone próby przyniosły jednak pewne doświadczenia techniczne, które pozwalają na częściową eliminację tych

kłopotów w przyszłości i uzyskiwania zdjęć o jakości dorównującej wyrobom metalowym.

8.3. Jakość makrostruktury TWW

Jakość mikrostruktury TWW jest to zbiór wymagań technicznych ustalonej przez konstruktora wyrobu, opierając się na odpowiednich przepisach i normach przedmiotowych. Wymagania techniczne uwzględniają takie właściwości materiału, które w sposób najbardziej wyraźny i rzetelny gwarantują weryfikację procesu wytwarzania.

Zbiór wymagań technicznych dla materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym przewiduje tzw. badania pełne i badania bieżące. Badania pełne przeprowadzane są przed wprowadzeniem materiału do stosowania w konstrukcji płatowca i obejmują prawie wszystkie - możliwe do przewidzenia warunki eksploatacyjne. Na podstawie tych badań wyznacza się zakres badań bieżących, zakładając że ściśle przestrzeganie procesów technologicznych wytwarzania zapewni stałość jakości materiału. Powyższe uwagi zostały przedstawione dla uzasadnienia przyjętego programu badań, których przedmiotem będą makrostruktury TWW, wytwarzane seryjnie i poddawane tzw. badaniom bieżącym.

Obowiązujące w przemyśle lotniczym przepisy ustalają przeprowadzanie bieżącej kontroli na tzw. próbkach "świadkach". Próbki te są wytwarzane razem z wyrobem w identycznych warunkach technologicznych, a ich kształt i wymiary powinny umożliwić przeprowadzenie przewidzianych badań bieżących. Badania realizowane są w laboratorium zakładowym, a ich wyniki zamieszczane w protokołach, pozwalających na łatwą identyfikację próbki oraz wyrobu, z którego pochodzi. Zasadniczymi badaniami, realizowanymi w programie badań bieżących, są badania właściwości mechanicznych. Badania te są realizowane zgodnie z wymaganiami Polskich Norm [80, 81, 82]. Przed przystąpieniem do omówienia wyników badań należy zwrócić uwagę, że przyjęte do badań normy PN odnoszą się do badań właściwości tworzyw sztucznych, co budzi poważne wątpliwości merytoryczne, o których wspomniano już w poprzednich rozdziałach, p. rozdz. 8.1.

Dla uzyskania możliwie szerokiego przeglądu makrostruktur, i tym samym charakteru i wielkości występujących zjawisk, wybrano do badań kilka ich przedstawicieli o zróżnicowanej konstrukcji. Opis i przyjęte niezbędne oznaczenia skrótowe ułatwiający identyfikację makrostruktur przedstawiono w tabeli 1.

Analizie poddano wyniki badań właściwości mechanicznych tych makrostruktur. Wyniki badań obejmują próbki "świadki" wytwarzane w ciągu jednego roku, stanowią więc wiarygodną populację do badań statystycznych. Liczebność populacji w poszczególnych grupach makrostruktur wynosiła od 100 do 120 sztuk. Badanie każdej próbki "świadka" wymaga oceny właściwości mechanicznych na pięciu próbkach wycinanych w dwóch prostopadłych kierunkach, tzw.

Tabela 1

Typowe makrostruktury TWW stosowane w konstrukcjach lotniczych







Symbol makrostruktury	Schemat makrostruktury	Materiał układu warstw element.	Gatunek materiału osnowy
1.		A, B, C	1, 2, 3
2.		A, B	1, 2, 3
3.		A, B	1, 2, 3
4.		A, B	1, 2, 3
5.		A, B	1, 2, 3
Objaśnienie symboli:.			
<p>Materiał układu warstw elementarnych: M- masa powierzchniowa</p> <p>A - tkanina szklana: T10 ($M=290 \text{ g/m}^2$)</p> <p>B - tkanina szklana: T15 ($M=160 \text{ g/m}^2$)</p> <p>C - tkanina organiczna: SWM ($M=90 \text{ g/m}^2$)</p> <p> Tkanina szklana trykątowa; ŁO-0,5 ($M=400 \text{ g/m}^2$)</p>			
<p>Gatunek materiału osnowy</p> <p>1 - żywica: EF-32-301</p> <p>2 - żywica: 5-211BN</p> <p>3 - żywica: Sp-97k</p>			
Przykład oznaczenia makrostruktury:			
2B3 = 1T15/ŁO-0,5/1T15 osnowa: Sp-97k			

Tabela 2

Wyniki badań właściwości mechanicznych TWW

Oznaczenie makrostruktury (wg tab. 1)	Próba rozciągania						Próba zginania					
	R _m [MPa]			E _r [GPa]			R _g [MPa]			E _g [MPa]		
	\bar{X}	G	R	\bar{X}	G	R	\bar{X}	G	R	\bar{X}	G	R
1 A 1	379	26	76	18 200	1 250	3 600	440,2	28,8	76,2	21 200	980	2 840
1 A 2	363	25,3	58	20 200	880	2 340	522,6	13,2	36,7	24 500	920	2 670
1 A 3	354	24,5	68,2	17 600	1 020	2 900	270,2	36,5	92,5	19 600	860	2 420
1 B 1	288,8	20,9	66	21 500	1 020	2 850	379,6	23	61	23 800	1 250	3 300
1 B 2	255,8	19,1	58,7	15 100	1 100	3 240	341,4	26,1	55	16 500	2 200	5 700
1 B 3	211	10,9	32,8	18 400	1 500	4 350	236,8	29,7	77	17 600	2 100	5 400
2 B 1	126,2	11,6	31				178	13,6	38,6	10 100	630	1 470
2 A 2	221	12,2	30				384	39,6	103,2	14 100	1 100	2 850
2 A 3	137,4	5,64	12,5				146,6	15,1	44,2	10 100	570	1 350
3 A 2	248,6	12,6	31,2				433,8	8,3	22,7	26 100	1 050	2 730
3 A 3	300,8	28,6	65,3				127,4	34,9	80,2	18 800	920	2 370
3 B 1	178,6	3,45	10,2				286	4,1	10,5	12 500	820	2 340
3 B 2	153,6	7,1	20,4				339,6	9,3	27,2	10 100	360	1 000
3 B 3	179,6	10,1	30,0				286,6	4,4	11,7	9 100	430	1 200
4 A 1	234	17,1	49,8				343	24,8	60	13 500	520	1 250
4 A 2	257,8	10,3	31,8				326,4	43,7	110,5	17 300	840	2 500
4 A 3	193,2	8,7	24,3				81,8	9,2	23,1	12 400	550	1 600
5 B 1	212	10,2	30				402,8	40,4	118	16 200	1 050	2 850
5 A 1	378	17,1	49				563	21,8	70	18 700	890	2 680
1 C 2	44,1	27,5	81	20 100	620	1 950	452	12,3	35	25 200	350	1 280

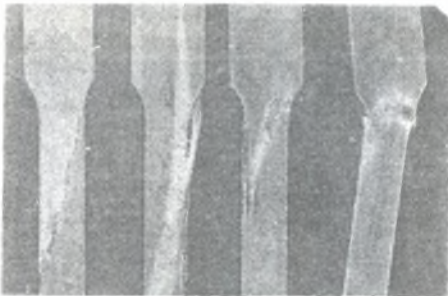
kierunku wiatku i kierunku osnowy. Użyto zwrotu tak zwane, ponieważ kierunki te są przyjęte w sposób umowny tylko dla warstw zewnętrznych. Analizie statystycznej poddano więc od 500 do 600 wyników badań dla każdej grupy makrostruktur. Wyniki analizy w postaci statystycznej zamieszczono w tabeli 2.

Tylko wstępna ocena tych wyników pozwala na stwierdzenie, że są to materiały o dużej wartości rozstępu właściwości mechanicznych w porównaniu z typowymi materiałami metalowymi. Jest to stwierdzenie dość powszechne i bardzo krzywdzące dla tych materiałów, których możliwości konstrukcyjne zostały już przecież potwierdzone. Należy uznać, że problem jakości TWW jest bardziej złożony i wymaga weryfikacji dotychczasowych kryteriów oceny.

a) b) c) d) e)



f) g) h) i)



Rys. 27. Typowe przypadki charakterystycznych zniszczeń makrostruktur TWW, występujące w próbach statycznego rozciągania, zgodnie z wymaganiami normy PN-81/C-89034

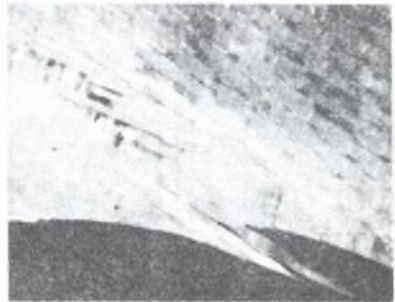
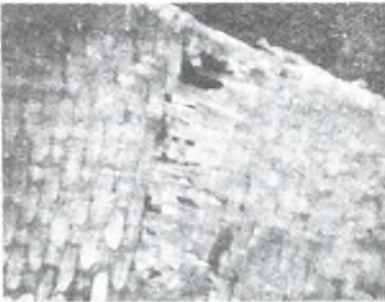
Fig. 27. Typical cases of the characteristic failures of the FRP specimens after the tensile tests according the PN-81/C-89034

Dla uzasadnienia tego poglądu dokonano szczegółowego przeglądu próbek "świadców", próbek do badań właściwości mechanicznych oraz charakterystycznych zniszczeń makrostruktur. Wyniki obserwacji charakteryzują zdjęcia makrostruktur zamieszczone na rys. 27 do 29.

Zdjęcia dokumentują lokalizację i kształt obszaru zniszczenia makrostruktur wybranych do obserwacji próbek. Szczególnie znamienne są obserwacje zestawione na rys. 27. Zagadnienie lokalizacji zniszczenia makrostruktur TWW i jego przyczyn było i jest przedmiotem licznych badań i wynikających z nich propozycji rozwiązań technicznych, dotyczących realizacji prób rozciągania [66, 83, 84, 85, 86].

Obserwacjom poddano również powierzchnię i przekrój próbek "świadców". Wyniki tych obserwacji ilustrują rys. 30 i 31. Przedstawiony na rys. 30 przykład profilogramu powierzchni próbek zmusza do weryfikacji tradycyjnego podejścia do pojęcia tzw. przekroju nośnego makrostruktur.

Wprowadzanie do oceny wartości naprężeń - uśrednionych wartości pola przekroju poprzecznego próbki musi zakłócać istotnie rzetelność wyników badań i ocenę jakości makrostruktur TWW.



Rys. 28. Obrazy mikroskopowe obszarów zniszczenia makrostruktur przedstawionych na rys. 27

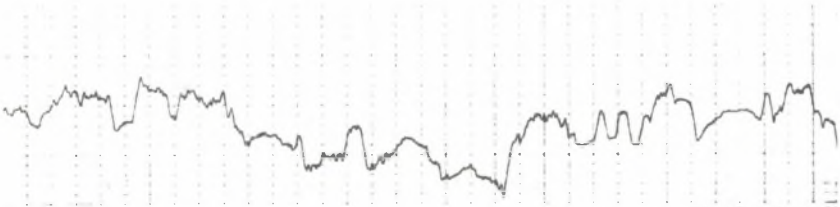
Fig. 28. Photomicroscopic views of the failure regions of the specimens from fig. 27



Rys. 29. Obrazy mikroskopowe obszarów zniszczenia makrostruktur przedstawionych na rys. 27. Mikroskop skaningowy: Novascan 10

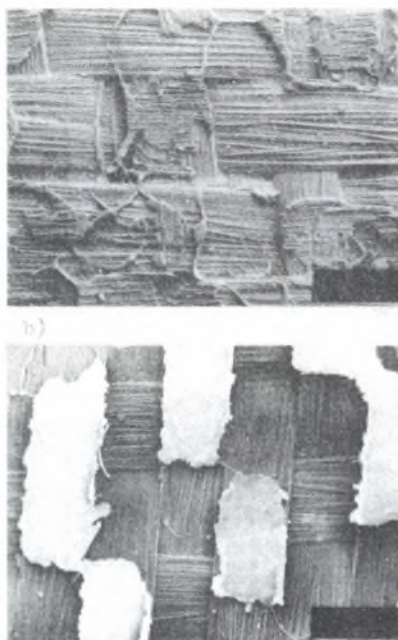
Fig. 29. SEM photomicrographs of the macrostructures failure regions from fig. 27

Scanning microscope Novascan 10



Rys. 30. Typowy profilogram powierzchni zewnętrznych próbki ŻWS: makrostruktura 1T15/Ł0-0,5/2T15, o grubości nominalnej: 1,21 mm. Pow. pionowe: 100 x, poziome: 25 x

Fig. 30. Typical profilogram of the outer surfaces of the GFRP macrostructures: 1T15/Ł0-0,5/2T15. Nominal thickness: 1,21 mm. Magnification: vertical 100 x, horizontal 25 x



Rys. 31. Obrazy mikroskopowe warstw zewnętrznych makrostruktury:
1T15/Ł0-0,5/2T15:

a) od strony wzornika (formy), b) od strony tkaniny drenażowej (widoczne białe plamy są odbiciem narostów żywicy)

Fig. 31. SEM photomicrographs of the outer layers of the macrostructure:
1T15/Ł0-0,5/2T15:

a) from the moulding tool side, b) from the bleeder cloth pack side (white spots reflected the resin bears)

Potwierdzeniem ilościowym tej tezy są wyniki pomiarów grubości próbek dla wybranych makrostruktur. Pomiary grubości wykonano mikrometrem warsztatowym na wycinkach makrostruktur o wymiarach: 50 x 50 mm. Pomiary wykonywano w 10 punktach. Dla uzyskania możliwie rzetelnej oceny statystycznej każdą makrostrukturę reprezentowało 10 wycinków pobranych z różnych okresów produkcji. Wyniki opracowania statystycznego tych pomiarów zamieszczono w tabeli 3.

Dla poszerzenia obszaru informacji do analizy wykonano badania grubości warstw elementarnych uzyskanych z rozwarstwienia próbek wybranych makrostruktur. Pomiary przeprowadzono na próbkach w warunkach identycznych, jak w pomiarach grubości makrostruktur. Wyniki pomiarów po opracowaniu statystycznym zestawiono w tabeli 4.

Badania makrostruktur TWW, które przedstawiono w niniejszym rozdziale, stanowią jedynie fragment tak obszernego przecież zagadnienia, jakim jest jakość materiału. Zostały one wykonane dla potwierdzenia złożoności i waż-

Wyniki badań grubości próbek makrostruktur TWW

Oznaczenie makrostruktury (wg tab. 1)	Wyniki badań statystycznych		
	\bar{X} [mm]	σ [mm]	R [mm]
1 A 1	1,40	0,02	0,05
1 A 2	1,38	0,01	0,02
1 A 3	1,42	0,04	0,11
1 B 1	0,85	0,02	0,04
1 B 2	0,87	0,02	0,06
1 B 3	0,88	0,03	0,09
2 A 2	1,38	0,03	0,07
2 A 3	1,40	0,03	0,07
2 B 1	1,01	0,02	0,10
2 B 2	1,02	0,02	0,07
3 A 2	1,28	0,01	0,05
3 A 3	1,58	0,03	0,11
3 B 1	1,07	0,05	0,17
3 B 2	1,32	0,01	0,05
3 B 3	1,14	0,08	0,26
4 A 1	1,92	0,05	0,18
4 A 2	1,67	0,03	0,11
4 A 3	2,04	0,07	0,24
1 C 2	1,38	0,03	0,12

Wyniki badań grubości warstw elementarnych próbek makrostruktur TWW

Oznaczenie makrostruktury	Oznaczenie warstwy elementarnej	Wyniki badań statystycznych		
		\bar{x} [mm]	σ [mm]	R [mm]
(wg tab. 1)				
2 A 2	A 2	0,35	0,01	0,03
	Ł0-0,5	0,68	0,06	0,17
2 A 3	A 3	0,32	0,03	0,09
	Ł0-0,5	0,68	0,04	0,12
2 B 1	B 1	0,25	0,02	0,06
	Ł0-0,5	0,69	0,05	0,16
2 B 3	B 3	0,24	0,02	0,06
	Ł0-0,5	0,68	0,03	0,09
3 A 2	A 2	0,35	0,02	0,06
	Ł0-0,5	0,68	0,05	0,15
3 A 3	A 2	0,34	0,02	0,08
	Ł0-0,5	0,72	0,05	0,16
1 C 2	C 2	0,31	0,02	0,08

ności problemu. Zakres i merytoryczną treść wykonanych badań warunkowały i ograniczały warunki produkcyjne - próbki pobierane były z bieżącej produkcji bez możliwości ustalenia szczegółów technologicznych ich wytwarzania. Uzyskane wyniki stanowią jednak bogaty materiał analityczny, pozwalający na ocenę skali zjawisk i możliwości ich wpływu na ocenę jakości makrostruktur TWW.

8.4. Analiza i ocena wyników badań jakości TWW

Zadaniem niniejszego rozdziału jest analiza i ocena wyników obserwacji i badań zrealizowanych i przedstawionych w ramach rozdziałów 8.2 i 8.3. Ze względów na zróżnicowanie zagadnienia pod względem oddziałujących czynników technologicznych, analizę wyników należy podzielić na kilka odrębnych zagadnień.

P r o b l e m y t e c h n o l o g i c z n e

Każdy materiał, z którego wytwarzamy określony wyrób, stwarza odrębne, specyficzne problemy - znane i oczywiste dla doświadczonych wytwórców. TWW nie są w tym względzie wyjątkiem, ale ich specyfika technologiczna jest rzeczywiście oryginalna. Makrostrukturę wyrobu tworzy w tym przypadku kilkanaście warstw elementarnych o bardzo małej grubości i dużej podatności na zniekształcenie. Sprostanie wymaganiom idealnego układu geometrycznego WW jest niezwykle trudne. Natomiast przekroczenie pewnych wartości odchyłek geometrycznych, musi i prowadzi do niekorzystnych skutków technologicznych. Wyeliminowanie takich sytuacji wymaga precyzyjnego, specjalnego oprzyrządowania technologicznego oraz wysokich kwalifikacji wytwórców. Szczególnie trudne do projektowania i realizacji są wyroby kształtowe o ostrych narożach i usztywnieniach konstrukcyjnych. Błędy konstrukcyjne lub technologiczne ujawniają się w tych przypadkach szczególnie ostro, doprowadzając do uszkodzeń wewnątrz makrostruktury. Jest to zagadnienie mało rozpoznane, a jego skutki w wielu przypadkach muszą być i są tolerowane przez odbiorcę wyrobów. Rozwiązanie tych zagadnień musi opierać się na wnikliwej analizie odkształceń i wynikającej z niej właściwej konstrukcji makrostruktury.

Również trudnym do utrzymania warunkiem technicznym jest powtarzalność grubości wyrobu i powiązana z tym problemem jednorodność właściwości makrostruktury. Materiał osnowy przechodzi w czasie kształtowania w stan plastyczno-płynny, o trudnym do kontroli sposobie płynięcia, szczególnie w pionowych ściankach wyrobów. Może to zróżnicować w sposób istotny zawartość objętościową materiału osnowy, jak również przekraczać wartości minimalne oznaczające tzw. wysycenie wzmocnienia.

Wymienione uwagi stanowią jedynie zbiór wstępnych ocen i analizy problemów technologicznych wymagających rozwiązania.

Problemy konstrukcyjne

Podstawowym problemem konstrukcyjnym przy projektowaniu wyrobów z TWW jest uzyskanie zadanych w założeniach technicznych właściwości wytrzymałościowych oraz sztywności. Makrostruktura TWW jest zbiorem warstw elementarnych, a więc warunkiem podstawowym jest posiadanie szczegółowej, rzetelnej informacji o ich właściwościach. Zasadniczą cechą warstw elementarnych jest silna anizotropowość właściwości, zarówno w zakresie wytrzymałości, jak również sztywności i właściwości cieplnych.

Ta oryginalna cecha wynikająca ze struktury warstw elementarnych, stwarza niezwykle możliwości konstrukcyjne - możliwość projektowania właściwości makrostruktury i tym samym wyrobu. Jednocześnie anizotropia właściwości warstw elementarnych narzuca szereg ograniczeń konstrukcyjnych, wynikających ze wzajemnego oddziaływania tych warstw w procesie zestalania i użytkowania wyrobów. Przykładem takiego oddziaływania jest występowanie silnych momentów termicznych, zdolnych do zniekształcenia zarysu makrostruktury. Szczególnie trudne pod tym względem są warstwy elementarne, wykonane z włókien węglowych lub organicznych, typu: Kevlar, Nomex, SWM.

Anizotropia właściwości warstw elementarnych, np. istotne zróżnicowanie wytrzymałości przy rozciąganiu i ściskaniu oraz mała sztywność, wymusza na konstruktorach wyrobu stosowanie makrostruktur asymetrycznych oraz licznych usztywnień. Przewidywane skutki takiej konstrukcji makrostruktury muszą być kompensowane przez specjalną konstrukcję wyrobu. Jest to zadanie skomplikowane i wymaga od konstruktora dużego doświadczenia praktycznego.

Problemy badań i oceny właściwości makrostruktury

Badania właściwości mechanicznych TWW, to odrębne, obszerne i kontrowersyjne zagadnienie techniczne. Niestety - tradycyjne podejście do tego typu zagadnienia prowadzi do nieoczekiwanych, zaskakujących wyników. Potwierdza to analiza wyników badań właściwości mechanicznych. Duża rozpiętość wyników badań wytrzymałości i sztywności makrostruktury świadczy o wpływie wielu nieuwzględnionych czynników na ich rezultaty.

Występowanie i znaczenie tych czynników potwierdza teoria mechaniki odkształceń TWW, a ich uwzględnianie jest przedmiotem licznych, nowych propozycji realizacji badań. Do szczególnie istotnych czynników zakłócających możliwości prostej oceny właściwości mechanicznych TWW, należą:

- mała odporność makrostruktury na rozwarstwienie, możliwa do ujawnienia i oceny w specjalnej próbie ścinania międzywarstwowego [73, 75],
- wysoka czułość makrostruktury na odkształcenia postaciowe pojawiające się nawet przy niewielkich odchyłkach od głównych osi anizotropii,
- bardzo złożona mechanika pęknięcia makrostruktury, utrudniająca określenie momentu pełnego zniszczenia.

Szczególnym zagadnieniem jest określanie wartości przekroju nośnego makrostruktury TWW. Potwierdzają to stwierdzenie badania rozkładu grubości oraz stanu powierzchni, jak również wyniki badań właściwości mechanicznych. Operowanie wartościami przekroju nośnego wyznaczonymi z pomiaru grubości typowymi przyrządami warsztatowymi jest bardzo problematyczne. Bardziej obiektywnym wydaje się operowanie jednostkową siłą zrywającą rozumianą jako wartość siły na ilość warstw elementarnych.

Wątpliwości musi również budzić pomiar odkształceń, ponieważ wyniki badań modułów sprężystości są znacznie niższe od uzasadnionych oczekiwań wynikających z oceny teoretycznej.

Wymienione problemy wymagają indywidualnie szczegółowej analizy i badań eksperymentalnych, a ich wyniki powinny określić nowe, bardziej precyzyjne warunki techniczne badań i kontroli, a przyszłościowo normy przedmiotowe.

9. NAPRĘŻENIA CIEPLNE W MAKROSTRUKTURZE TWW

9.1. Uwagi ogólne

W części przeglądowej pracy wyraźnie akcentowano jedną z zasadniczych cech struktury TWW - istotne różnice właściwości fizycznych podstawowych składników makrostruktury: osnowy polimerowej i włókien wzmacniających. Skutki tych różnic stanowiły przedmiot rozważań poszczególnych rozdziałów części przeglądowej pracy. Ujawniają się również w procesach technologicznych wytwarzania wyrobów. Stwierdzenie to potwierdzają wyniki badań zamieszczonych w publikacjach, np. [87, 88, 89, 90].

Przedmiotem niniejszej pracy są makrostruktury TWW, wytwarzane w procesach technologicznych wykorzystujących operacje kształtowania i zestalania wyrobów w temperaturach podwyższonych: $T_u = 150$ do 200°C (423 do 473K), co określa się tzw. utwardzaniem "na gorąco". W rozdz. 6 omówiono i oszacowano skutki występowania zjawisk termomechanicznych, spowodowanych zmianami temperatury. Podkreślono również wyraźnie przyjęte uproszczenia lub przybliżenia, które warunkują możliwości wykorzystania zależności teoretycznych. Przyjmując na tej podstawie tezę o istotności wpływu tych zjawisk na właściwości wytwarzanych makrostruktur TWW, postanowiono dokonać doświadczalnej weryfikacji tych zależności oraz wyników obliczeń.

Program badań z tego zakresu pracy obejmuje dwie zasadnicze grupy zagadnień:

- badania tzw. naprężeń szczątkowych, których występowanie jest wynikiem zróżnicowania właściwości fizycznych i mechanicznych warstw elementarnych wchodzących w skład makrostruktury oraz "historię" procesu technologicznego wytwarzania,
- badania dylatometryczne odkształcalności cieplnej makrostruktury, polegające na ogrzewaniu próbek od temperatur gwarantujących przejście materiału osnowy w stan wysokiej elastyczności i osiągające wartości w przybliżeniu równe temperaturom utwardzania.

Założony program i zakres badań powinny udzielić istotnych informacji praktycznych o możliwościach kontroli występujących zjawisk i regulacji parametrów technologicznych.

9.2. Napreżenia szczątkowe

9.2.1. Przedmiot badań

Przedmiotem badań są wybrane, typowe makrostruktury TWW, stosowane w produkcji wielkogabarytowych wyrobów w postaci cienkościennych powłok kształtowych. Zjawiska występowania naprężeń cieplnych w tego typu wyrobach ujawniają się szczególnie wyraźnie w postaci zwichrowania założonych kształtów geometrycznych. Przyjęta do realizacji metodyka badań, polegająca na rozwarstwianiu próbek, limitowała możliwości dowolnego wyboru makrostruktury, ograniczając go do próbek o kształcie płaskim i makrostrukturze zawierającej warstwę elementarną wykonaną z tzw. dzianiny (tkanina ŁO - prod. ZSRR).

9.2.2. Metodyka i wyniki badań wstępnych

Występowanie naprężeń własnych w makrostrukturze powinno towarzyszyć "zamrożone" w niej odkształcenie warstw elementarnych. Rozwarstwienie makrostruktury na warstwy elementarne powinno stworzyć możliwości odzyskania przez ich materiał wartości wymiarów wynikających z ich właściwości cieplnych - WLRC.

Problemem o podstawowym znaczeniu dla powodzenia takich badań jest możliwość rejestracji tak małych wartości odkształceń oraz rozdzielenia odkształceń na odkształcenia: linowe i kątowe (postaciowe).

Przeprowadzone w rozdz. 6 oszacowania oraz wstępne próby wykazały prawdopodobne wartości odkształceń rzędu setnych części procenta. Biorąc pod uwagę możliwą do uzyskania dokładność pomiaru długości na mikroskopie warsztatowym firmy Zeiss, wynoszącą $0,1 \mu\text{m}$, ustalono bazę pomiarową: $L = 150 \text{ mm}$. Bazę pomiarową wyznaczały otwory o średnicy: $d = 0,5 \text{ mm}$, wywiercone w próbkach prostokątnych o wymiarach: $180 \times 20 \text{ mm}$. Badania przeprowadzono w następujący sposób:

- przygotowane do pomiaru próbki zostały poddane pomiarom odległości otworów wyznaczających ich bazę pomiarową z dokładnością do $0,1 \mu\text{m}$,
- po dokonaniu tego pomiaru, próbki rozwarstwiano mechanicznie (skalpelem chirurgicznym) i poddano powtórnie pomiarom odległości otworów.

Dla uzyskania możliwie wiarygodnych wyników i uniknięcia błędów przypadkowych pomiary przeprowadzono na 10 próbkach z tej samej konstrukcji makrostruktury, Wyniki pomiarów po opracowaniu statystycznym zamieszczono w tabeli 5.

9.2.3. Wstępna analiza wyników

Przeprowadzone badania potwierdzają sensowność tezy o występowaniu naprężeń szczątkowych, których istnienie w badanych makrostrukturach odzwierciedlają odkształcenia warstw elementarnych po rozwarstwieniu makrostruktury. Wstępna, szacunkowa wartość tych naprężeń może być łatwo obliczona,

Tabela 5

Wyniki badań odkształceń warstw elementarnych
po rozwarstwieniu wybranych makrostruktur TWW

Oznaczenie makrostruktur	Oznaczenie warstw elementarnych	Odległość otworów [mm]		Odkształcenie względne: $\epsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%$
		przed rozwarstwieniem: l_0	po rozwarstwieniu: l_1	
(wg tab. 1)				
2 A 2	A 2	100,2365	100,1844	-0,052
	Ł0-0,5		100,2866	+0,050
	A 4		100,1804	-0,056
2 B 1	B 1	100,2965	100,2613	-0,035
	Ł0-0,5		100,3516	+0,055
	B 1		100,2553	-0,041
3 A 3	A 3	100,1260	100,0919	-0,034
	Ł0-0,5		100,1140	-0,012
	A 3		100,2081	+0,082
	A 3		100,1410	+0,015
4 A 1	A 1 (2 warstwy)	100,2150	100,1830	-0,032
	Ł0-0,5		100,2651	+0,050
	A 1 (2 warstwy)		100,1899	-0,025
4 A 3	A 3 (2 warstwy)	100,1872	100,1250	-0,062
	Ł0-0,5		100,2252	+0,038
	A 3 (2 warstwy)		100,1451	-0,042
3 B 2	B 2 (2 warstwy)	100,1842	100,1591	-0,025
	Ł0-0,5		100,2362	+0,052
	B 2		100,1431	-0,041

przy założeniu wartości modułów sprężystości warstw elementarnych. Zakładając wartość modułu sprężystości dla warstw elementarnych wykonanych z tkanin szklanych $E = 30\ 000\ \text{MPa}$ oraz rozpiętość wyników wyznaczonych wartości odkształceń z tabeli 5, można obliczyć przybliżone wartości naprężeń szcztątkowych:

$$\sigma_s = E \cdot \epsilon = 30\ 000 \cdot (+0,015 \text{ do } -0,062) \cdot 0,01 = \underline{+4,5 \text{ do } -18,6\ \text{MPa}}.$$

Oceniając uzyskane wartości naprężeń szcztątkowych, można stwierdzić, że rząd ich wartości jest zgodny z danymi literaturowymi, przedstawionymi np. w pracach W. Schneidera [60, 61]. Różnica wartości może być wynikiem wielu złożonych przyczyn, które będą jeszcze analizowane całościowo. Ocenimy wyłącznie ich prawdopodobne skutki technologiczne i konstrukcyjne:

- a) wielkość naprężeń szcztątkowych ujawniona i oszacowana na podstawie przeprowadzonych badań jest o jeden rząd wartości niższa od wartości wytrzymałości rozpatrywanych warstw elementarnych,
- b) wielkość "zamrożonych" odkształceń warstw elementarnych, wynosząca kilka setnych części procenta, może powodować mikropęknięcia materiału osnowy na poziomie mikrostruktury, uwzględniając znane i potwierdzone zjawisko zwiększenia odkształcenia osnowy opisywane wskaźnikiem SMF (strain magnification factor),
- c) stosunkowo niskie wartości naprężeń szcztątkowych mogą mieć jednak istotny wpływ na powstawanie rozwarstwień mikrostruktury w tych fragmentach przekroju wyrobu, gdzie występują duże krzywizny - potwierdziły to obserwacje wad technologicznych (p. rozdz. 8.2 - rys. 21).

Ocenie należy poddać dokładność i rzetelność uzyskanych wyników, do czego zobowiązuje brak informacji literaturowych, potwierdzających słuszność metodyki badań. Podstawowe obawy może budzić sposób rozwarstwiania makrostruktury, który może stanowić źródło dodatkowych odkształceń warstw elementarnych - uwzględniono ten fakt przez ograniczenie się do makrostruktur łatwo rozdzielanych mechanicznie. Szczególnym utrudnieniem dokładnych pomiarów jest jakość powierzchni przekroju makrostruktury, szczególnie po obróbce mechanicznej otworów bazowych. Wymienione uwagi będą stanowić przedmiot dalszych prac nad uściśleniem badań i możliwości ich wykorzystania do oceny jakości makrostruktur TWW w praktyce.

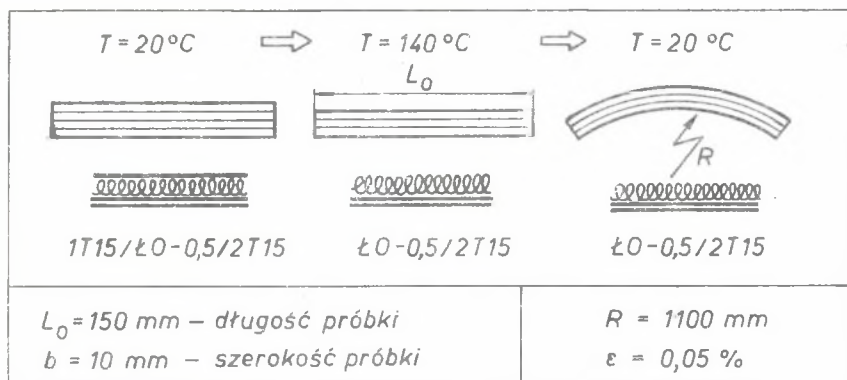
9.3. Badania odkształcalności cieplnej makrostruktur

9.3.1. Uwagi ogólne i badania wstępne

Podstawienie tezy o istotności wpływu pomiarów technologicznych i właściwości reologicznych osnowy na wynik operacji zestalania makrostruktury, wymaga wstępnego potwierdzenia skali i charakteru występujących zjawisk.

Podstawy fizyczne budowy makrostruktury ŻS omówione w rozdz. 4.1 dają wystarczające przesłanki do poszukiwań doświadczalnego potwierdzenia skali zjawiska na poziomie makrostruktury TWW.

Analizowane w pracy makrostruktury TWW są fragmentami wyrobów z bieżącej produkcji. Dokładna identyfikacja parametrów technologicznych ich wytwarzania nie jest możliwa i to nie tylko ze względu na poziom ich kontroli. Szczególnie trudna do określenia jest dokładność i powtarzalność cykli: ogrzewanie - chłodzenie. Powyższe uwagi stały się powodem realizacji badań wstępnych. Zasadniczą ich treść przedstawia przykład zilustrowany na rys. 32.



Rys. 32. Efekt podgrzania (powyżej temperatury T_g) próbki makrostruktury ŻWS po zdjęciu jednej watswy elementarnej

Fig. 32. Effect of heating (above the glass transition temperature T_g) of the GFRP specimen after removal of the one elementary ply

Badana makrostruktura o symbolu 3B3 (tab. 1) jest typową makrostrukturą o asymetrycznym układzie warstw elementarnych. Oddzielenie jednej warstwy elementarnej T15 - w temperaturze otoczenia nie wywołało wyraźnego wygięcia makrostruktury. Podgrzanie tej niepełnej makrostruktury do temperatury $T = 140^{\circ}\text{C}$, spowodowało po jej ochłodzeniu możliwe do zauważenia wygięcie próbki.

Przeprowadzone doświadczenia, bez szczegółowej analizy wartościowej, upoważniają do przyjęcia następujących stwierdzeń:

- usunięcie warstwy elementarnej wywołało zmianę stanu równowagi makrostruktury, co świadczy o występowaniu szczątkowych naprężeń wewnętrznych,
- zmiana stanu równowagi wewnętrznej, mało widoczna w temperaturze otoczenia, daje wyraźne skutki po ogrzaniu do temperatury wyższej od temperatury zeszklenia w postaci znacznego wygięcia próbki.

Uzyskane wyniki potwierdziły sens i konieczność przeprowadzenia badań dylatometrycznych makrostruktur TWW.

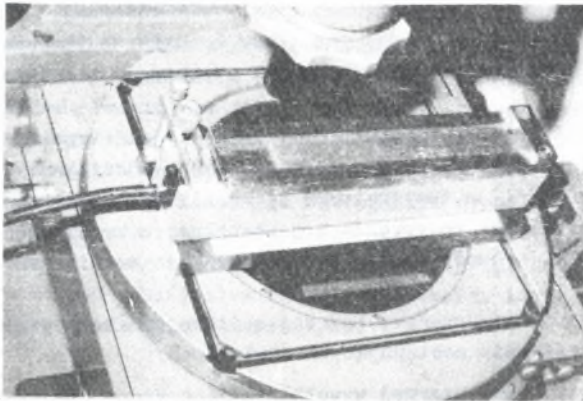
9.3.2 Badania dylatometryczne

K o n s t r u k c j a d y l a t o m e t r u

Badania dylatometryczne polegają na pomiarach i analizie rozszerzalności cieplnej materiałów, jako czynnika oddającego wyraźnie niektóre zjawiska fizyczne zachodzące w mikrostrukturze materiału, przy zmianach temperatury. Metody badań dylatometrycznych dla typowych materiałów izotropowych, w tym również TS, określone są przez odpowiednie normy [90, 91, 92, 93].

Typowe dylatometry do badań metali, ze względu na wymagany kształt i wymiary próbek, nie nadają się do realizacji zamierzonych w programie badań. Dylatometry umożliwiające zastosowanie próbek płaskich o większych wymiarach, nie są niestety dostępne. Spowodowało to konieczność podjęcia próby wykonania własnej konstrukcji dylatometru, opierając się na następujących założeniach:

- pomiar odkształcenia za pomocą mikroskopu warsztatowego o dokładności $1\ \mu\text{m}$,
- długość bazy pomiarowej $L = 50 - 150\ \text{mm}$,
- szerokość maksymalna próbek $B = 20\ \text{mm}$,
- ogrzewanie próbek z regulowaną prędkością wzrostu temperatury oraz możliwością jej stabilizacji w zakresie $20 - 200^\circ\text{C}$ ($293 - 473\text{K}$),
- pomiar i regulacja temperatury: termopara Fe-Konst i regulator temperatury z cyfrowym odczytem bieżących jej wartości.



Rys. 33. Widok dylatometru użytego do badań makrostruktur TWW

Fig. 33. View of the dilatometer used in testing of the FRP macrostructures

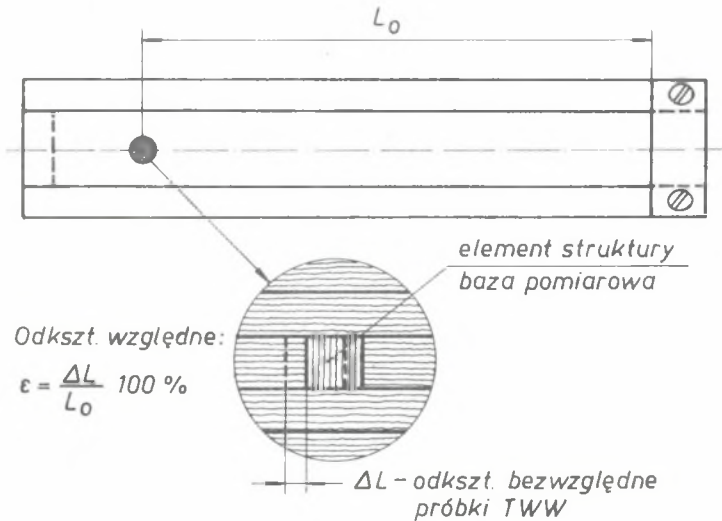
Kierując się przyjętymi założeniami konstrukcyjno-użytkowymi, wykonano prototyp dylatometru, który po dokonaniu niezbędnych testów postanowiono dopuścić do realizacji badań. Widok tego dylatometru zamocowanego na mikroskopie przedstawia rys. 33.

Do najważniejszych problemów, które wymagały analizy i prób przy testowaniu jakości dylatometru, należały:

- równomierność rozkładu oraz dokładność pomiaru i regulacji temperatury próbki,
- dokładność i powtarzalność pomiaru odkształcenia próbki.

Przeprowadzone testy i pomiary pozwoliły na wykonanie zmian konstrukcyjnych dylatometru, poprawiających jego jakość badawczą do zadowalającego poziomu. Błąd regulacji i odczytu temperatury zawiera się w granicach 4°C , co można uznać za wystarczającą dokładność, przy założonym zakresie jej zmienności.

Pomiar odkształcenia realizowano przez obserwację przemieszczenia punktu wyznaczonego na powierzchni próbki, którego odległość od miejsca jednostronnego zacisku próbki stanowi długość bazy pomiarowej L_0 . Po wypróbowaniu różnych koncepcji oznaczania punktu pomiarowego przyjęto możliwość wykorzystania naturalnej struktury warstwy wierzchniej próbek badawczych, przy powiększeniu 20x (p. rys. 31). Schemat pomiaru odkształcenia próbek przedstawia rys. 34.



Rys. 34. Schemat pomiaru odkształcenia próbek TWW

Fig. 34. Schematic of the strain measuring method of FRP specimens

Metodyka badań

Badania dylatometryczne przeprowadzono na próbkach prostokątnych, płaskich o wymiarach: 20 x 150 mm, wyciętych z próbek świadków lub makrostruktury wyrobów. Grubość próbek odpowiadała grubości badanej makrostruktury. Anizotropowość właściwości makrostruktur wymusza precyzyjną zgodność kła-

runku ułożenia włókien: osnowy, wątku z zamierzonym kierunkiem badania, co wymagało stosowania specjalnego oprzyrządowania do wycinania próbek. Badania przeprowadzono wykonując następujące zasadnicze czynności:

- a) ułożenie i zamocowanie próbki w dylatometrze,
- b) termostatowanie próbki w stałej temperaturze $T = 30^{\circ}\text{C}$ przez około 30 minut,
- c) ustalenie położenia punktu pomiarowego i pomiar długości bazy pomiarowej L_0 ,
- d) ustawienie mocy grzałek - gwarantującej prędkość wzrostu temperatury ok. 50 deg na godzinę,
- e) obserwacja i rejestracja zmian położenia punktu pomiarowego w założonym przedziale zmienności temperatur.

Program i wyniki badań

Zasadniczym celem przyjętego programu badań dylatometrycznych jest ustalenie przebiegu odkształcenia próbek TWW przy ogrzewaniu do zakresu temperatur gwarantującego przejście materiału osnowy w stan wysokiej elastyczności $T = 160^{\circ}\text{C}$. Program obejmował dwie odrębne grupy badań.

A. Badania wartości odkształceń szcztątkowych

Podstawowym celem tej grupy badań było ustalenie przebiegu i wartości odkształcenia próbek pobranych bezpośrednio z procesu produkcyjnego, z utrzymaniem maksymalnego dystansu czasowego równego siedem dni. Do badań wybrano niektóre typy makrostruktury o znacznej reprezentacji w produkowanym asortymencie wyrobów.

Badaniom poddano próbki makrostruktury: 3 B2 (p. tab. 1) o następującym układzie warstw elementarnych:

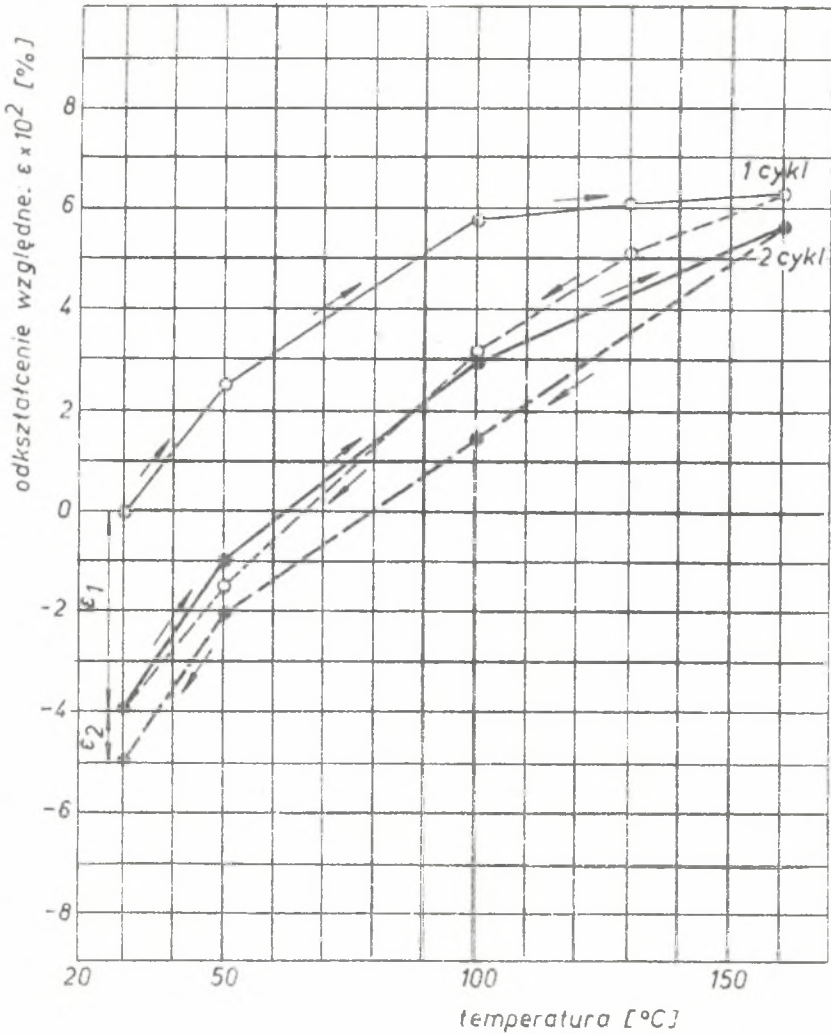
2T15/Ł0-0,5/1T15.

Badania przeprowadzono na próbkach o pełnym układzie warstw elementarnych oraz na próbkach warstw elementarnych otrzymanych z rozwarstwienia makrostruktury. Badania próbek przeprowadzono w dwóch cyklach: ogrzewania - chłodzenia. W każdym cyklu, próbki po osiągnięciu temperatury $T = 160^{\circ}\text{C}$ były w niej utrzymywane przez czas $t = 60$ min. Prędkość wzrostu i spadku temperatury w obydwu cyklach ustalono na ok. 50 deg na godzinę. Wyniki badań w postaci wykresów przedstawiono na rys. 35 do 39.

Oznaczone na wykresach wartości odkształceń: ϵ_1 i ϵ_2 - wyznaczono z następujących wzorów:

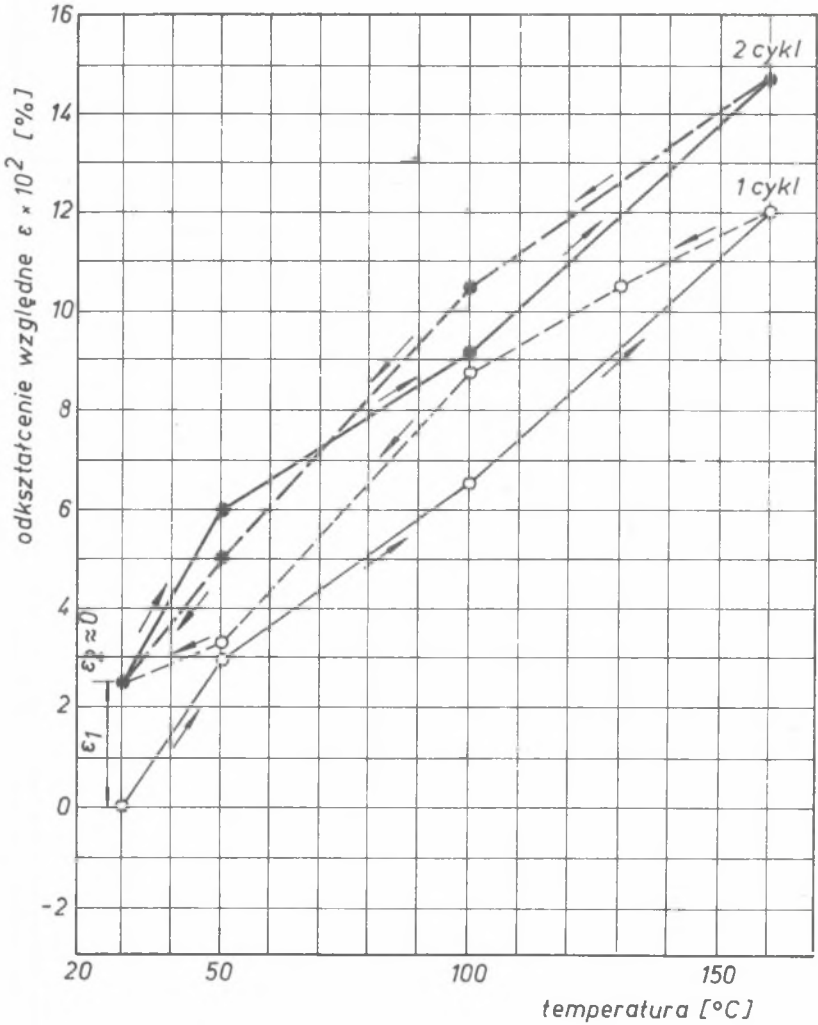
$$\epsilon_1 = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100\%, \quad (48)$$

$$\epsilon_2 = \frac{L_2 - L_0}{L_0} \cdot 100\%.$$



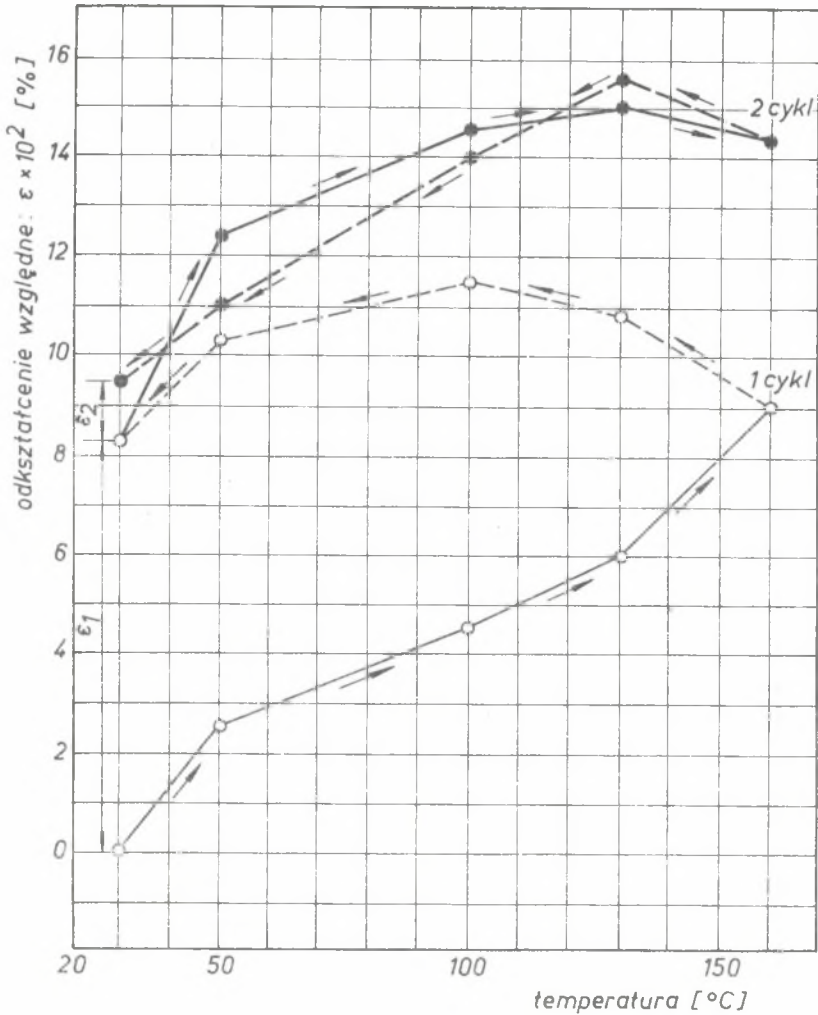
Rys. 35. Odkształcenie względne próbki TWW w funkcji temperatury. Makrostruktura podstawowa: 3B2 (tab. 1). Makrostruktura badana: 3B2. Kierunek pomiaru odkształcenia: osnowa

Fig. 35. Plot of the relative strain vs. temperature of the FRP specimen. Basic macrostructure: 3B2 (table 1). Tested macrostructure: 3B2. Measurements direction: warp



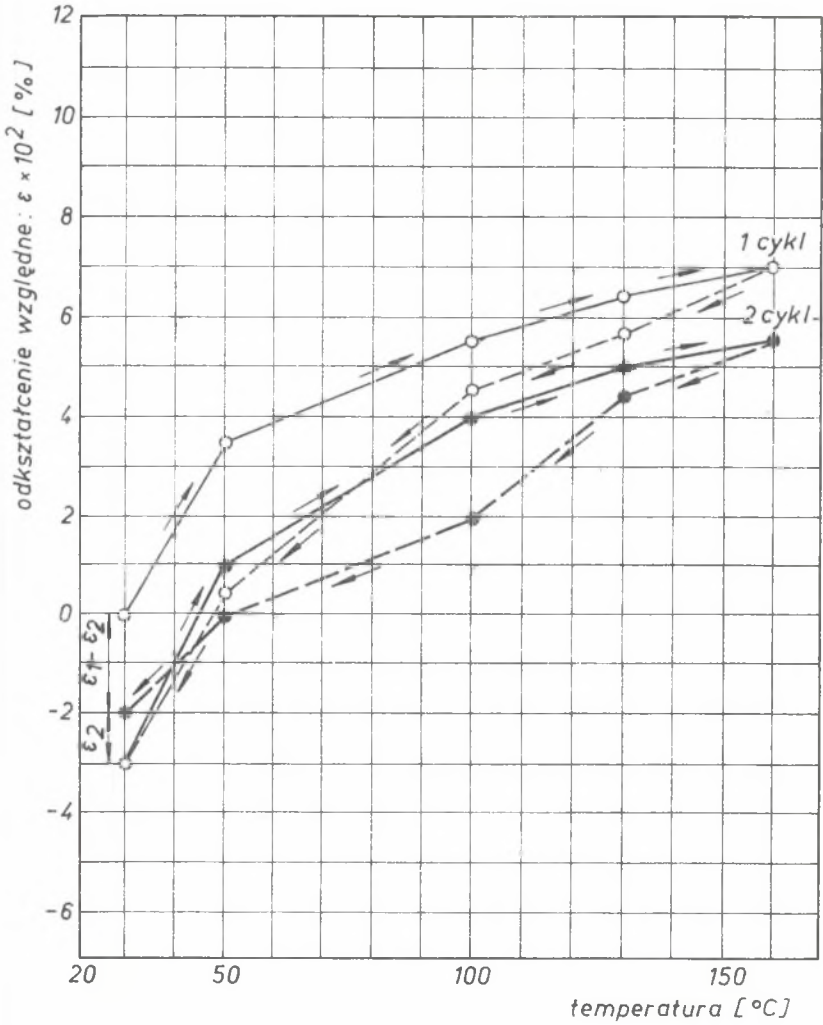
Rys. 36. Odkształcenie względne próbki TWW w funkcji temperatury. Makrostruktura podstawowa: 3B2 (tab. 1). Makrostruktura badana: 3B2. Kierunek pomiaru odkształcenia: wążek

Fig. 36. Plot of the relative strain vs. temperature of the FRP specimen. Basic macrostructure: 3B2 (table 1). Tested macrostructure: 3B2. Measurements direction: fill



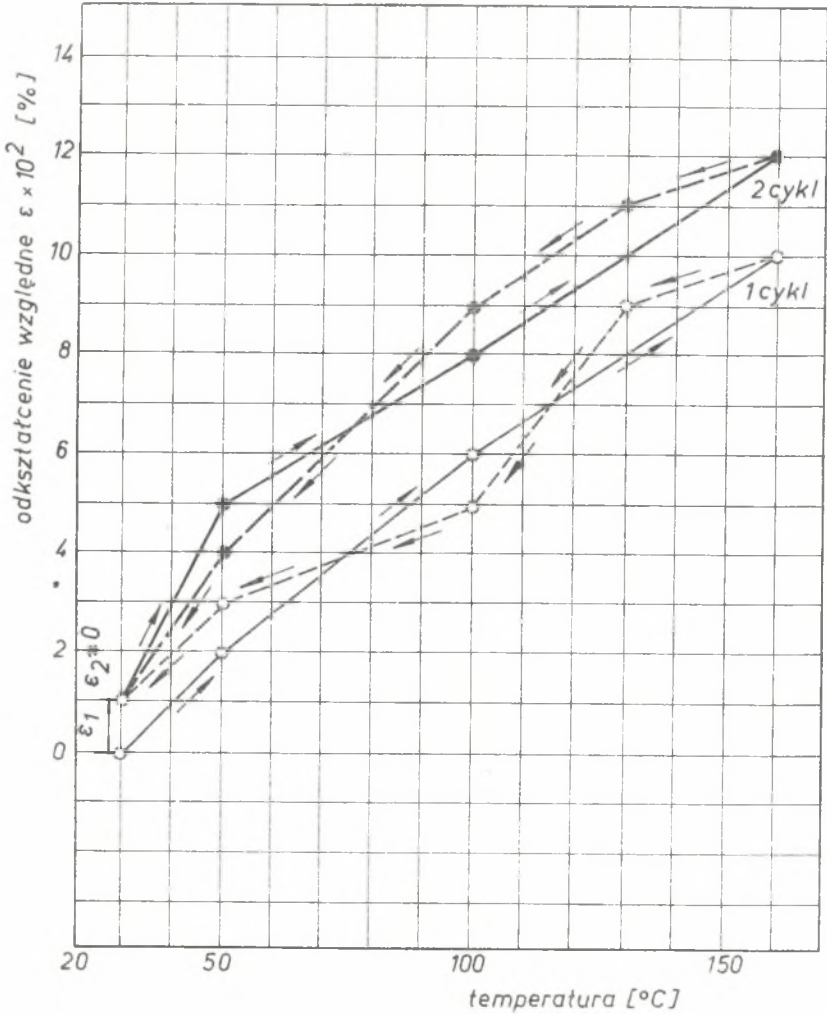
Rys. 37. Odkształcenie względne próbki TWW w funkcji temperatury. Makrostruktura podstawowa: 3B2 (tab. 1). Makrostruktura badania: Ł0-0,5 (warstwa elementarna)

Fig. 37. Plot of the relative strain vs. temperature of the FRP specimen. Basic macrostructure: 3B2 (Table 1) Tested macrostructure: Ł0-0,5 (elementary ply)



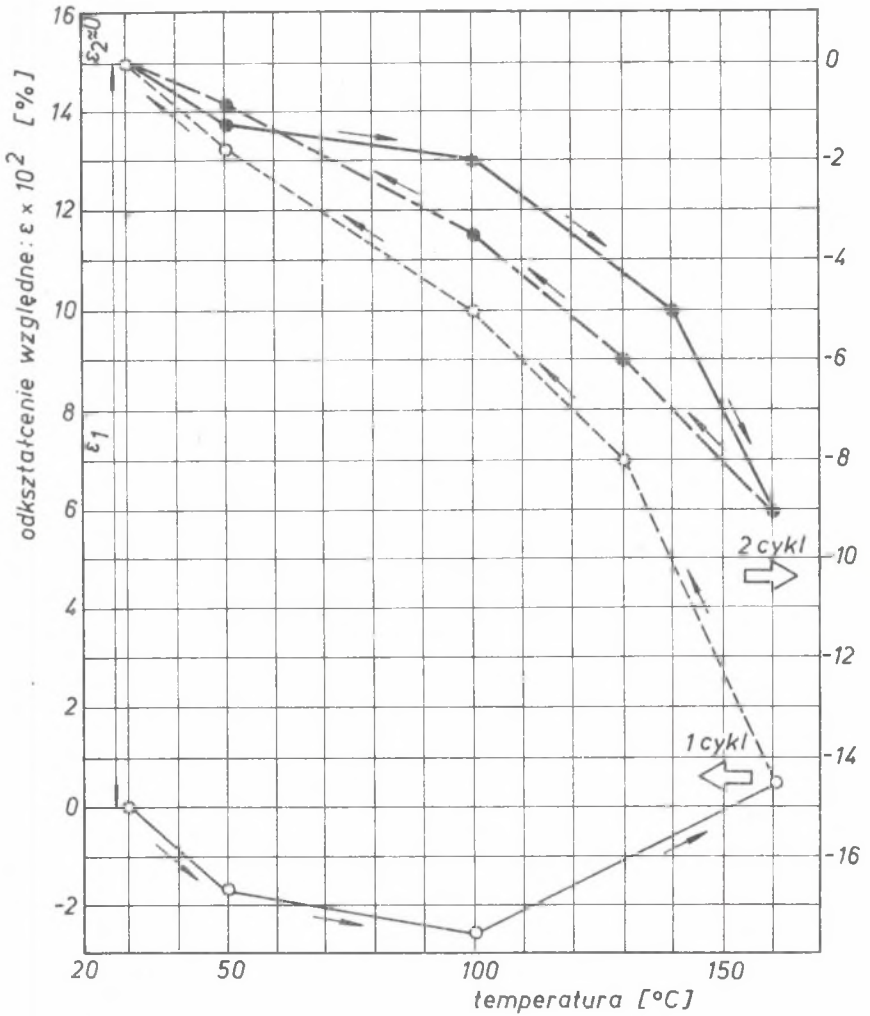
Rys. 38. Odkształcenie względne próbki TWW w funkcji temperatury. Makrostruktura podstawowa: 3B2 (tab. 1). Makrostruktura badana: dwie warstwy elementarne: B2. Kierunek pomiaru odkształcenia: osnowa

Fig. 38. Plot of the relative strain vs. temperature of the FRP specimen. Basic macrostructure: 3B2 (table 1). Tested macrostructure: two elementary plies B2. Measurements direction: warp



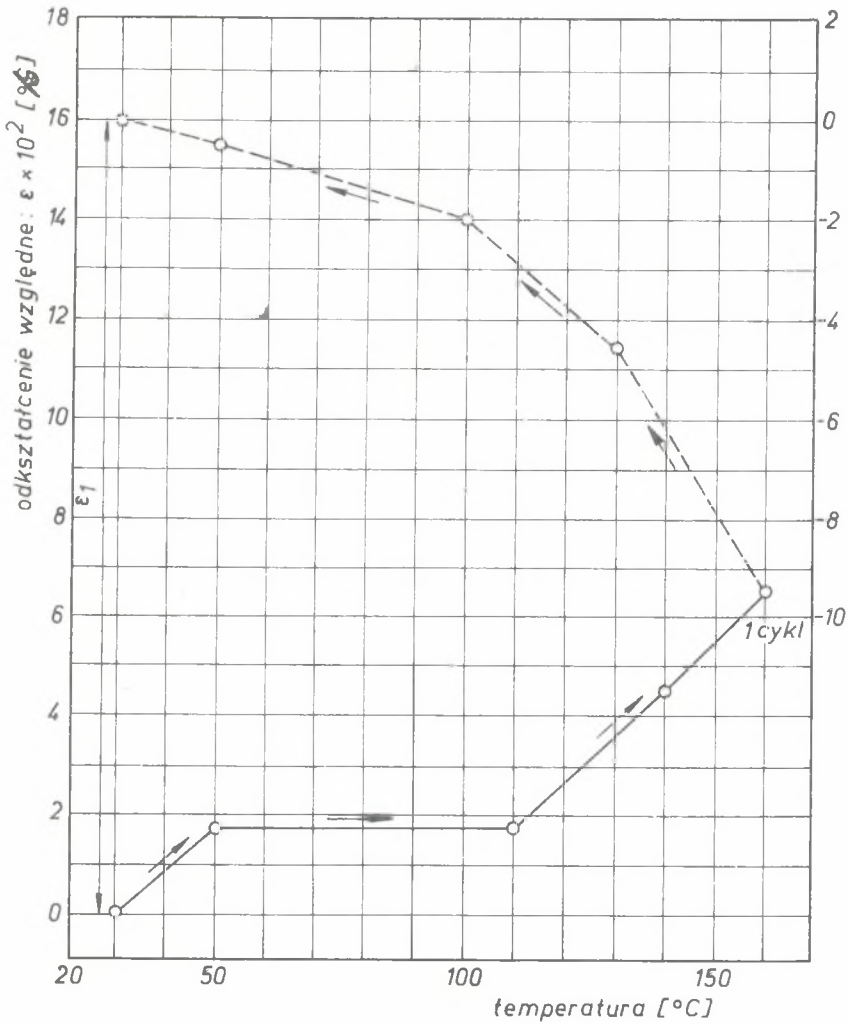
Rys. 39. Odkształcenie względne próbki TWW w funkcji temperatury. Makrostruktura podstawowa: 3B2 (tab. 1). Makrostruktura badana: dwie warstwy elementarne: B2. Kierunek pomiaru odkształcenia: wątek

Fig. 39. Plot of the relative strain vs. temperature of the FRP specimen. Basic macrostructure: 3B2 (table 1). Tested macrostructure: two elementary plies B2. Measurements direction: fill



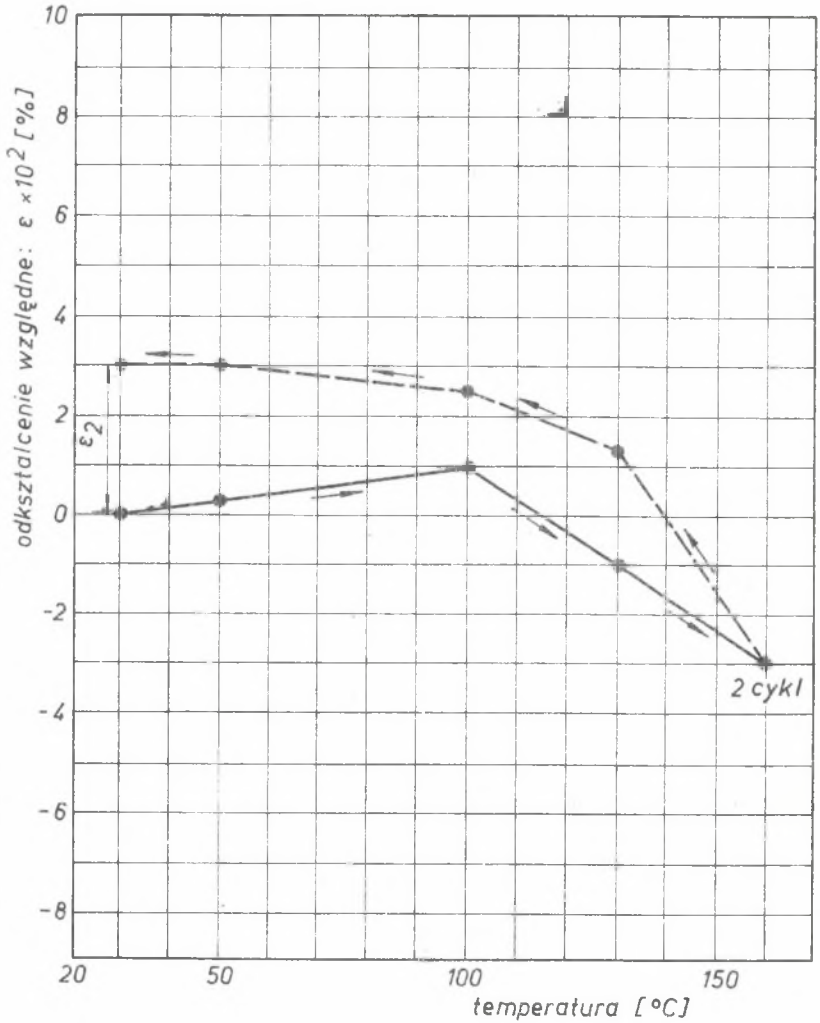
Rys. 40. Odkształcenie względne próbki TWW w funkcji temperatury. Makrostruktura podstawowa: 1C2 (tab. 1). Makrostruktura badana: 1C2. Kierunek pomiaru odkształcenia: osnowa

Fig. 40. Plot of the relative strain vs. temperature of the FRP specimen. Basic macrostructure: 1C2 (Table 1). Tested macrostructure: 1C2. Measurements direction: warp



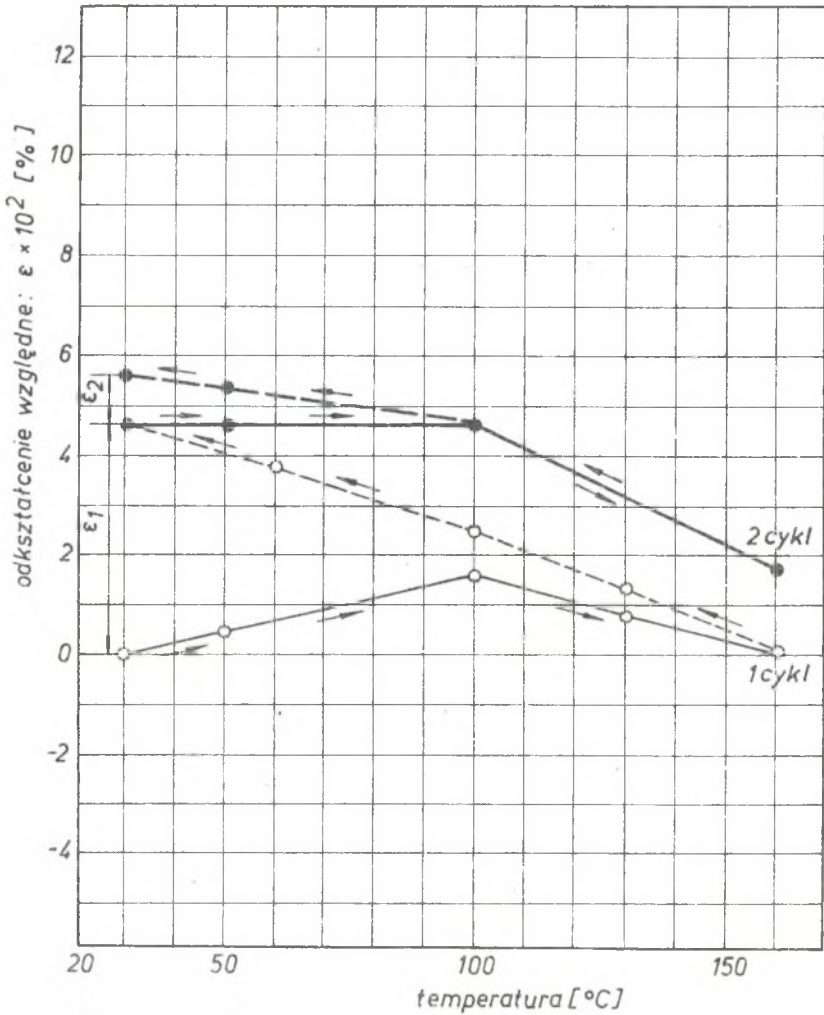
Rys. 41. Odształcenie względne próbki TWW w funkcji temperatury. Makrostruktura podstawowa: 1C2 (tab. 1). Makrostruktura badana: 1C2. Kierunek pomiaru odształcenia: wątek. Pierwszy cykl grzania

Fig. 41. Plot of the relative strain vs. temperature of the FRP specimen. Basic macrostructure: 1C2 (table 1). Tested macrostructure: 1C2. Measurements direction: fill. First heating-cooling cycle



Rys. 42. Odkształcenie względne próbki TWw w funkcji temperatury. Makrostruktura podstawowa: 2C2 (tab. 1). Makrostruktura badana: 1C2. Kierunek pomiaru odkształcenia: wątek. Drugi cykl grzania

Fig. 42. Plot of the relative strain vs. temperature of the FRP specimen. Basic macrostructure: 1C2 (Table 1). Tested macrostructure: 1C2. Measurements direction: fill. Second heating-cooling cycle



Rys. 43. Odkształcenie względne próbki TWW w funkcji temperatury. Makrostruktura podstawowa: ŻWC (4 warstwy tkaniny rovingowej z włókien węglowych - osnowa: ŻE). Makrostruktura badana: jak wyżej. Kierunek pomiaru odkształcenia: osnowa

Fig. 43. Plot of the relative strain vs. temperature of the FRP specimen. Basic macrostructure: CRR - carbon reinforced resin (4 plies roving woven fabrics made from carbon fibers). Tested macrostructure: like basic macrostructure. Measurements direction: warp

gdzie:

L_0 - długość bazy pomiarowej początkowej w temperaturze $T = 30^{\circ}\text{C}$,

L_1 - długość bazy pomiarowej po pierwszym cyklu: grzania - chłodzenia w temperaturze: $T = 30^{\circ}\text{C}$.

Dokładność wyznaczania wartości odkształceń określały możliwości mikroskopu oraz wielkość i stabilność przemieszczenia punktu pomiarowego na powierzchni próbki. Dokładność oceniono na $\Delta\epsilon = \pm 0,005\%$.

Wykresy przedstawiono w formie punktowej. Każdy z oznaczonych punktów jest wartością średnią z pomiarów przeprowadzonych na pięciu próbkach. Rozstęp wyników zawierał się w granicach $\Delta\epsilon = 0,01$ do $0,02\%$.

Dla uzupełnienia programu badań i poszerzenia skali doświadczeń wykonano również badania na próbkach nowych i słabo rozpoznanych pod względem materiałowym makrostruktur wykonanych z tzw. włókien organicznych (makrostruktura: 1C2 - tab. 1) oraz z włókien węglowych. Wymienione makrostruktury są wprowadzane do produkcji nowych wyrobów, których wytwarzanie jest aktualnie w stadium rozruchu. Próbki pobrano z tej fazy produkcji dla uzyskania wstępnych informacji o ich właściwościach termomechanicznych. Wyniki badań dylatometrycznych, zrealizowanych w tych samych warunkach jak próbki ŻWS typu 3B2, przedstawiono na rys. 40 do 43.

B. Badania wartości WLRC

Badania przeprowadzone i opisane w punkcie A uwidoczniły wyraźnie złożoność problemu pomiaru odkształceń makrostruktur TWW oraz ich interpretacji. Zasadniczym wnioskiem - wynikającym z przeprowadzonych badań w punkcie A - jest stwierdzenie o konieczności stabilizacji cieplnej makrostruktur przed realizacją badań WLRC. Informacje o wartościach WLRC są zasadniczymi danymi, umożliwiającymi prowadzenie analiz i obliczeń teoretycznych.

Tabela 6

Wartości WLRC wybranych makrostruktur TWW

Lp.	Oznaczenie makrostruktury (p. tab. 1)	WLRC $\times 10^6$; K^{-1}
1	1 A 1	7,93
2	1 B 1	10,50
3	2 B 2	9,41
4	3 B 2	9,25
5	1 C 2	0

Badania WLRC przeprowadzono na wybranych makrostrukturach i miały schemat czynności identyczny jak w poprzednich badaniach, uzupełniony jednak o czynność poprzedzającą rozpoczęcie badań - mianowicie

- stabilizacja cieplna próbki w temperaturze 150°C, przez okres dwóch godzin.

Wyniki badań WLRC wybranych makrostruktur zestawiono w tabeli 6. W tabeli tej zamieszczono wartości średnie wyników pomiarów na 10 próbkach, wyciętych z tych samych makrostruktur, ale pochodzących z różnych okresów produkcji i różnych wyrobów.

9.4. Obliczenia teoretyczne

Badania przeprowadzone w tym rozdziale obejmują zagadnienia, których zakres okazał się znacznie szerszy, niż przewidywano. Zjawiska towarzyszące kształtowaniu i zestalaniu "na gorąco", których teoretyczne podstawy omówiono w rozdz. 6, okazały się bardzo znaczące i możliwe do ujawnienia i oceny w badaniach eksperymentalnych. Zjawiska te występują w normalnych temperaturach otoczenia, a ich skala znacznie wzrasta w temperaturach zbliżonych lub przekraczających temperatury zeszklenia materiału osnowy T_g . Potwierdza to sens i znaczenie zjawisk reologicznych, zachodzących w materiale osnowy, które omawiano w rozdziale 4.

Stwierdzenia te są niezbędne dla uzasadnienia wstępnego charakteru obliczeń teoretycznych oraz poziomu przeprowadzonej analizy wyników. Przed przystąpieniem do analizy wyników, postanowiono wykonać wstępne, szacunkowe obliczenia teoretyczne dla potwierdzenia i oszacowania skali zjawisk występujących w rozważanych makrostrukturach. Dla uproszczenia obliczeń do rozważań przyjęto wyłącznie makrostruktury symetryczne typu: 1, 2 i 4, (p. tab. 1). Do realizacji obliczeń teoretycznych wykorzystano wzory teoretyczne przedstawione w rozdz. 6.

9.4.1. Wartości szczytkowych naprężeń cieplnych

Schemat obliczeniowy makrostruktury przedstawia rys. 44.

Dane do obliczeń:

warstwy elementarnej "1"

$$E_1 = 20\ 000\ \text{MPa}$$

$$\alpha_1 = 7,5 \cdot 10^{-6}; \quad \text{K}^{-1}$$

$$E_2 = 15\ 000\ \text{MPa}$$

$$\alpha_2 = 9,0 \cdot 10^{-6}; \quad \text{K}^{-1}$$

$$\nu_{12} = 0,25$$

$$h_2 - h_1 = 0,35\ \text{mm} = 35 \cdot 10^{-5}\ \text{m}$$

$$G_{12} = 4\ 500\ \text{MPa}$$

warstwa elementarna "2"

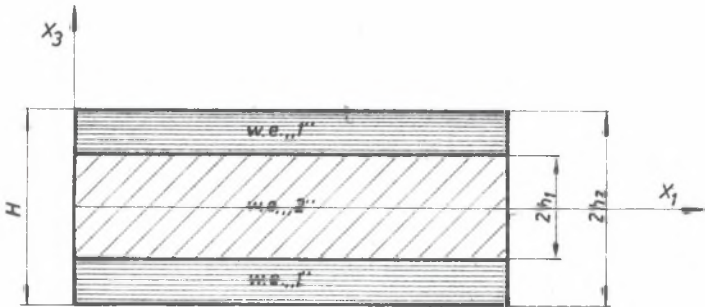
$$E_1 = E_2 = 4\ 000\ \text{MPa}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 13,5 \cdot 10^{-6};\ \text{K}^{-1}$$

$$G_{12} = 1\ 800\ \text{MPa}$$

$$h_1 = 0,35\ \text{mm} = 35 \cdot 10^{-5}\ \text{m}$$

$$\nu_{12} = 0,4$$



Rys. 44. Schemat obliczeniowy makrostruktury symetrycznej
Fig. 44. Schematic of symmetrical macrostructure used in calculation

Obliczenia

1. Macierze sprężystości i podatności warstw elementarnych warstwy elementarnej "1":

$$[\bar{c}^0]_{(1)} = \begin{bmatrix} 20984 & 3934,5 & 0 \\ 3934,5 & 15740 & 0 \\ 0 & 0 & 4500 \end{bmatrix};\ \text{MPa}$$

$$[\bar{s}^0]_{(1)} = [\bar{c}^0]_{(1)}^{-1} = \begin{bmatrix} 49 & -10 & 0 \\ -10 & 66 & 0 \\ 0 & 0 & 222 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6};\ \text{MPa}^{-1}$$

$$[\bar{c}^0]_{(2)} = \begin{bmatrix} 4762 & 1905 & 0 \\ 1905 & 4762 & 0 \\ 0 & 0 & 1800 \end{bmatrix};\ \text{MPa}$$

$$[\bar{s}^0]_{(2)} = [\bar{c}^0]_{(2)}^{-1} = \begin{bmatrix} 250 & -100 & 0 \\ -100 & 250 & 0 \\ 0 & 0 & 555 \end{bmatrix} \cdot 10^{-6};\ \text{MPa}^{-1}$$

2. Macierze sprężystości i podatności makrostruktury

$$[\bar{A}] = \begin{bmatrix} 18,022 & 4,087 & 0 \\ 4,087 & 14,351 & 0 \\ 0 & 0 & 4,41 \end{bmatrix}; \text{MPa}$$

$$[\bar{S}_1] = [\bar{A}]^{-1} = \begin{bmatrix} 59,318 & -16,89 & 0 \\ -16,89 & 74,492 & 0 \\ 0 & 0 & 226,76 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}; \text{MPa}^{-1}$$

3. Siły termiczne N^T :

$$\frac{\{N^T\}}{\Delta T} = \begin{Bmatrix} 197,953 \\ 182,818 \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot 10^{-6}; \text{MN.m}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1}$$

4. Odkształcalność cieplna makrostruktury

$$\{\bar{\alpha}\} = \frac{\{\epsilon^0\}}{\Delta T} = \begin{Bmatrix} 8,654 \\ 10,275 \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot 10^{-6}; \text{K}^{-1}$$

5. Odkształcenie szcztatkowe w warstwach elementarnych:

$$\frac{\{\epsilon_s\}^{(k)}}{\Delta T} = \{\bar{\alpha}\} - \{\alpha\}^{(k)}$$

warstwa elementarna "1":

$$\frac{\{\epsilon_s\}^{(1)}}{\Delta T} = \begin{Bmatrix} 1,154 \\ 1,275 \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot 10^{-6}; \text{K}^{-1}$$

warstwa elementarna "2":

$$\frac{\{\epsilon_s\}^{(2)}}{\Delta T} = \begin{Bmatrix} -4,846 \\ -3,225 \\ 0 \end{Bmatrix} \cdot 10^{-6}; \text{K}^{-1}$$

6. Napężenia szcztatkowe w warstwach elementarnych:

$$\{\sigma_s\}^{(1)} = \begin{Bmatrix} 0,292 \\ 0,0246 \\ 0 \end{Bmatrix}; \text{MPa.deg}^{-1}$$

$$\{\sigma_s\}^{(2)} = \begin{Bmatrix} -0,0292 \\ -0,0246 \\ 0 \end{Bmatrix}; \text{MPa.deg}^{-1}$$

Przyjmując $\Delta T = -140 \text{ deg}$

$$\{\epsilon_s\}^{(1)} = \begin{Bmatrix} -0,016 \\ -0,018 \\ 0 \end{Bmatrix}; \%$$

$$\{\epsilon_s\}^{(2)} = \begin{Bmatrix} +0,068 \\ +0,045 \\ 0 \end{Bmatrix}; \%$$

$$\{\sigma_s\}^{(1)} = -\{\sigma_s\}^{(2)} = \begin{Bmatrix} -4,088 \\ -3,444 \\ 0 \end{Bmatrix}; \text{MPa.}$$

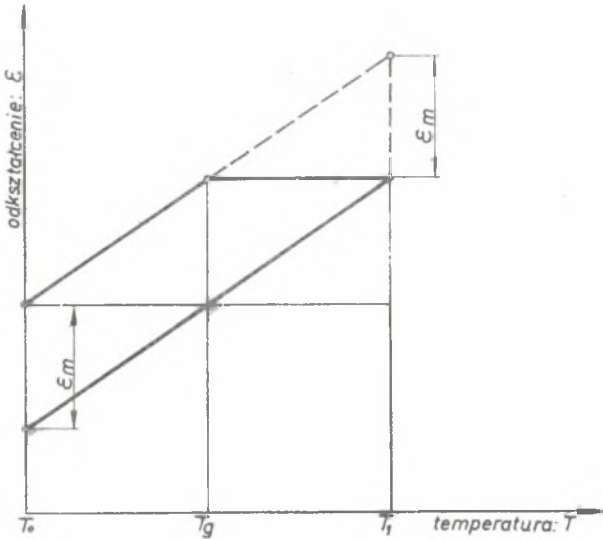
Znacznie trudniejszym zagadnieniem jest analiza i interpretacja wyników uzyskanych z badań, które zamieszczono w postaci wykresów na rys. 35 do 43. Zjawiska, które uwiłdoczyły przeprowadzone badania, mają niewątpliwie swoje źródło w reologicznych cechach mikrostruktury.

9,4.2. Wartości "zamrożonego" odkształcenia osnowy

Teza postawiona w pracy przypisuje znaczący udział w zachodzących zjawiskach materiału osnowy, której charakterystyki reologiczne omówiono w rozdziale 4.1. Ocenę ilościową obserwowanych zjawisk utrudnia jednak brak opracowanych i potwierdzonych podstaw teoretycznych. Z tych względów przyjęto konieczność wykonania zgrubnej oceny wartości "zamrożonego" odkształcenia materiału osnowy. Do obliczeń przyjęto uproszczony schemat odkształcenia cieplnego makrostruktury, który przedstawiono na rys. 45. Wykres przedstawiony na rys. 45, pozwala na przyjęcie następujących założeń:

- po przekroczeniu temperatury zeszklenia T_g , materiał osnowy uzyskuje możliwość zmiany swojej objętości właściwej i dąży do stanu równowagi;

- zmiana objętości właściwej materiału osnowy oznacza wyzwolenie jednostkowej energii odkształcenia L_0 , która powoduje zmianę odkształcenia makrostruktury, określoną przez wartość jej energii sprężystego odkształcenia L_m .



Rys. 45. Uproszczony wykres dylatometryczny, ilustrujący występowanie "zamrożonych" odkształceń makrostruktury:

ϵ_m - odkształcenie "zamrożone" w cyklu zestalania makrostruktury, T_0 , T_1 - - temperatury odpowiednio: początkowa i końcowa badań dylatometrycznych

Fig. 45. Simplificated dilatometric plot illustrating presence of "frozen" strains in FRP macrostructure

ϵ_m - "frozen" strains in the solidification cycle of the structure, T_0 , T_1 - temperatures at the beginning and end of the dilatometric measurements

Przyjmując wymienione założenia, można napisać:

$$L_0 = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0^2 \cdot E_0 ; \text{ N.m/m}^3 , \quad (50)$$

$$L_m = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_m^2 \cdot E_m ; \text{ N.m/m}^3 . \quad (51)$$

jeżeli:

$$L_0 = L_m , \quad \text{to} \quad \epsilon_0 = \epsilon_m \cdot \left[\frac{E_m}{E_0} \right]^{\frac{1}{2}} , \quad (52)$$

gdzie:

L_o, L_m - odpowiednio, energia odkształcenia materiału osnowy i makrostruktury,

E_o, E_m - odpowiednio, moduły sprężystości materiału osnowy i makrostruktury,

ϵ_o, ϵ_m - odpowiednio, odkształcenia osnowy i makrostruktury.

Przyjmując wartości:

$$E_o = 100 \text{ MPa} ; E_m = 6 \text{ 000 MPa} ; \epsilon_m = 0,05\%$$

to wartość "zamrożonego" odkształcenia materiału osnowy wynosi

$$\epsilon_o = 0,387\%$$

9.4.3. Ocena wyników obliczeń teoretycznych

Przeprowadzone obliczenia teoretyczne, mimo oczywistych, znacznych uproszczeń, potwierdzają słuszność przyjętych tez pracy oraz możliwości przewidywania skutków zjawisk występujących w operacji zestalania wyrobów już na etapie projektowania makrostruktury TWW.

Oszacowany obliczeniowo przy znacznych uproszczeniach rząd wartości i odkształceń szczytkowych jest zgodny swoim poziomem z wynikami uzyskiwanymi w zrealizowanych badaniach doświadczalnych.

Idealizowany (uproszczony) wykres dylatometryczny odkształcenia makrostruktury TWW, przedstawiony na rys. 45, umożliwił szacunkową ocenę wartości "zamrożonych" odkształceń materiału osnowy. Rząd wartości uzyskanych z uproszczonych obliczeń jest zgodny swoim poziomem z wynikami badań dylatometrycznych typowych materiałów osnowy, zamieszczonymi w literaturze [26]. (p. rozdz. 4.1 - rys. 6).

Nie można jednak stwierdzić autorytatywnie, że przeprowadzone obliczenia są wystarczająco dokładne i ilustrują przebieg rzeczywistych zjawisk w makrostrukturze. Ich wyniki uzasadniają jednak potrzebę i sens rozwijania obliczeń teoretycznych i uzyskiwania rzetelnych wyników. Podstawowym warunkiem rzetelności obliczeń pozostaje niezmiennie posiadanie konkretnych informacji o właściwościach składników mikro- i makrostruktury.

9.5. Ogólna ocena wyników badań naprężeń cieplnych

Badania przeprowadzone w tym rozdziale mają charakter rozpoznawczy. Trudności interpretacyjne, spowodowane dużą ilością czynników zakłócających, pozwalają jednak na wstępną, jakościową ocenę zjawisk i ustalenie przyszłościowego programu bardziej precyzyjnych badań.

Szczególnie ważnym i trudnym czynnikiem w rozpoznaniu jest ustalenie dokładnego przebiegu operacji kształtowania i zestalania wyrobu. Zjawiska

obserwowane w zrealizowanych badaniach są w dużym stopniu odbiciem przebiegu tej operacji technologicznej.

Wpływ rozkładu i wartości ciśnienia kształtowania na wynik procesu wytwarzania oraz zjawiska termomechaniczne w makrostrukturze, nie rozważany w niniejszej pracy, jest niewątpliwie bardzo istotny. Świadczą o tym obserwowane odkształcenia makrostruktury i warstw elementarnych na grubości makrostruktury.

Warunkiem realizacji i powodzenia dalszych prac badawczych jest uściślenie warunków wytwarzania próbek "świadków", które pozwoli na zawężenie i konkretyzację oddziaływania poszczególnych **czynników konstrukcyjnych i technologicznych**. Wyniki uzyskane z badań takich precyzyjnych próbek pozwolą na ocenę podstaw teoretycznych i ich modyfikację oraz ustalenie i korektę ścisłych warunków i parametrów **technologicznych**.

10. UWAGI OGÓLNE I WNIOSKI KOŃCOWE

Problemy i zagadnienia, które podjęto do rozwiązania w niniejszej pracy potwierdzają znaną technikom, ogólną prawidłowość, że jakość wyrobu, to złożony kompleks czynników: materiałowych, konstrukcyjnych i technologicznych. Uzyskanie wysokiej jakości wyrobów, przy zachowaniu ich technicznej i ekonomicznej opłacalności, to wynik szczegółowych, kosztownych badań o charakterze podstawowym, których wyniki dają gwarancję wyboru właściwych materiałów i stosowania optymalnych parametrów konstrukcyjnych i technologicznych.

Tworzywa wzmocnione włóknami należą do tych nowoczesnych materiałów, które powyższe stwierdzenie potwierdzają z dużą wyrazistością. Z tych względów przyjęty cel i zakres pracy nie mogły zakładać rozwiązania konkretnych problemów produkcyjnych, ale jedynie je uwiocznnić i uzasadnić, powołując się na wyniki badań makrostruktur wytwarzanych na skalę produkcyjną. Takie uzasadnienie jest podstawą przyjętego zakresu zagadnień oraz podstawowych tez pracy. Niektóre z nich są znane z licznych opracowań, głównie zagranicznych, a przeprowadzone badania i analizy jedynie potwierdziły ich ważność i aktualność w warunkach krajowych. Ich postawienie i uzasadnienie powinno stanowić źródło praktycznych wskazówek technicznych oraz oceny skali trudności i kosztów podejmowania decyzji o uruchomieniu produkcji wyrobów z TWW.

Szczegółowa analiza poszczególnych zagadnień rozważanych w pracy została przedstawiona w zakończeniach poszczególnych rozdziałów. Tam zamieszczono również konkretne wnioski i stwierdzenia, oceniające jakość makrostruktur.

Na tej podstawie można sformułować kilka wniosków o charakterze ogólnym:

1. Projektowanie makrostruktur wyrobów z TWW musi uwzględniać zarówno możliwości konstrukcyjne materiału, jak również realne możliwości technologiczne i poziom technik wytwarzania.
2. Należy bezwzględnie ustalić normatywne zalecenia z zakresu technologiczności konstrukcji wyrobów z TWW, uwzględniające istotne zjawiska zachodzące w procesie kształtowania i zestalania.
3. Opracowania wymagają ścisłe normy badania i kontroli jakości wyrobów z TWW, uwzględniające typowe wady technologiczne makro- i mikrostruktury.

4. Ocena jakości makrostruktury na podstawie typowych dla materiałów izotropowych prób stycznego rozciągania i zginania nie ujawnia rzeczywistych właściwości i możliwości konstrukcyjnych TWW.
5. Występujące, jako skutek procesu technologicznego utwardzania "na gorąco", wartości naprężeń własnych na poziomach mikro- i makrostruktury, nie mogą być lekceważone lub pomijane przy opracowaniu projektów konstrukcyjnych wyrobów oraz parametrów procesu technologicznego wytwarzania.
6. Szczegółowej kontroli wymaga operacja tworzenia makrostruktury, ponieważ jej wynik stanowi istotny czynnik wpływający na jakość produkowanych wyrobów.
7. Zmiany konstrukcyjne i materiałowe makrostruktur TWW muszą wyprzedzić wnikliwe badania o charakterze podstawowym, szczególnie z zakresu właściwości reologicznych materiału osnowy (ZS).
8. TWW, jako materiały o dużym znaczeniu dla produkcji nowoczesnych konstrukcji lotniczych, posiadają niewątpliwie duże rezerwy możliwości konstrukcyjnych, których uwolnienie jest w ścisłym związku z podnoszeniem poziomu techniki wytwarzania wyrobów oraz skutecznych sposobów kontroli i oceny ich jakości.

LITERATURA

- [1] Karoll C.Z. Porczyński: Advanced Materials. Astex Publishing Company LTD. Guildford, 1962.
- [2] Biuletyn Informacyjny. Kompozyty w produkcji samolotów. opr. MOINTIE. WSK - PZL Mielec, 1986.
- [3] Bryan R., Noton: Primienienie kompozycyjnych materiałów w technice. Maszynostrojenie. Moskwa, 1978. (tłum. z jęz. angielski.).
- [4] Rosato D.V., Grove C.S.: Namotka stieklonitiu. Maszynostrojenie. Moskwa, 1969 (tłum. z jęz. angielski.).
- [5] ASTM D. 2291 - 67. Fabrication of Ring Test Specimens for Reinforced Plastics.
- [6] Lubin G.: Sprawocznik po kompozycyjnym materiałom. Maszynostrojenie, Moskwa 1988 (tłum. z jęz. angielski.).
- [7] Kłosowska Z., Królikowski W., Penczek P.: Żywice i laminaty poliestrowe, WNT Warszawa 1987.
- [8] Cypljakow O.G.: Osnovy formowania stiekloplastikowych obołoczok. Maszynostrojenie, Leningrad, 1968.
- [9] Krywult B., Dul J.: Polimerowe kompozyty włókniste - wybrane problemy wytwarzania w przemyśle lotniczym. Inżynieria Materiałowa, 1988, nr 3, ss. 69-73.
- [10] Krywult B.: Tworzywa wzmacnione włóknami - możliwości teoretyczne a praktyka wytwarzania. Przegląd Mechaniczny, 1989, nr 1, ss. 14-16 i 26-26.
- [11] Rogiński S.L., Konowicz M.Z., Kołtunow M.A.: Wysokoproczyne stiekloplastiki, Chimia, Moskwa, 1979.
- [12] Wilczyński A.: Własności mechaniczne polimerowych kompozytów włóknistych. Przegląd Mechaniczny, 1985, nr 1 ss. 5-8, nr 2, ss. 13-16, nr 3, ss. 12-15, nr 4, ss. 15-17 i 24-36.
- [13] Corten H.T.: Razruszenie armirowannych plastikow. Chimia, Moskwa, 1967 (tłum. z jęz. angielski.).
- [14] Malmejster A.A.; Mechanika kompozycyjnych materiałów, nr 5, 1983, ss. 889-894.
- [15] Sendecikij G.P.: Mechanika kompozycyjnych materiałów. Mir, Moskwa, 1978 (tłum. z jęz. angielski.).
- [16] Mc Cullough R.L., Concepts of Fiber - Resin Composites. Marcell Dekker Inc., New York, 1971.
- [17] Praca zbiorowa: Metody i sriedstwa diagnostyki niesuszczcej sposobnosti izdielija iz kompozitow. Zinatnije, Ryga, 1983 (wydawnictwo cykliczne).
- [18] Tarnopolski Ju.M.: Merody staticzeskich ispytanij armirowannych stiekloplastikow. Zinatnije, Ryga, 1972.
- [19] Taprogge R.: Konstruieren mit Kunststoffe. VDI - Verlag GMBH, Düsseldorf, 1971.
- [20] Haferkamp H.: Glasfaserverstärkte Kunststoffe. VDI - Verlag GMBH. Düsseldorf, 1970.
- [21] Hancox N.L.: Fibre Composite Hybrid Materials, Applied Science Publishers, London, 1981.

- [22] Katalog firmy KREMPEL & Sons, Faserverstärkte Kunststoffe, Stuttgart, 1988.
- [23] Krywult B.: Polimerowe kompozyty włókniste - struktura, właściwości, projektowanie, wyd. ODOK SIMP, Rzeszów, 1988 (monografia).
- [24] Brojer Z., Hertz Z., Penczek P.: Żywice epoksydowe, WNT, Warszawa, 1972.
- [25] Irzak W.I., Rosenberg B.A., Enikolian N.S.: Sietczatyje polimery - - sintez, struktura, swojstwa, Nauka, 1979.
- [26] Czernin I.Z., Smiechow F.M., Żerdiew Ju.W.: Epoksydnyje polimery i kompzcii, Chimia, Moskwa, 1982.
- [27] Winogradowa L.M. i inni: Adgezija i wnutriennyje naprżazenia w polimerach, Wysokomolekularnyje sojedinenia, 1970, nr 2, seria A, t. 12, ss. 348-352.
- [28] Kamieniew E.J., Miasnikow G.D., Płatonow M.P.: Primienienie płaścizskich mass, Chimia, 1985.
- [29] N. van LOO, Aspect economique des thermoplastiques renforces de fibres continues, Composites, 1988, nr 2, ss. 29-33.
- [30] Rabek J.F.: Eksperimental Methods in Polymer Chemistry. A Wiley - Interscience Publication, Chichester - New York - Brisbane - Toronto, 1980.
- [31] Ferry J.D.: Lepkosprężystość polimerów, WNT, Warszawa, 1972.
- [32] Barteniew G.M., Zeleniew Ju.W.: Fizyka i mechanika polimerow, Moskwa, Wyższaja Szkoła, 1983.
- [33] Rastiaszwili W.G., Irzak W.I., Rozenberg B.A.: Stieklowanie polimerów, Chimia, 1987.
- [34] Perepeczko I.I.: Wwiedzenie w fizyku polimerow, Chimia, 1978.
- [35] Vishu Shah; Handbook of Plastics Testing Technology. John Wiley and Sons, New York, 1984.
- [36] Urżumcew Ju. S., Maksimow R.D.: Prognostryka deformatiwnosti polimernych materialow, Zinatnije, Ryga, 1975.
- [37] Ward J.M.: Mechaniczne własności polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych. PWN, Warszawa, 1975.
- [38] Wilczyński A.P.: Mechanika polimerów w praktyce konstrukcyjnej. WNT, Warszawa, 1975.
- [39] Zener C.M.: Elasticity and Anelasticity of Metals, Chap. 5, Chicago Univ., Chicago Press, 1948.
- [40] Becker R., Neuman G.: Vorausberechnung von Glastemperaturen bei Polyurethan, Plaste und Kautschuk, 1973, Bd 20, nr 11, ss. 809-815.
- [41] Ustinowa A.M., Olejnikowa E.B.: Epoksidnyje swiazujuszczije dla organoplastikow. Płaścizszkije massa, 1983, nr 8, ss. 61-62.
- [42] Dzene C.Ja., Rektinysz M.F.: Objemnyje deformacii polimernych smol w usłowjach kratkowremiennoj pożuczestii. Mechanika kompozicijnych meteriałow, 1986, nr 6, ss. 1114-1117.
- [43] Artamonowa R.W. i inni: Opriedielenije wnutriennyh naprżazienij w polimerach, Płastmassy, 1971, nr 8, ss. 69-70.
- [44] Bowden P.B.: The physics of glassy polymers. London, 1973.
- [45] Olejnik E.F. i inni: Wlįjanije usłowij obrazowania polimera na temperaturu jego stieklowania, Chimizszkaja Fizyka, 1984, nr 3, ss. 885-894.
- [46] Artamanowa R.W. i inni: Issledowanie wnutriennyh naprżazienij w otwierzdziennyh plenocznych klejach, Wiestnik maszinostrojenia, 1978, nr 5, ss. 61-63.
- [47] Olejnik E.F.: Glassy polymers as matrices for advanced composites, Polymer Journal, 1987, Vol. 19, ss. 105-117.

- [48] Godowskij Ju.K.: Tjeflofizyčeskie metody issledowanija polimerow, Mir, Moskwa, 1976.
- [49] Maniewicz L.I. i inni: O kwazichrupkom razruszenii stieklóobraznyh polimerow, *Mechanika polimerow*, 1978, nr 5, ss. 860-865.
- [50] Beer E.: Osnovy konstruirowania izdijelij iz plástmass, *Maszinostrojenje*, Moskwa, 1970, (tłum. z jęz. angieli.).
- [51] Plueddemann E.P.: Powierchnostii razdieła w polimernych kompozitach, Mir, Moskwa, 1978 (tłum. z jęz. angieli.).
- [52] Praca zbiorowa pod red. Ju. M. Małczanowa; Fizyčeskie i mechaniczeskie swojstwa stieklóplástikow, Zinatnije, Ryga, 1969.
- [53] Pritchard G.: *Developments in Reinforced Plastics - 5*. Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 1986,
- [54] Richardson M.O.W.: *Polymer Engineering Composites*. Applied Science Publishers LTD, London, 1977.
- [55] Praca zbiorowa: Konstrukcionnyje swojstwa plástmass, *Maszinostrojenje*, Moskwa, 1968.
- [56] Lubutin O.G.: Awtomatizacia proizvodstwa stieklóplástikow, *Chimia*, Moskwa, 1969.
- [57] Alfutow N.A., Zinowiew P.A., Propow W.G.: Razzčet mnogosłojnyh plástin i obołoczok iz kompozicionnyh materialów, *Maszinostrojenje*, Moskwa, 1984.
- [58] Krywult B.: Naprężenia cieplne w złożonych strukturach TWW, *Mat. konf. SIMPLAST 88*, Kozubnik, 1988.
- [59] Derek Hull: *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge University Press. 1988.
- [60] Schneider W.: Wärmeausdehnungskoeffizienten und Wärmespannungen von/Glasfaser/Kunststoff - Verbunden aus unidirectionalen Schichten. *Kunststoffe*. 1971, Bd 61, nr 4, ss. 273-277.
- [61] Schneider W.: Wärmeausdehnungskoeffizienten und Wärmespannungen von Glasfaser/Kunststoff - Verbunden aus unidirectionalen Schichten, *Kunststoffe*, 1973 Bd 63, nr 12, ss. 929-933.
- [62] Praca zbiorowa: Nieuprugije swojstwa kompozicionnyh materialów. Mir, Moskwa, 1978, (tłum. z jęz. angieli.).
- [63] Hahn H.T., Pagano N.J.: Curing Stresses in Composite Laminates, *Journal of Composite Materials*. Vol. 9, 1975, ss. 91-106.
- [64] Malmejster A.K., Tamuż W.P., Teters G.A.: Soprotiwlenije žestkich polimernych materialów. Zinatnije, Ryga, 1972.
- [65] Sigorski W.P.: Matematyčeskij aparat inżyniera. *Technika*, Kijew, 1977.
- [66] Krywult B.: Badania wpływu niektórych parametrów technologicznych na własności mechaniczne laminatów, Praca doktorska, Gliwice 1972.
- [67] Bursa J., Krywult B., Walezak K.: Metody wytwarzania profili i rur z laminatów poliestrowo-szklanych. Konferencja "Dni Nauki i Techniki Polskiej", Sofia, Bułgaria, 1974.
- [68] Krywult B., Skubisz L.: Ausgewählte konstruktive und technologische Probleme bei der Anwendung von leichten Platten aus FVP. Konferencja "VERSTÄRKTE PLASTE 80". Drezno, NRD, 1980.
- [69] Krywult B.: Technologiczne problemy wytwarzania półwyrobów z materiałów wzmocnionych włóknami ciągłymi. *Magazyn Technologia Przemysłu Lotniczego i Silnikowego*. 1980, nr 1, ss. 10-11.
- [70] Krywult B.: Zastosowanie klejów epoksydowych do wytwarzania kompozytów: Al - włókna stalowe. *Magazyn Technologia Przemysłu Lotniczego i Silnikowego*. 1980, nr 1, ss. 12-13.
- [71] Krywult B.: Własności klejonych kompozytów: Al - włókna stalowe, *Mechanik*, 1982, nr 2, ss. 95-96.

- [72] Krywult B.: Struktura i właściwości TWW - teoria i praktyka stosowania i wytwarzania. Mat. konf. SIMPLAST 88. Kozubnik, 1988.
- [73] ASTM D. 2733-68T, Interlaminar Shear Strength of Structural Reinforced Plastics at Elevated Temperatures.
- [74] ASTM D. 2290-64T, Split Disc Ring Tensile Strength.
- [75] ASTM D. 2344-67, Short Beam Interlaminar Shear Strength.
- [76] ASTM D. 638-68, Tensile Properties of Plastics.
- [77] BS 3691: 1969, Glass Fibre Roving for the Reinforcement of Polyester and Epoxide Resin Systems.
- [78] ASTM D. 790-71. Flexural Properties of Plastics.
- [79] Haferkamp H.: Gütesicherung und Qualitätskontrolle bei glasfaserstärkten Kunststoffen. Bd 58, H. 12, 1968, ss. 801-806.
- [80] PN-81/C-89034, Oznaczenie cech wytrzymałościowych przy statycznym rozciąganiu.
- [81] PN-79/C-89027, Oznaczenie cech wytrzymałościowych przy statecznym zginaniu.
- [82] PN-82, C-89051. Oznaczenie modułu sprężystości przy rozciąganiu, ścisnieniu i zginaniu.
- [83] Królikowski W.: Abhängigkeit der Lichtdurchlässigkeit glasfaserverstärkter Polyester von der Zugspannung. Plaste und Kautschuk. H. 11, 1967, ss. 825-827.
- [84] Puck A.: Zum Deformationsverhalten und Bruchmechanismus von unidirektionalen und orthogonalen Glasfaser/Kunststoff, Kunststoffe. Bd. 55, H. 12, 1955, ss. 918-922.
- [85] Puck A.: Das "Knie" im Spannungs - Dehnungs - Diagramm und Rißbildung bei Glasfaser/Kunststoffen. Kunststoffe. Bd. 58, H. 12, 1968, ss. 886-893.
- [86] Hahn H.T.: Residual Stresses in Polymer Matrix Composite Materials, Vol. 10, 1976, ss. 266-274.
- [87] Takashi Ishikawa; Masamichi Matsushima, Youichi Hayashi, Tsu - Wei Chou, Experimental Confirmation of the Theory of Elastic Moduli of Fabric Composites, Journal of Composite Materials, Vol. 19, September, 1985, ss. 354-365.
- [88] Stanton E.L., Mack T.E.: A Case Study of Cure Cycle Shrinkage Deformations, Journal of Engineering for Industry, February, 1987, ss. 46-48.
- [89] Briwmanis P.E.: Eksperymentalnyje opriedelenije ostatocznych napriazhenij pri namotkie odnonaprawlennykh stiekioplastikow. Mechanika polimerow, nr 1, 1966, ss. 123-129.
- [90] PN-76/C-89005, Tworzywa sztuczne. Oznaczenie skurczu termicznego kształtek termoplastycznych.
- [91] PN-79/C-89000. Tworzywa sztuczne. Znormalizowane warunki otoczenia dla klimatyzacji i badania próbek.
- [92] ASTM D. 696, Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics.
- [93] ASTM D. 864, Coefficient of Cubical Expansion of Plastics.

WYBRANE ZAGADNIENIA KSZTAŁTOWANIA I JAKOŚCI ZŁOŻONYCH MAKROSTRUKTUR
Z ŻYWIC WZMOCNIONYCH WŁÓKNAMI (ŻWW)

S t r e s z c z e n i e

Przedmiotem pracy są nowoczesne struktury konstrukcyjne, wytwarzane z żywic wzmocnionych włóknami (ŻWW), stosowane w przemyśle lotniczym. W pracy zestawiono wybrane podstawowe informacje o wpływie właściwości żywic syntetycznych i włókien wzmacniających na jakość wyrobów wytwarzanych w operacji utwardzania "na gorąco". Zależności teoretyczne porównano z wynikami badań eksperymentalnych publikowanych w literaturze.

W pracy przedstawiono analizę wyników badań właściwości mechanicznych próbek makrostruktur z ŻWW przeprowadzonych zgodnie z warunkami technicznymi odbioru jakościowego wyrobów. Powierzchnie próbek poddano badaniom mikroskopowym dla rozpoznania charakterystycznych obszarów pękania próbek oraz typowych wad strukturalnych i technologicznych.

Przeprowadzono badania rozszerzalności cieplnej wybranych makrostruktur ŻWW, przy użyciu dylatometu własnej konstrukcji. Przebadano wpływ dodatkowych cykli ogrzewania - chłodzenia na wielkość pętli histerezy odkształcenia próbek. Wyniki tych badań poddano oszacowaniu teoretycznemu. Zaproponowano teoretyczny model wyjaśniający zjawisko histerezy pomiarów rozszerzalności cieplnej makrostruktur ŻWW.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ И КАЧЕСТВА МАКРОСТРУКТУР
ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СМОЛ АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНАМИ (ССАВ)

Р е з ю м е

Главным предметом предлагаемой работы являются новые конструкционные структуры изготавливаемые из синтетических смол армированных волокнами, применяемые в авиационной промышленности.

В литературной части работы составлено информации об влиянии свойств синтетических смол и армирующих волокон на качество изделий после операции отверждения. Теоретические предсказания сравнено с экспериментальными данными опубликованными в технической литературе.

В дальнейшей части работы составлено результаты и анализ механических испытаний согласно техническим условиям приема образцов из ССАВ. В цели изучения морфологии областей разрушения и типических дефектов структуры проведено микроскопические исследования поверхности образцов из ССАВ.

Исследования линейного термического расширения образцов из ССАВ проведено используя дилатометер оригинальной конструкции. Проверено влияние вторичного нагрева отвержденных образцов ССАВ на гистерез цикла: нагрев-охлаждение. Результаты этих исследований сравнено с результатами теоретических исчислений. Представлено модель разсветляющий явление гистереза термического линейного расширения.

SELECTED PROBLEMS OF THE MANUFACTURING
AND THE QUALITY OF FIBER REINFORCED RESINS (FRR)

S u m m a r y

The subject of this work are new engineering structures manufactured from fiber reinforced resins (FRR) used in aircraft industry. Relevant new informations regarding the effects of resin and fiber properties on a final quality of the product after the heating-cooling cure cycle are presented. Theoretical predictions are compared with experimental data available in the literature.

The results of mechanical testing of FRR specimens according to technical receiving conditions are presented and analyzed. The planes of FRR specimen are examined microscopically to identify fracture surface morphology and typical structure defects.

Measurements of linear thermal expansion of FRR laminae structures using the original dilatometer have been conducted. The influence of post-curing FRR specimens on the hysteresis loop during heating-cooling cycles of linear thermal expansion measurements have been examined. Experimental results of dilatometry measurements are compared with theoretical predictions. It is developed the model describing the hysteresis loop of linear thermal expansion.