

TOMASZ GORZELAŃCZYK

**OCENA WPŁYWU
WYBRANYCH CZYNNIKÓW EKSPLOATACYJNYCH
NA STRUKTURĘ I PROCES DESTRUKCJI
KOMPOZYTÓW WŁÓKNISTO-CEMENTOWYCH**



Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

Tomasz Gorzelańczyk

**Ocena wpływu
wybranych czynników eksploatacyjnych
na strukturę i proces destrukcji
kompozytów włóknisto-cementowych**



**Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2025**

Recenzenci

Radosław JASIŃSKI

Anna Ewa OSTAŃSKA

Opracowanie redakcyjne i korekta

Stanisław GANCARZ

Projekt okładki, skład i łamanie

Marcin ZAWADZKI

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2025

OFICYNA WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>; e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-8134-006-9

https://doi.org/10.37190/TGorzelanczyk_2025

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w pracy	7
1. Wstęp	9
2. Analiza literatury przedmiotu	13
2.1. Podstawowe informacje o płytach włóknisto-cementowych	13
2.1.1. Skład kompozytów włóknisto-cementowych	14
2.1.2. Charakterystyka płyt włóknisto-cementowych	20
2.1.3. Badania normowe płyt włóknisto-cementowych	22
2.1.4. Wybrane czynniki eksploatacyjne i wady produkcyjne wpływające na strukturę płyt włóknisto-cementowych ...	28
2.2. Technologia produkcji płyt włóknisto-cementowych	30
2.2.1. Podział technologii produkcji płyt włóknisto-cementowych	31
2.2.2. Park maszynowy	34
2.2.3. Schemat procesu technologicznego	35
2.2.4. Strefa przygotowania i mieszania surowców	37
2.2.5. Formowanie płyt	44
2.2.6. Układanie w stosy	47
2.2.7. Prasowanie płyt	48
2.2.8. Dojrzewanie i pielęgnacja płyt	49
2.2.9. Obróbka końcowa płyt	52
2.2.10. Nakładanie struktury ozdobnej	53
2.3. Wybrane metody nieniszczące stosowane w badaniach kompozytów włóknisto-cementowych	54
2.3.1. Metoda ultradźwiękowa	57
2.3.2. Metoda emisji akustycznej	62
2.3.3. Metoda odpowiedzi na impuls	66
2.3.4. Metoda młoteczkowa	68
2.3.5. Metoda mikrotomografii rentgenowskiej	69
2.3.6. Metoda terahercowa	71
2.3.7. Metody optyczne	72
2.4. Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych w badaniach własnych	75
2.4.1. Podstawowe zagadnienia dotyczące sztucznych sieci neuronowych	75
2.4.2. Sieci jednokierunkowe	78

2.4.3. Sieci komórkowe	80
2.4.4. Sieci rekurencyjne	80
2.5. Badania kompozytów włóknisto-cementowych w świetle dotychczasowych badań	81
2.5.1. Stan wiedzy dotyczącej składu kompozytów włóknisto-cementowych oraz wykorzystywanych metod badawczych	82
2.5.2. Wpływ wybranych czynników eksploatacyjnych na proces destrukcji i strukturę płyt włóknisto-cementowych w świetle dotychczasowych badań	83
2.5.3. Podsumowanie przeglądu literatury	88
3. Zakres badań własnych i metodyka analiz	91
3.1. Charakterystyka badanych płyt włóknisto-cementowych	92
3.2. Opis wybranych przypadków badawczych	95
3.3. Stanowisko do badań metodą emisji akustycznej w próbie trójpunktowego zginania	98
3.4. Stanowisko badawcze metodą optyczną z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego.....	101
3.5. Metodyka badań	102
3.5.1. Określenie wzorcowych widm akustycznych	103
3.5.2. Uczenie i testowanie sztucznych sieci neuronowych	106
3.5.3. Identyfikacja i filtracja charakterystyk widm akustycznych	109
4. Wyniki badań i ich analiza	111
4.1. Badania wpływu oddziaływania cyklicznego zamrażania–rozmarzania	111
4.1.1. Badania metodą emisji akustycznej	111
4.1.2. Analiza metodą optyczną w wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego	137
4.2. Badania wpływu promieniowania UV (badania starzeniowe)	139
4.2.1. Badania metodą emisji akustycznej	139
4.2.2. Analiza metodą optyczną w wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM)	145
4.2.3. Badania z wykorzystaniem spektrofotometru	147
4.3. Badania wpływu wysokiej temperatury (230°C, pożar)	150
4.3.1. Wieloskalowe ujęcie wpływu wysokiej temperatury 230°C na strukturę płyt z wykorzystaniem metody SEM oraz nanoindentacji	150

4.3.2. Badania wpływu oddziaływania pożaru na strukturę płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem metody emisji akustycznej i SEM	159
4.4. Badania imperfekcji materiałowych płyt włóknisto-cementowych (wad produkcyjnych)	166
4.4.1. Wykrywanie delaminacji i rys z wykorzystaniem bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego	166
4.4.2. Badania wilgotności płyt włóknisto-cementowych w procesie produkcji	171
5. Praktyczna aplikacja metody emisji akustycznej i obrazowania SEM do oceny zmian zachodzących w procesie niszczenia i strukturze płyt włóknisto-cementowych	175
6. Autorska metoda kompleksowej oceny wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i strukturę płyt włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym	181
7. Wnioski	185
Bibliografia	189
Assessment of the influence of selected operating factors on the structure and destruction process of fiber-cement composites	207

Wykaz ważniejszych oznaczeń

c_L	– prędkość podłużnych fal ultradźwiękowych,
e	– grubość płyty,
f	– częstotliwość wyrażona w Hz,
l	– długość płyty,
l_s	– rozpiętość między osiami podpór urządzenia do badania zginania,
m	– masa próbki,
$\bar{s}$	– odchylenie standardowe wartości,
t	– czas,
w	– szerokość płyty,
w_{ij}	– wagi połączeń synaptycznych,
x_0	– bias (wartość progowa),
x_i	– składowe wektora wejścia sieci neuronowej,
y_i	– składowe wektora wyjścia sieci neuronowej,
A	– aktywność akustyczna,
EA	– emisja akustyczna,
E_D	– moduł Younga,
E_{zd}	– energia zdarzeń EA,
$E_{\acute{s}r}$	– średnia energia zdarzeń,
F	– obciążenie przy zniszczeniu,
H_{IT}	– twardość ośrodka,
LOP	– granica proporcjonalności,
M_{IT}	– moduł indentacji,
MOR	– wytrzymałość na zginanie,
MOR_{fi}	– wytrzymałość na zginanie próbki poddanej oddziaływaniu temperatury,
MOR_{fci}	– wytrzymałość na zginanie próbki odniesienia,
MR_i	– pojedyncza wartość współczynnika wytrzymałości na zginanie, pary próbek przy zniszczeniu przed badaniem typu i po badaniu typu,
N_{zd}	– tempo zdarzeń EA,
$N_{\acute{s}r}$	– średnia liczba zdarzeń,
ΣN_{zd}	– suma zdarzeń EA,
$\Sigma N_{zd,r}$	– suma rozpoznanych zdarzeń EA
$\Sigma N_{zd,wf}$	– suma zdarzeń EA rozpoznanych jako zrywanie włókien,
$\Sigma N_{zd,m}$	– suma zdarzeń EA rozpoznanych jako pękanie matrycy cementowej,
R	– wartość średnia współczynnika wytrzymałości na zginanie,

R_L	– dolna granica przedziału ufności współczynnika wytrzymałości na zginanie,
SSN	– skrót nazwy sztuczne sieci neuronowe,
W_f	– praca łamania próbki podczas trójpunktowego zginania,
ε	– odkształcenie,
h	– współczynnik uczenia,
λ	– długość fali ultradźwiękowej,
ν	– współczynnik Poissona,
ρ	– gęstość objętościowa,
σ_m	– naprężenia zginające.

1. Wstęp

Kompozyty włóknisto-cementowe są powszechnie stosowane w budownictwie, najczęściej jako płyty okładzinowe elewacji wentylowanych oraz jako pokrycia dachowe. Są one narażone na powstawanie wad i uszkodzeń nie tylko na etapie produkcji, lecz także w trakcie eksploatacji, co ma istotny wpływ na ich właściwości i trwałość.

Inspiracją do zagadnień będących tematem przewodnim monografii była realizacja projektu: „Program Innowacyjna Gospodarka: UDA-POIG. 04.04.00-02-019/08, Uruchomienie innowacyjnej produkcji ekologicznych płyt celulozowo-cementowych, dofinansowanie w ramach Działania 4.4 Nowe inwestycje o wysokim potencjale innowacyjnym, Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007–2013”. W ramach tego projektu autor był współtwórcą wdrożonego opracowania procesu technologicznego produkcji płyt włóknisto-cementowych w technologii „flow-on” [191]. Następnie czynnie uczestniczył w procesie uruchamiania produkcji płyt i prowadził szeroko zakrojone badania laboratoryjne. Zdobyte doświadczenie oraz wnikliwa analiza dostępnej literatury umożliwiły autorowi sformułowanie głównych celów niniejszej monografii.

Założono następujące cele naukowe:

1. Ocenę wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na strukturę płyt włóknisto-cementowych i na ich proces niszczenia.
2. Identyfikację imperfekcji materiałowych (wad produkcyjnych) przedmiotowych płyt z wykorzystaniem metod nieniszczących.
3. Opracowanie autorskiej metody umożliwiającej kompleksową ocenę wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i strukturę kompozytów włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym.

Podczas eksploatacji płyty włóknisto-cementowe narażone są na zmienne czynniki środowiskowe, w tym czynniki temperaturowe i wilgotnościowe z powodu dużych wahań temperatury i tzw. przejścia przez temperaturę 0°C w cyklu dobowym (cykliczne zamrażanie-rozmrażanie) oraz agresywność fizyczną w postaci promieniowania ultrafioletowego. Ponadto są one narażone na czynniki eksploatacyjne wyjątkowe. Należą do nich przede wszystkim wysoka temperatura wywołana oddziaływaniem ognia, np. w trakcie pożaru. Wskutek wymienionych wyżej czynników struktura płyty włóknisto-cementowej może ulec zmianie, szczególnie jej właściwości i trwałość. Stąd

też identyfikacja wpływu omawianych wyżej czynników na płyty włóknisto-cementowe jest warunkiem bezpiecznej eksploatacji. Z kolei proces produkcji jest bardzo złożony i zależny od właściwości i ilości poszczególnych składników oraz ich rozmieszczenia przestrzennego w płycie. W procesie produkcyjnym wewnątrz płyty mogą powstać wady i uszkodzenia, takie jak: duże pory, rozwarstwienia (delaminacje), rysy. Stąd też kontrola poprawności produkcji płyt ma również bardzo istotny wpływ na jakość i trwałość tego wyrobu budowlanego.

Określenie wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na strukturę płyt włóknisto-cementowych oraz identyfikacja imperfekcji materiałowych jest zatem istotnym zagadnieniem zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i praktycznego. Warto nadmienić, że większość dotychczasowych badań płyt włóknisto-cementowych dotyczyło jedynie określenia normowych parametrów fizykomechanicznych, wpływu czynników eksploatacyjnych, takich jak cykle namaczania i suszenia, cykle zamrażania i rozmrażania, wpływ grzania i deszczowania, wysokich temperatur. Analizowano też wpływ zastosowania różnych rodzajów włókien i procesów produkcyjnych poprzez badanie wytrzymałości na zginanie *MOR* i ocenę wizualną. W literaturze można znaleźć nieliczne informacje na temat badań opisujących wpływ różnych imperfekcji powstających w trakcie produkcji na właściwości płyt włóknisto-cementowych.

Analiza obecnego stanu wiedzy w temacie zagadnienia wskazuje na potrzebę zebrania i usystematyzowania dostępnych wyników badań oraz znacznego ich poszerzenia o grupę wybranych czynników eksploatacyjnych dotychczas niebadanych lub jedynie sygnalizowanych, a mających duży wpływ na zmiany zachodzące w strukturze płyt włóknisto-cementowych oraz na ich proces niszczenia w próbie trójpunktowego zginania. Korzystne może być także ujednolicenie w pewnym zakresie warunków i sposobów realizacji badań, umożliwiające porównywanie uzyskiwanych wyników. Nie można wykluczyć, że zebranie znacznej ilości wyników badań może okazać się przydatne w przyszłości, na przykład w próbach uściślenia opisów teoretycznych zachowania się kompozytów włóknisto-cementowych w pewnych określonych warunkach.

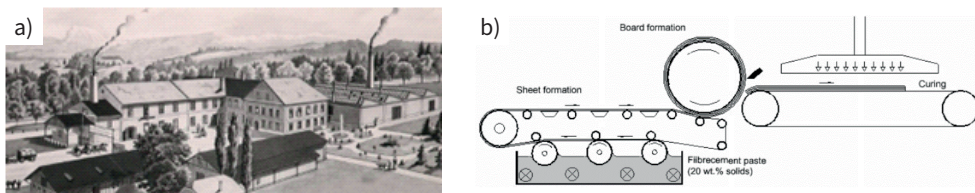
Praca składa się z 7 rozdziałów. Rozdział 1 stanowi wstęp do tematyki pracy, w którym przedstawiono założone cele naukowe. W rozdziale 2 dokonano przeglądu literatury przedmiotu. Zawarto w nim m.in. informacje o płytach włóknisto-cementowych w aspekcie ich produkcji i składu, przeprowadzonych dotychczas badaniach, wymaganiach normowych oraz czynnikach eksploatacyjnych mogących oddziaływać na te płyty. Omówiono także powszechnie stosowane metody nieniszczące, które mogą być przydatne

do badania kompozytów włóknisto-cementowych. W rozdziale tym zawarto również wprowadzenie w zagadnienie sztucznych sieci neuronowych oraz przedstawiono wybrane dotychczasowe zastosowania sztucznych sieci neuronowych w budownictwie. Rozdział 3 zawiera zakres przeprowadzonych badań własnych, stosowaną w pracy metodykę oraz metody badawcze. Opisano sposób, w jaki przyjęto dane wejściowe i zaimplementowano je do sztucznych sieci neuronowych. Przedstawiono także zastosowany proces uczenia i testowania SSN. W rozdziale 4 zamieszczono wyniki zrealizowanych badań własnych oraz analizę uzyskanych rezultatów w aspekcie wybranych czynników eksploatacyjnych. Badano m.in. wpływ oddziaływania cyklicznego zamrażania-rozmrażania, wpływ promieniowania UV, wysokiej temperatury 230°C i pożaru. W rozdziale tym opisano także współautorską metodę wykrywania imperfekcji materiałowych płyt włóknisto-cementowych (delaminacji i rys) wynikających z wad produkcyjnych. W rozdziale 5 zawarto aspekt praktyczny wykorzystania metody emisji akustycznej i obrazowania z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) do oceny zmian zachodzących w procesie niszczenia i strukturze płyt włóknisto-cementowych, które uległy uszkodzeniu z powodu nieprawidłowego przechowywania na placu budowy. W rozdziale 6 zaproponowano autorską metodę kompleksowej oceny wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i strukturę płyt włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym z wykorzystaniem metody emisji akustycznej, obrazowania SEM i metody nanoindentacji. Rozdział 7 z kolei jest podsumowaniem, w którym przedstawiono wnioski i uwagi końcowe, osiągnięcia wynikające z przeprowadzonych badań naukowych, a także wytyczono kierunki dalszych możliwych badań naukowych kompozytów włóknisto-cementowych.

2. Analiza literatury przedmiotu

2.1. Podstawowe informacje o płytach włóknisto-cementowych

Pierwszy zakład produkcyjny płyt włóknisto-cementowych powstał w 1903 r. pod nazwą „Eternit-Werke Ludwig Hatschek” w Schondorf w Austrii na miejscu dawnej fabryki papierniczej przedstawionej na rys. 2.1a [83]. Nazwa „Eternit” pochodzi z języka łacińskiego „aeternus”, czyli wieczny. Opatentowany proces produkcji płyt włóknisto-cementowych nazywany jest procesem Hatscheka, a nazwa pochodzi od nazwiska Ludwika Hatscheka – jego twórcy [84]. Schemat tego procesu przedstawiono na rys. 2.1b [9].



Rys. 2.1. Fabryka „ETERNIT-Werke Ludwig Hatschek” w Schondorf Austria [83] (a), schemat procesu produkcyjnego Hatscheka [9] (b)

Na ziemiach polskich produkcję azbestocementu po raz pierwszy rozpoczęto w 1913 r. w Fabryce Eternitu i Portland-Cementu braci Ryłskich w Lublinie [219]. Pierwszą fabryką, która w 1930 r. wykorzystała innowacyjny wtedy proces autoklawizacji wyrobów azbesto-cementowych, był zakład James Hardie w Australii [21], natomiast pierwszą w Polsce fabryką płaskich kompozytów włóknisto-cementowych był zakład produkcyjny we Wszemierowie koło Trzebnicy, uruchomiony w 2012 r. Obecnie czynnymi zakładami produkującym płyty włóknisto-cementowe w Polsce są fabryka w Trzemesznie firmy Cembrit, gdzie produkuje się jedynie profilowane płyty dachowe [80] oraz fabryka firmy Scalamid w Sobocie koło Poznania, w której produkowane są m.in. płyty elewacyjne [89].

Obecnie płyty włóknisto-cementowe są najczęściej wytwarzane w procesie Hatscheka [78], [178]. Proces ten jest bardzo popularny w Europie i krajach obu Ameryk [22]. Badaniami właściwości płyt włóknisto-cementowych w aspekcie wpływu technologii produkcji, w tym wpływu autoklawizacji, zajmowali się Cook, Coutts, Mohr oraz Rajabipour [5], [21], [24], [25], [125]. Niektórzy z producentów wytwarzają płyty z wykorzystaniem innego

procesu, który nazywany jest procesem ekstruzji [63], polegającym na wyciskaniu płyt włóknisto-cementowych. Jest on bardzo popularny w krajach Azjatyckich. Badania płyt produkowanych w tej technologii prowadzili Li oraz Zhou [112], [241], natomiast pilotażowe badania płyt włóknisto-cementowych wyprodukowanych w procesie ekstruzji z wykorzystaniem metod nieniszczących wykonali Ranachowski i Schabowicz [177].

Fabryki płyt włóknisto-cementowych znajdują się dziś na wszystkich kontynentach. Produkowane są tam rozmaite odmiany płyt z użyciem różnych składników, również materiałów pochodzących z recyklingu [50]. Ich wiodącymi producentami są m.in. Allura, Cembrit, Eqtione, James Hardie, Latonit, Nichiha, Swisspearl i TD LTM.

2.1.1. Skład kompozytów włóknisto-cementowych

Jednym z podstawowych składników pierwszych płyt (kompozytów) włóknisto-cementowych był azbest [87]. Udokumentowana i powszechnie uznana rakotwórczość azbestu w latach 80. spowodowała, że składnik ten zastąpiono włóknami celulozowymi i włóknami syntetycznymi na bazie tworzyw sztucznych, które mogą występować w formie dyskretnie rozproszonych włókien (ang. *rooving*), ciągłych splotów lub taśm, siatek albo tkanin [137], [152], [229], [239]. Stosowane w produkcji włókna celulozowe mają długość od 2,5 do 3,0 mm. Włókna mogą się różnić średnicą, ale zmienność ich średnicy jest niewielka i wynosi około 40 μm [22]. Obecnie produkowane płyty włóknisto-cementowe składają się z cementu portlandzkiego (który powinien spełniać wymagania zawarte w [151]), włókien celulozowych, włókien syntetycznych PVA (polialkohol winylu) [9], [22] polipropylenowych lub włókien celulozowych otrzymanych z recyklingu [50] i wody. Znane są zastosowania różnego rodzaju włókien pochodzenia naturalnego, m.in. z eukaliptusa, pszenicy, topoli, sosny, szału czy wełny owczej. Badania dotyczące zastosowania różnych włókien prowadzili Ardunay, Claramunt, Khormai, Savastano, Toledo-Filho oraz Tonoli [7], [9], [14], [34], [37], [43], [91], [96], [162], [184], [185], [227], [228], [231]. Dotyczyły one wpływu zastosowania różnego rodzaju włókien na właściwości mechaniczne płyt. Dodatkowymi składnikami i wypełniaczami płyt mogą być mączka wapienna, mika, perlit, kaolin oraz mikrosfera. Zostało to potwierdzone prowadzonymi przez autora badaniami w zespole badawczym kierowanym przez prof. Krzysztofa Schabowicza, czego efektem było uzyskanie patentów [143]–[146], oraz wdrożeniem opracowanych receptur w zakładzie produkcyjnym. Badanie płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem materiałów pochodzących

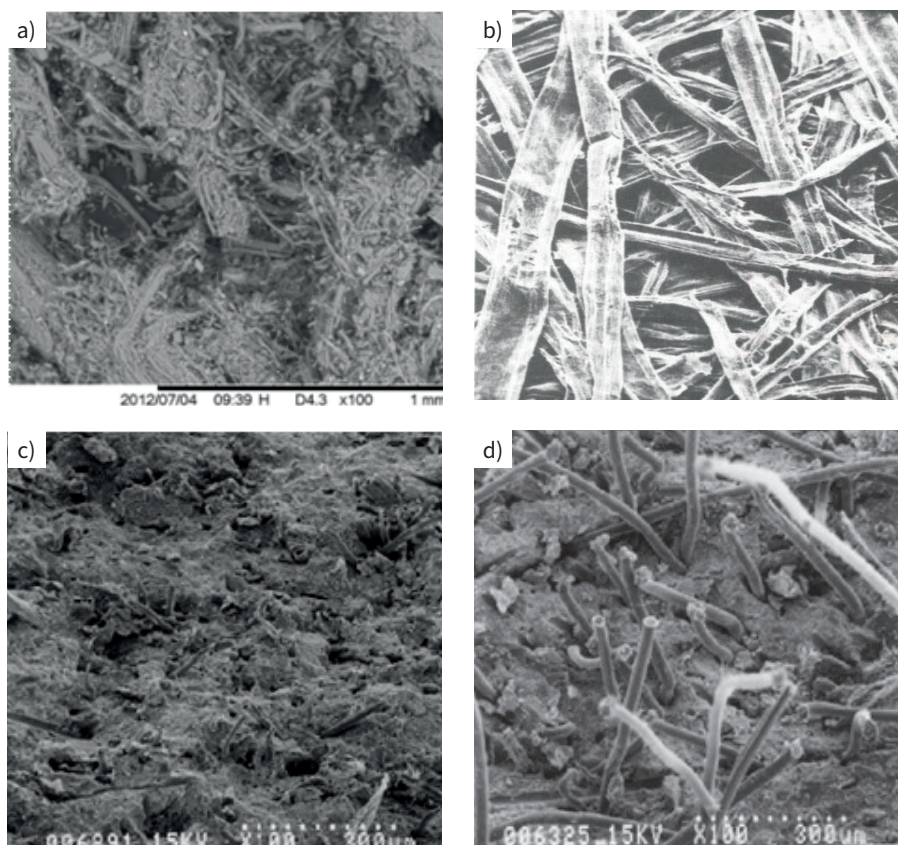
z recyklingu było przedmiotem różnych badań, w tym własnych [50]. Receptury wykorzystywane obecnie do produkcji płyt włóknisto-cementowych zostały opracowane na podstawie wieloletnich badań i stanowią zastrzeżenie patentowe producentów płyt. Podstawowy skład surowców możliwych do wykorzystywanych przy produkcji kompozytów włóknisto-cementowych przedstawiono w tab. 2.1. Na rysunku 2.2 pokazano natomiast przykładowe, wykonane z wykorzystaniem technologii SEM (ang. *Scanning Electron Microscope*), obrazy włókien azbestowych, celulozowych, a także syntetycznych – wykonanych z polialkoholu winylu (PVA) oraz polipropylenu (PP).

Tabela 2.1. Podstawowy skład surowców możliwych do wykorzystania przy produkcji kompozytów włóknisto-cementowych [143], [191]

Rodzaj surowca	Orientacyjny skład
Cement	~60 [%]
Celuloza (sucha)	~8 [%]
PVA	~2 [%]
Kaolin lub wapno	~30 [%]
Razem	~100 [%]
Dodatki i domieszki	
Hiperplastifikator	~0,1 l/t ^{*)}
Chlorek didecyldimetylamonowego (didecyldimethylammonium) (DDAC) lub bromku (DDAB)	~0,1 l/t ^{*)}
Perlit	~1 kg/t ^{*)}
Mika	~1 kg/t ^{*)}
Mikrosfera	~1 kg/t ^{*)}
Środek przeciwpieniący	~0,26 l/t ^{*)}

*) litrów/tonę = litrów na tonę gotowego produktu.

Odpowiednie przygotowanie włókien celulozowych jest kluczowym elementem produkcji płyt włóknisto-cementowych. Pomiar zawiesiny celulozowej przeprowadza się w urządzeniu Schopper-Rieglera [157]. Jest to badanie kontrolne oceniające poprawność rafinacji włókien, w wyniku którego po procesie rafinacji włókna te mają zdolność do utworzenia sieci umożliwiającej zatrzymywanie cząstek cementu i wypełniaczy, a tym samym do utworzenia cienkiej warstwy materiału [22]. W literaturze dotyczącej kompozytów włóknisto-cementowych można znaleźć także publikacje, w których opisano badania celulozy w procesie produkcji płyt włóknisto-cementowych oraz jej wpływu na właściwości mechaniczne gotowych płyt [11], [15], [36], [99], [185], [217].



Rys. 2.2. Włókna: a) azbestu chryzotylowego [88], b) celulozowe [23], c) polialkoholu winylu [178], d) polipropylenowe [178]

Włókna syntetyczne PVA mają wysoką wytrzymałość, w zależności od deklaracji producentów [86] wynoszącą od 11 do 14 cN/dtex, a moduł Younga na poziomie około 0,3 GPa. Włókna te mają odporność na zawilgocenie, czynniki alkaliczne oraz dobrą przyczepność do matrycy cementowej [178]. Są odporne na porażenie biologiczne i wyższą temperaturę w porównaniu do włókien celulozowych [38]. W pracy [13] wykazano, że włókna PVA mają znacznie lepsze właściwości mechaniczne, lepszą przyczepność do matrycy cementowej, a co jest szczególnie istotne – tworzą jednorodny rozkład w matrycy w porównaniu z włóknami PP. Włókna syntetyczne stosowane są głównie do produkcji płyt zewnętrznych przede wszystkim ze względu na możliwość zwiększenia ich trwałości i wytrzymałości [21]. Zazwyczaj ich zawartość w płycie kształtuje się na poziomie poniżej dwóch procent [178]. W tabeli 2.2 zamieszczono wymagania dotyczące surowców wykorzystywanych w produkcji.

Tabela 2.2. Wymagania dotyczące surowców wykorzystywanych w produkcji [86], [151], [157], [191]

Surowiec	Wymagania				
Celuloza	Miazga (pulpa)				
	Czas ubijania	[min]	0	40	70
	Stopnie Schopper Rieglera	[°SR]	12,5	23,9	50,0
	Pozorny ciężar właściwy	[kg/m³]	640	852	905
	Współczynnik rozciągania	[Nm/g]	49,9	106,5	112,1
	Współczynnik rozrywania	[kPa/m²/g]	3,0	7,4	7,4
	Elastyczność	[%]	2,0	3,1	2,9
	Współczynnik rozdzierania	[mN m²/g]	23,7	20,1	19,7
	Liczba Kappa		25 ± 3		
	Suchość	[%]	80		
	Min. długość włókna	[mm]	1,6–2,7		
	PVA – Polioctan winylu	Włókna polioctanu winylu			
Długość włókna			6 mm		
Grubość			1,6–2,0 dtex		
Wytrzymałość na rozciąganie na sucho			11,5 cN/dtex		
Moduł Younga na sucho			275		
Wydłużenie przy zerwaniu na sucho			7,4%		
Cement	Cement portlandzki CEM I 42,5 R				
	Rozdrobnienie wg Blaine: 3200 cm2/g (zakres 3200–3700 cm²/g)				
	Analiza chemiczna				
	Zalecane wartości				
	SiO2	~21,0%			
	Al2O3	~6,3%			
	Fe2O3	~3,0%			
	CaO	~66%			
	MgO	~1,0%			
	SO3	<3,2%			
	L.O.I.	~2,5% możliwie najmniej			
	Skład mineralny				
	Zalecane wartości				
	C3S	40–70%			
	C2S	<20%			
	C3A	7–10%			
	C4AF	5–15%			

Tabela 2.2 cd. Wymagania dotyczące surowców wykorzystywanych w produkcji [86], [151], [157], [191]

Surowiec	Wymagania			
Kaolin	Ciężar właściwy		2,6 g/cm ³	
	Ciężar objętościowy		0,35–0,45 g/cm ³	
	Analiza chemiczna			
	SiO ₂			46–49%
	Al ₂ O ₃			35%
	Na ₂ O			0,07%
	K ₂ O			1,0%
Wapno	MgO			0,2%
	L.O.I.			maks. 10%
	CaCO ₃			
	Ciężar właściwy		2,73 g/cm ³	
Polimer (hiperplastifikator) Środek przeciwpieniący	Rodzaj polimeru: flokulant anionowy, poliakrylamidowy Rodzaj środka przeciwpieniącego: Dispersion von Anionic Fattderivative			
Woda	Woda pitna lub woda gruntowa pH > 7 maks. 13 Woda powinna być wolna od olejów i substancji organicznych.			
Dodatki i domieszki				
Chlorek didecyldimetylamonowego (didecyldimethylammonium) (DDAC) lub bromku (DDAB)	Skład i ilość należy dobrać w zależności od pozostałych składników zgodnie z opisem patentowym			
Perlit	Skład i ilość należy dobrać w zależności od pozostałych składników			
Włókna szklane	Skład i ilość należy dobrać w zależności od pozostałych składników			
Mika	Skład i ilość należy dobrać w zależności od pozostałych składników			
	Skład i ilość należy dobrać w zależności od pozostałych składników			
Mikrosfera	Analiza chemiczna			
	SiO ₂	58,0	±	5,0%
	Al ₂ O ₃	26,0	±	5,0%
	Fe ₂ O ₃	5,1	±	0,6%
	CaO	0,8	±	0,1%
	MgO	0,5	±	0,2%
	SO ₂ /SO ₃	0,6	±	0,3%
	K ₂ O + Na ₂ O	1,2	±	0,4%
	TiO ₂	0,4	±	0,3%
	Cl	0,2	±	0,1%

Tabela 2.2 cd. Wymagania dotyczące surowców wykorzystywanych w produkcji [86], [151], [157], [191]

Surowiec	Wymagania			
Mikrosfera cd.	Zawartość pierwiastków śladowych			
	As	34÷42	Cr	60÷80
	Ba	240÷266	F	96÷120
	Cd	19÷22	Ni	66÷90
	Co	24÷44	Pb	46÷55
	V	60÷69		
	Wielkość ziaren			
	0–80 μm – 12%			
	80–250 μm – 79%			
	150–500 μm – 8%			
	straty – 1%			
	Własności fizyczne			
	– barwa	jasnoszara		
	– ciężar nasypowy w stanie suchym	407 $\pm$ 25 [kg/m ³]		
	– ciężar właściwy otoczki	2430 $\pm$ 100 [kg/m ³]		
	– twardość w skali Mohsa	6 $\pm$ 1		
	– przewodnictwo cieplne	0,07 $\pm$ 0,03 [W/m ² K]		
	– współczynnik pH wyciągu wodnego	7 $\pm$ 0,5		
	– temperatura topnienia	1659 $\pm$ 10 [K]		
	– temperatura mięknięcia	1275 $\pm$ 1438 [K]		
	– ciśnienie wewnętrzne kulek	0,2 $\pm$ 0,1 [bar]		

Płyty włóknisto-cementowe produkowane są w podstawowej szarej barwie, ale mogą również być barwione w masie według palety kolorów oferowanych przez producentów. Płyty mogą być malowane, licowane masami nadającymi strukturę lub mogą mieć strukturę deski albo kamienia i być uformowane już na etapie produkcji. Płyty zachowują odporność na procesy starzenia, opady atmosferyczne, amplitudę temperatur oraz oddziaływanie pochodzenia biologicznego, a przy zastosowaniu dodatkowych zewnętrznych zabezpieczeń chemicznych także na zabrudzenia typu graffiti [187]. Najczęściej stosowane w budownictwie płyty naturalne lub barwione w masie zachowują odporność przez zastosowanie odpowiednich dodatków na etapie produkcji (tab. 2.1). Możliwe powlekanie i nakładanie struktur nadaje płytom nie tylko walor estetyczny, ale stanowi formę dodatkowego zabezpieczenia ich powierzchni przed oddziaływaniem czynników

zewnątrznych. Płyty włóknisto-cementowe mają odporność ogniową, sklasyfikowaną według publikacji [156], jako A2-s1-d0 [82]. Klasy odporności ogniowej charakteryzują wyrób pod względem ilości i szybkości wydzielania energii podczas palenia się, czasu do zapalenia wyrobu przy kontakcie z płonącym przedmiotem, a także szybkości i zasięgu rozprzestrzeniania się płomieni.

2.1.2. Charakterystyka płyt włóknisto-cementowych

Płyty włóknisto-cementowe scharakteryzowane zostały w kilku normach w zależności od kształtu i zastosowania. Płyty płaskie do zastosowań zewnętrznych i wewnętrznych na ściany i sufity charakteryzuje norma PN-EN 12467 [154]. Płyty faliste przeznaczone na pokrycia dachowe oraz okładziny wykończeniowe ścienne i sufity charakteryzuje norma PN-EN 494 [153]. Z kolei płytki włóknisto-cementowe z przeznaczeniem na pokrycia dachowe i wykończenia ścian i stropów wewnętrznych i zewnętrznych układane na zakład charakteryzuje norma PN-EN 492 [152]. Ze względu na to, że badania własne przeprowadzono na płaskich płytach włóknisto-cementowych w dalszej części monografii zostaną scharakteryzowane badania normowe zgodnie z normą PN-EN 12467 [154]. Płaskie płyty włóknisto-cementowe w normie [154] podzielono na cztery kategorie w zależności od odporności na warunki atmosferyczne, na pięć klas w zależności od wytrzymałości na zginanie, na dwie grupy rozmiarów ze względu na sposób montażu oraz na dwa poziomy tolerancji wymiarów. Kategorie odporności wraz z opisem warunków, na jakie mogą być narażone płyty przedstawiono w tab. 2.3.

Tabela 2.3. Kategorie odporności na warunki atmosferyczne płyt włóknisto-cementowych [154]

Kategoria odporności	Opis warunków
A	płyty narażone na niskie i wysokie temperatury oraz wysoką wilgotność
B	płyty narażone na wysokie temperatury i wilgotność, niskie temperatury tylko okresowo
C	płyty narażone na wysokie temperatury i wilgotność, brak niskich temperatur, zastosowanie do wewnątrz.
D	płyty przeznaczone do wykonywania sztywnych podłoży

Ze względu na wymiary płyty klasyfikuje się na dwie grupy – małe i duże. W pracy [154] zdefiniowano płyty małe, które mają powierzchnie

do 0,4 m² oraz stosunek długości do szerokości mniejszy od trzech. Do płyt dużych zalicza się wszystkie nieobjęte w definicji małych. W przypadku płyt włóknisto-cementowych określono dwa poziomy tolerancji w zakresie długości, szerokości, grubości, prostoliniowości i prostokątności krawędzi. Płyty powinny spełniać wymagania odpowiedniego poziomu tolerancji w zakresie wszystkich parametrów. Długość i szerokość powinny być zadeklarowane przez producentów. Typowe handlowe wymiary płyt włóknisto-cementowych to 3050 × 1250 mm. Ich grubość wynosi od 3 do 30 mm, ale grubość standardowa to 8,0 mm. Tolerancje długości, szerokości, grubości, prostoliniowości oraz prostokątności dla dwóch poziomów (poziom I, poziom II) opisano w tabelach w podrozdz. 5.3 normy [154]. Podział na klasy według [154] określono w odniesieniu do deklarowanej minimalnej wytrzymałości płyt włóknisto-cementowych na zginanie MOR (ang. *Modulus of rupture*) wyrażonej w MPa i przedstawiono w tab. 2.4. Wytrzymałość na zginanie MOR według [154] powinna być średnią wartością z otrzymanych badań w obu kierunkach. Należy zaznaczyć, że wytrzymałość w najsłabszym kierunku nie może być niższa niż 70% wartości średniej z obu kierunków.

Tabela 2.4. Klasy płyt włóknisto-cementowych i ich minimalne wytrzymałości na zginanie MOR [154]

Minimalna wytrzymałość na zginanie MOR określana na mokro [MPa]		Minimalna wytrzymałość na zginanie MOR określana na sucho [MPa]	
Klasa	Kategoria A i B	Klasa	Kategoria C i D
1	4	1	4
2	7	2	7
3	13	3	10
4	18	4	16
5	24	5	22

W podrozdziałach 5.5–5.7 normy [154] opisano minimalne wymagania, które powinny spełniać płyty danej kategorii. Producenci materiałów włóknisto-cementowych mogą przedstawić także dodatkowe, nieujęte w normie parametry charakteryzujące płyty i jej właściwości. Są to na przykład: parametry rozszerzalności pod wpływem temperatury, przewodność cieplna, nasiąkliwość oraz porowatość. Przykładowe parametry zawarte w kartach technicznych płaskich płyt włóknisto-cementowych do zastosowań zewnętrznych zestawiono w tab. 2.5 [80], [82], [89].

Tabela 2.5. Przykładowe dane techniczne deklarowane przez producentów płyt włóknisto-cementowych płaskich do zastosowań zewnętrznych [80], [82], [89]

Wymiar	Jedn.	Wartość
Szerokość	mm	1250
Długość	mm	3050
Grubość	mm	8,0
Właściwości fizyczne		
Gęstość suchego produktu	g/cm ³	1,58
Waga	kg/m ²	14,9
Właściwości mechaniczne – współczynnik elastyczności przy zginaniu		
Moduł elastyczności suchego produktu prostopadłe do włókien	GPa	12
Moduł elastyczności suchego produktu równoległe do włókien	GPa	10
Wytrzymałość na zginanie		
Badanie prostopadłe do włókien	MPa	32
Badanie równoległe do włókien	MPa	22
Właściwości termiczne		
Przewodnictwo cieplne	W/m·K	0,390
Rozszerzalność termiczna	mm/m·K	<0,01
Odporność na cykle zamrażania/rozmarzania	cykle	>100
Właściwości ciepłno-wilgotnościowe		
Rozszerzalność wilgotnościowa	mm/m	1,6
Tolerancje		
Grubość	mm	±0,5
Długość, szerokość	mm	±3,0
Inne właściwości		
Kategoria, klasa	EN-12467	NT A3 I
Odporność ogniowa	EN 13501	A2, s1 –d0

2.1.3. Badania normowe płyt włóknisto-cementowych

Zakres badań normowych płaskich płyt włóknisto-cementowych opisano w normach [152], [154]. Badania te dzielą się na:

- badania wymiarów i kształtów;
- badania właściwości fizycznych i mechanicznych:
 - gęstość pozorna,
 - wytrzymałość na zginanie,

- przesiąkliwość,
- przepuszczalność pary wodnej,
- wpływ ciepłej wody,
- kąpiel–suszenie,
- rozszerzalność pod wpływem wilgoci;
- badania eksploatacyjno-klimatyczne:
 - zamrażanie–rozmrężanie,
 - grzanie–deszczowanie;
- badanie oddziaływania ognia.

Badania wymiarów i kształtu płyt przeprowadza się poprzez dwa pomiary dla każdego wymiaru w odległości około 50 mm od krawędzi w przypadku płyt małych. W przypadku płyt dużych natomiast należy wykonać trzy pomiary każdego wymiaru – jeden pośrodku, a dwa kolejne w odległości ok. 50 mm od krawędzi. Grubość mierzona jest w trzech punktach wzdłuż jednej krawędzi. Wartość nominalna jest średnią arytmetyczną z tych pomiarów. Pomiary grubości płyt z fakturą oraz badanie prostoliniowości i prostokątności wraz z dopuszczalną tolerancją wymiarów opisano szczegółowo w pkt. 5.3 normy [154]. Spośród badań właściwości fizycznych i mechanicznych podstawowym parametrem jest gęstość pozorna, którą określa się wzorem:

$$\rho_p = \frac{m}{V}, \quad (2.1)$$

gdzie:

ρ_p – gęstość pozorna [g/cm³],

m – masa próbki badanej po suszeniu [g],

V – objętość badanej próbki [cm³].

Wytrzymałość na zginanie *MOR* jest najważniejszym parametrem określającym jakościowo i wytrzymałościowo płyty włóknisto-cementowe. Próbki do badań według normy [154] powinny mieć wymiary 250 × 250 mm przy rozstawie podpór wynoszącym 200 mm. Przed przystąpieniem do badania próbki należy poddać kondycjonowaniu, odpowiedniemu w zależności od kategorii płyt. Przebieg kondycjonowania przedstawiono w tab. 2.6.

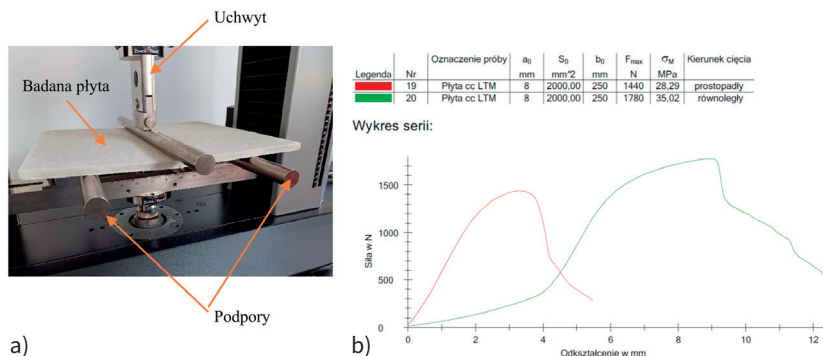
Tabela 2.6. Kondycjonowanie próbek przed badaniem według [154]

Typ badań	Opis kondycjonowania
Próba odbiorcza (metoda na mokro) – kategoria A i B	24 godz. zanurzenie w wodzie dla grubości <20 mm, 48 godz. zanurzenie w wodzie dla grubości >20 mm
Próba odbiorcza (metoda na sucho) – kategoria C i D	Od 7 do 14 dni w warunkach laboratoryjnych

Tabela 2.6 cd. Kondycjonowanie próbek przed badaniem według [154]

Typ badań	Opis kondycjonowania
Badanie typu – kategoria A, B i C	Przed badaniem wytrzymałości na zginanie: od 7 do 14 dni w warunkach laboratoryjnych, poprzedzone zanurzeniem w wodzie przez 24 godz. dla grubości <20 mm lub 48 godz. dla grubości >20 mm. Próbki powinny być badane natychmiast po wyjęciu z wody.
Badanie typu – kategoria D	Od 7 do 14 dni w warunkach laboratoryjnych

W przypadku płyt włóknisto-cementowych minimalna wytrzymałość na zginanie, wyrażona w MPa, dla odpowiedniej kategorii nie powinna być niższa od wartości podanej w tab. 2.4. Wytrzymałość na zginanie MOR powinna być wartością średnią, otrzymaną z badań próbek w dwóch kierunkach. Określanie wytrzymałości na zginanie MOR polega na trójpunktowym zginaniu w maszynie przeznaczonej do badań wytrzymałościowych. Próbkę płyty w trakcie badania w maszynie wytrzymałościowej pokazano na rys. 2.3a. Na rysunku 2.3b pokazano przykładowy wykres zależności siły w funkcji odkształcenia (mierzone jako przemieszczenie trawersy maszyny wytrzymałościowej) dla dwóch kierunków badania, uzyskany z raportu oprogramowania maszyny wytrzymałościowej, na której przeprowadzone były badania własne autora.



Rys. 2.3. Badanie wytrzymałości na zginanie: a) próbka w trakcie badania, b) przykładowy wykres zależności siły w funkcji odkształcenia dla dwóch kierunków badania

Wytrzymałość na zginanie MOR określa się dla każdego kierunku ze wzoru (2.2) wg [154]:

$$MOR = \frac{3Fl_s}{2be^2}, \quad (2.2)$$

gdzie:

MOR – wytrzymałość na zginanie [MPa],

F – siła niszcząca [N],

- l_s – rozstaw podpór [mm],
 b – szerokość próbki [mm],
 e – średnia grubość próbki [mm].

Prześląkliwość badana jest na próbkach o wymiarach 600×500 mm lub w przypadku płyt wąskich o wymiarze 600 mm i maksymalnej szerokości. Próbkę należy umieścić w specjalnej ramie i uzupełnić wodą do poziomu 20 mm ponad powierzchnię płyty. Badanie odbywa się w kontrolowanych warunkach klimatycznych wynoszących 23°C oraz wilgotności na poziomie 50% i trwa przez 24 godziny. Po upływie doby należy sprawdzić spodnią część płyty i porównać z dopuszczalnymi wymaganiami dla danej kategorii płyt podanymi w [154].

Przepuszczalność pary wodnej μ określa się w specjalistycznym laboratorium zgodnie z [155], a następnie porównuje z dopuszczalnymi wymaganiami opisanymi w [152].

Wpływ działania ciepłej wody o temperaturze 60°C podczas 56 dni zanurzenia określa się, wykonując badania wytrzymałości na zginanie MOR według wzoru (2.2) próbek poddanych badaniu i próbek odniesienia (referencyjnych), a następnie wyliczając współczynnik według wzoru (2.3). Wpływ cykli kąpieli w wodzie o temperaturze otoczenia przez 18 godzin, a następnie suszenia przez kolejne 6 godzin oznaczają się, badając wytrzymałość na zginanie tych próbek i próbek referencyjnych według wzoru (2.2), a następnie wyliczając współczynnik według wzoru (2.3).

$$MR_i = \frac{MOR_{fi}}{MOR_{fci}}, \quad (2.3)$$

gdzie:

- MR_i – pojedyncza wartość współczynnika wytrzymałości na zginanie [–],
 MOR_{fi} – wytrzymałość MOR próbki poddanej działaniu czynnika [MPa],
 MOR_{fci} – wytrzymałość MOR próbki odniesienia [MPa].

Wartość średnią R współczynnika MR_i należy wyliczyć z uwzględnieniem odchylenia standardowego, a następnie niższą szacunkową wartość R_L średniego współczynnika przy 95% poziomie ufności według wzoru:

$$R_L > R - 0,58 \times \bar{s}, \quad (2.4)$$

gdzie:

- R_L – dolna granica przedziału na poziomie 95% ufności współczynnika R ,
 R – wartość średnia współczynnika wytrzymałości na zginanie MR_i ,
 $\bar{s}$ – odchylenie standardowe.

Otrzymany wynik powinien spełniać wymagania dla odpowiednich kategorii płyt opisane w [154]. Badania te mają na celu określenie wpływu działania zawilgocenia i temperatury na wytrzymałość na zginanie MOR płyt włóknisto-cementowych.

Badanie rozszerzalności pod wpływem zawilgocenia polega na pomiarze próbek przy różnych poziomach wilgotności i określenia liniowej rozszerzalności L_m ze wzoru (2.5):

$$L_m = \frac{(L_{90} - L_{30}) \times 100}{L_{30}}, \quad (2.5)$$

gdzie:

L_m – liniowa rozszerzalność pod wpływem wilgoci [%],

L_{90} – długość próbki przy wilgotności wynoszącej 90% [mm],

L_{30} – długość próbki przy wilgotności wynoszącej 30% [mm].

Badania eksploatacyjno-klimatyczne mają na celu odzwierciedlenie (symulację) rzeczywistych warunków, w jakich kompozyty włóknisto-cementowe będą eksploatowane. Na badania te składają się cykle zamrażania i rozmrażania oraz cykle grzania i deszczowania. Chłodzenie próbek wykonuje się w temperaturze -20°C w czasie od 2 do 3 godzin, następnie ogrzewanie w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ w tym samym czasie. Cały cykl trwa od 4 do 6 godzin. Na rysunku 2.4 przedstawiono stanowisko badawcze (komorę) do badań cyklicznego zamrażania-rozmrażania.



Rys. 2.4. Urządzenie do badania cyklicznego zamrażania-rozmrażania

Badanie naprzemiennego grzania w temperaturze $+60^{\circ}\text{C}$ z deszczowaniem, z wydajnością $1 \text{ l/m}^2/\text{min}$ trwa około 6 godzin. Liczba przeprowadzonych cykli dla wyżej wymienionych badań, zależnie od kategorii płyty zamieszczono w tab. 2.7 (tzw. badania typu, tablica 7 normy [154]). Do przeprowadzenia badań grzanie-deszczowanie, należy zastosować aparaturę badawczą opisaną

w p. 7.4.2.3 normy PN-EN 12467. Autor jest współtwórcą tej aparatury, która jest chroniona patentem [138]. Rozwiązanie to zostało wdrożone na linii produkcyjnej płyt włóknisto-cementowych. Wpływ cykli zamrażania i rozmrażania określa się przez wykonanie badania wytrzymałości na zginanie *MOR* próbek poddanych badaniu i porównanie ich z próbkami odniesienia według wzoru (3.2). Natomiast po cyklach grzania i deszczowania płyty poddaje się ocenie wizualnej.

Tabela 2.7. Badania typu istotne dla poszczególnych kategorii płyt [154]

	Kategoria			
	A	B	C	D
Nieprzepuszczalność wody	tak	tak	nd	tak
Ciepła woda	tak	tak	tak	tak
Kąpiel–suszenie	50 cykli	25 cykli	25 cykli	25 cykli
Zamrażanie–rozmrażanie	100 cykli	25 cykli	nd	25 cykli
Grzanie–deszczowanie	50 cykli	25 cykli	nd	nd
Przepuszczalność pary wodnej	nd	nd	nd	tak
Reakcja na ogień	tak	tak	tak	tak
Oddziaływanie substancji niebezpiecznych	tak	tak	tak	tak

nd – nie dotyczy.

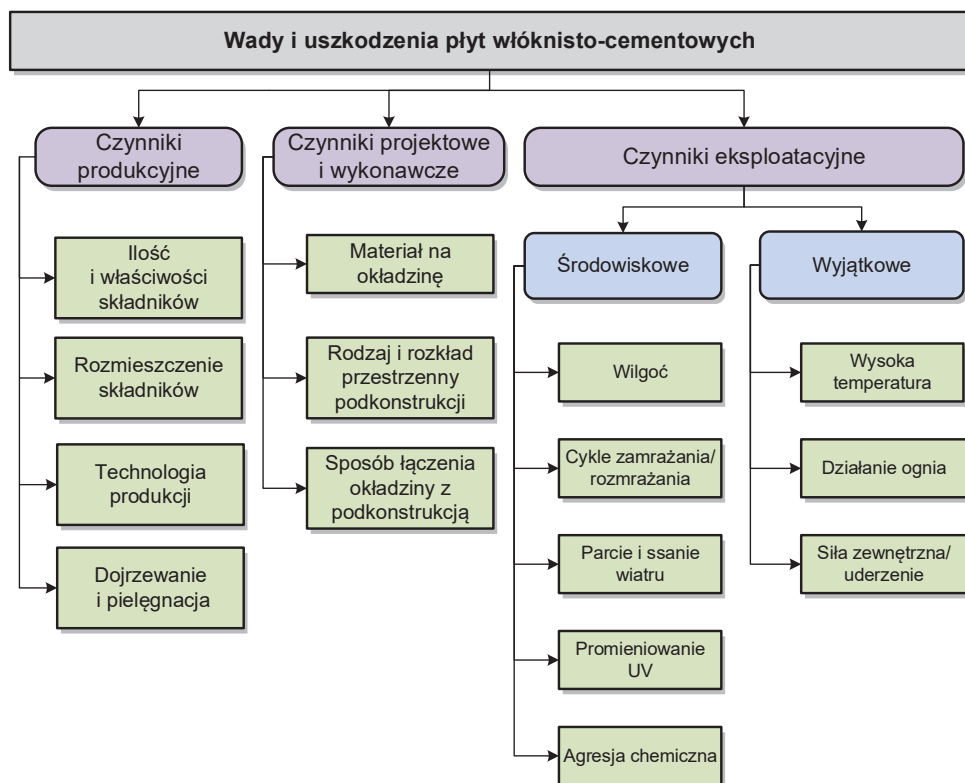
W zakresie oddziaływania ognia płyty powinny zostać zainstalowane w sposób odzwierciedlający rzeczywiste zastosowanie i sklasyfikowane według [156]. Norma zawiera wytyczne do oceny, jak zachowują się płyty w reakcji na ogień, zasadniczo płaskie wyroby. W badania objętych normą klasyfikuje się wyroby ze względu na niepalność, wydzielanie ciepła spalania, wydzielanie dymu, występowanie płonących kropli. Na podstawie badań oddziaływania ognia objętych normą [154], [156] nie określa się wymagań dotyczących wytrzymałości na zginanie *MOR* lub wpływu tego czynnika na strukturę kompozytów włóknisto-cementowych.

Warto zaznaczyć, że opisane wyżej badania związane są przede wszystkim z właściwościami mechanicznymi, uwzględniającymi wprawdzie wpływ czynników eksploatacyjno-klimatycznych, głównie temperatury i wody, ale ich ocena opiera się w zasadzie tylko na jednym parametrze, jakim jest wytrzymałość *MOR* oraz na oględzinach wizualnych, co może się okazać niewystarczające. W przypadku pojawienia się defektów produkcyjnych lub

powstałych już w trakcie eksploatacji pod wpływem różnych czynników, wykorzystując tylko badania normowe, niemożliwe jest określenie wpływu tych czynników na zmiany zachodzące w strukturze kompozytów. Stąd niezwykle istotne wydaje się poszerzenie zakresu badań w celu zidentyfikowania zmian zachodzących w strukturze materiału poddanego działaniu wybranych czynników zewnętrznych podczas eksploatacji.

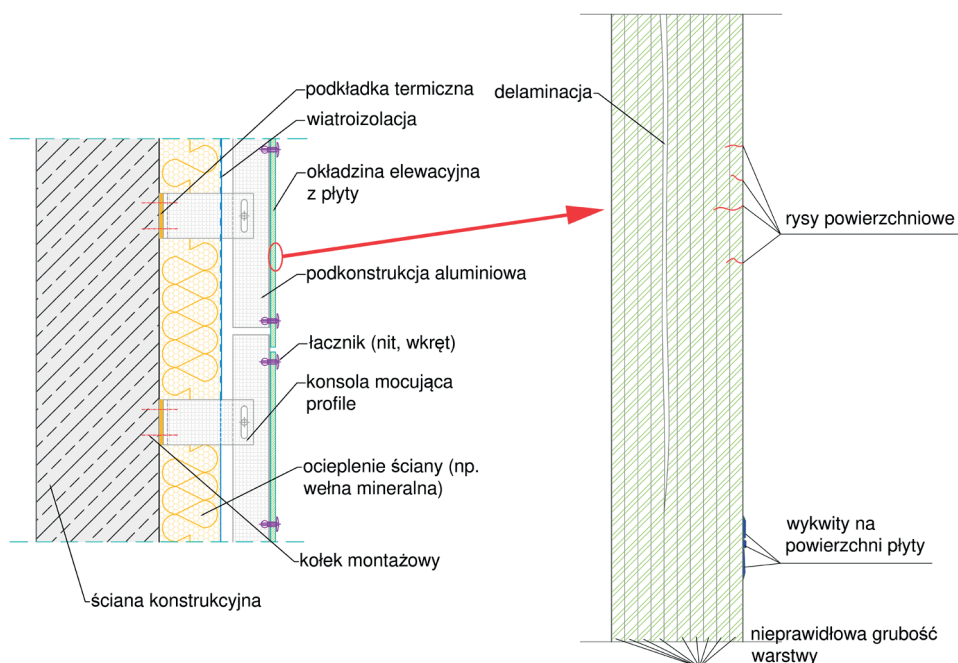
2.1.4. Wybrane czynniki eksploatacyjne i wady produkcyjne wpływające na strukturę płyt włóknisto-cementowych

Płyty włóknisto-cementowe są materiałem kompozytowym narażonym na powstawanie wad i uszkodzeń nie tylko na etapie produkcji (czynniki produkcyjne), lecz także w trakcie projektowania czy montażu (czynniki projektowe i wykonawcze), a później eksploatacji (czynniki eksploatacyjne). Wybrane wady i uszkodzenia płyt włóknisto-cementowych przedstawiono na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Wybrane wady i uszkodzenia płyt włóknisto-cementowych; opr. T. Gorzelańczyk na podst.: [206]

Wady i uszkodzenia te mają istotny wpływ na ich właściwości fizyko-mechaniczne, a przede wszystkim trwałość płyt włóknisto-cementowych i wykonanych z nich okładzin. Warto zaznaczyć, że proces produkcji płyt włóknisto-cementowych jest bardzo złożony i zależny od właściwości i ilości poszczególnych składników oraz ich rozmieszczenia przestrzennego w strukturze płyty [178], [206]. Inne czynniki produkcyjne związane są z doбором odpowiedniej technologii produkcji, dojrzewania i pielęgnacji płyt. W procesie produkcyjnym w płycie mogą powstać wady i uszkodzenia początkowe, między innymi takie, jak: imperfekcja geometryczna – nieprawidłowa grubość płyty, imperfekcje materiałowe: rozwarstwienia (delaminacje), rysy, wykwity na powierzchni płyty, nadmierna nasiąkliwość płyty, nieciągłe rozłożenie przestrzenne siatki włókien zbrojących oraz niska wytrzymałość na zginanie [191], [193]. Najczęściej występujące imperfekcje materiałowe w płytach włóknisto-cementowych przedstawiono na rys. 2.6. Na rysunku pokazano także przykładowy przekrój przez elewację wentylowaną na podkonstrukcji aluminiowej.



Rys. 2.6. Przykładowa elewacja wentylowana na podkonstrukcji aluminiowej z pokazanymi imperfekcjami materiałowymi najczęściej występującymi w płytach włóknisto-cementowych

Wpływ czynników produkcyjnych na wytrzymałość płyt włóknisto-cementowych jest ściśle związany z ich strukturą i został potwierdzony w badaniach, m.in. w pracach [9], [12], [150], [177], [178], [186], [212], [213]. Z kolei w trakcie eksploatacji płyty włóknisto-cementowe narażone są przede wszystkim na czynniki środowiskowe, takie jak temperatura i wilgotność, związane z wahaniami temperatury i tzw. przejściem przez temperaturę 0°C w cyklu dobowym (cykliczne zamrażanie–rozmarzanie), środowiskową agresywność chemiczną związaną z kwaśnymi deszczami oraz promieniowaniem ultrafioletowym [2], [47], [56]. Ponadto są one także narażone na czynniki wyjątkowe, takie jak pożar, któremu towarzyszy wysoka temperatura, czy oddziaływanie siły poziomej powstałej od uderzeń użytkowych oraz silnego wiatru [100]–[102], [193], [209]. Wskutek wymienionych wszystkich czynników powierzchnia i struktura płyty włóknisto-cementowej może ulec zmianie, a nawet uszkodzeniu. W konsekwencji może to spowodować pogorszenie właściwości i trwałości płyt. Z tego względu okładzina elewacyjna wykonana z płyt włóknisto-cementowych musi spełniać wymagania stawiane we właściwych normach i aktach prawnych [154]–[156], [181] z uwzględnieniem działania przedstawionych czynników. Rozpoznanie właściwości płyt włóknisto-cementowych, szczególnie ich procesu destrukcji, w tym zmian w strukturze pod wpływem przede wszystkim czynników produkcyjnych oraz eksploatacyjnych jest niezmiernie istotne. Dotyczy to szczególnie elementów zewnętrznych budynku, które mają wpływ na bezpieczne użytkowanie obiektu i jego otoczenia. Dlatego, aby lepiej wyjaśnić wpływ czynników produkcyjnych, w dalszej części pracy przedstawiono i omówiono technologię produkcji płyt włóknisto-cementowych.

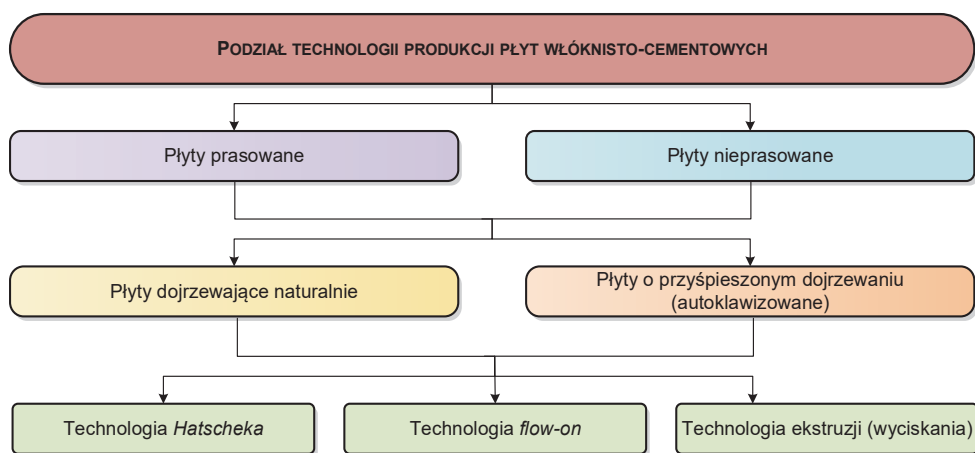
2.2. Technologia produkcji płyt włóknisto-cementowych

Technologia produkcji płyt włóknisto-cementowych, jak już wspomniano w podrozdz. 2.1, powstała na początku XX wieku. Jednakże w ówczesnej technologii wykorzystywano do produkcji azbest, którego używanie ze względów zdrowotnych jest obecnie niedozwolone. Warto podkreślić, że pierwszą w Polsce fabryką płaskich kompozytów włóknisto-cementowych był zakład produkcyjny we Wszemirowie koło Trzebnicy uruchomiony w 2012 r. Autor niniejszej pracy jest współtwórcą technologii produkcji płyt włóknisto-cementowych, która została zaimplementowana w tymże zakładzie produkcyjnym i opisana w dalszej części monografii.

2.2.1. Podział technologii produkcji płyt włóknisto-cementowych

Na rysunku 2.7 przedstawiono podział technologii produkcji płyt włóknisto-cementowych. Ze schematu wynika, że podział technologii produkcji związany jest bezpośrednio z klasyfikacją technologiczną płyt. Płyty można podzielić na:

1. nieprasowane do wykorzystania:
 - a) wewnątrz budynku, płyty okładzinowe do wykańczania pomieszczeń,
 - b) konstrukcyjne i montażowe wewnętrzne i zewnętrzne;
2. prasowane do wykorzystania na zewnątrz budynku jako płyty elewacyjne i pokrycia dachowe;
3. prasowane do wykorzystania na zewnątrz budynku, z przygotowaniem do lakierowania, jako płyty elewacyjne;
4. barwione w masie dla produktów z pkt. 1, 2 i 3.



Rys. 2.7. Podział technologii produkcji płyt włóknisto-cementowych

Na podstawie doświadczenia zdobytego podczas pracy w zakładzie produkcyjnym, w którym autor był kierownikiem działu B+R, oraz publikacji [191] w tab. 2.8 podano technologię wykonywania płyt włóknisto-cementowych płaskich wraz z orientacyjnym składem i uwagami dotyczącymi poszczególnych technologii, w tab. 2.9 podano specyfikację tych płyt, w tab. 2.10 zamieszczono przykładową wydajność linii technologicznej, a w tab. 2.11 podano orientacyjne zapotrzebowanie na energię elektryczną.

Tabela 2.8. Technologia płyt włóknisto-cementowych płaskich [191]

Lp.	Technologia	Typowy skład materiałów	Uwagi
1	nieprasowane, dojrzewanie naturalne	cement, celuloza, celuloza z makulatury, PVA ¹⁾ , wypełniacz ³⁾ , dodatki ²⁾	wysoka cena surowców, niskie koszty wyposażenia, płyty można stosować na dachach w krajach tropikalnych, płyty nie są mrozoodporne
2	prasowane, dojrzewanie naturalne	cement, celuloza, celuloza z makulatury, PVA ¹⁾ , wypełniacz ³⁾ , dodatki ²⁾	wysoka cena surowców, wysokie koszty wyposażenia, płyty można stosować na dachach w krajach tropikalnych, płyty są mrozoodporne
3	Specjalna technologia, nieprasowane, dojrzewające naturalnie	cement, celuloza z makulatury, specjalne surowce, PVA ¹⁾ , wypełniacz ³⁾ , dodatki ²⁾ , barwienie w masie itp.	niska cena surowców, wysokie koszty wyposażenia, płyty można stosować w różnych klimatach
4	specjalna technologia, prasowane, dojrzewające naturalnie	celuloza z makulatury, specjalne surowce, PVA ¹⁾ , wypełniacz ³⁾ , dodatki ²⁾ , barwienie w masie, itp.	niska cena surowców, wysokie koszty wyposażenia, płyty można stosować w różnych klimatach

¹⁾ PVA = Poly-Vinyl-Alcohol – poliocetan winylu, ²⁾ hiperplastyfikator, środki przeciwpieniące itp.,

³⁾ kaolin lub wapno (CaCO_3), ⁴⁾ popiół lotny (opcjonalnie).

Tabela 2.9. Przykładowa specyfikacja płaskich płyt włóknisto-cementowych [191]

Typ	Szerokość	Długość	Grubość	Uwagi
Płyty płaskie	1200	3050	6–10 mm	cięte na mokro, prasowane
		2600	6–10 mm	
Standardowa waga jednej płyty, L = 3050		~36 kg	γ = 1,65 kg/dm3, 6 mm, prasowana	
Płaska przekładka 2 × 1260 × 3110 mm		~62 kg	ze stali walcowanej na gorąco	
Zapewnienie jakości		EN 12467 (norma europejska). PN-EN 12467. Płyty płaskie włóknisto- cementowe – Charakterystyka wyrobu i metody badań		

Tabela 2.9 cd. Przykładowa specyfikacja płaskich płyt włóknisto-cementowych [191]

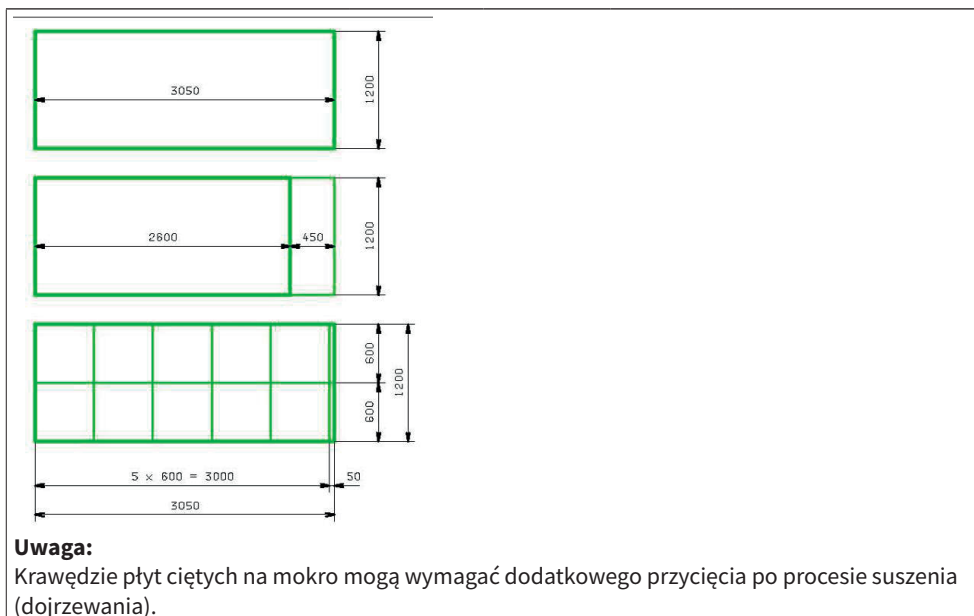


Tabela 2.10. Przykładowa wydajność linii produkcyjnej [191]

Dane dotyczące produkcji płyt	Specyfikacja	Uwagi
Płyta płaska	1200 × 3050 mm	zobacz informację w tab. 2 dla prasowanych płyt o gr. 6 mm
Grubość płyty	7.65 mm	
Obwód bębna formującego	3267 mm	bęben formujący – Ø 1040 mm
Czas cyklu formowania bębna	18 s	7 warstw, $v_{\text{pokrywania}} = 77 \text{ m/min}$
Liczba płyt	200 na godzinę	
Liczba warstw	7	1,1 mm na warstwę
Grubość warstwy	1,1 mm	
Standardowy ciężar płyty	36 kg	$\gamma = 1,65 \text{ kg/dm}^3$, 6 mm po sprasowaniu
Zakładana wydajność 100%	4800 płyt/24 godz.	173 t/dzień = 7,2 t/godz.
Produkcja netto ~88%*)	4200 płyt/24 godz.	150 t/dzień = 6,3 t/godz.

*) Przy produkcji netto należy uwzględnić straty wielkości ok. 10–12% z uwagi na powstające odpady mokre i spowolnienia produkcji. Braków związanych z pracą urządzeń w zakładzie (układanie i zdejmowanie ze stosów) nie może być więcej niż 1–2%.

Tabela 2.11. Przykładowe zapotrzebowanie na energię elektryczną [191], [206]

Urządzenia	Zapotrzebowanie [kW]	Zużycie [kW/h]
Strefa przygotowania	756	560
Strefa mieszania surowców	264	200
Maszyna formująca	239	180
Razem	1259	940

Uwaga: Podane w tabeli zapotrzebowanie na energię elektryczną dotyczy fragmentu linii technologicznej od strefy przygotowania do maszyny Hatscheka.

Warto zaznaczyć, że płyty włóknisto-cementowe zawierające azbest nie są już w Europie produkowane. Zakłady produkujące płyty włóknisto-cementowe z azbestem znajdują się w Chinach i Kanadzie. Technologia ekstruzji (wyciskania) w produkcji tych płyt jest obecnie wykorzystywana sporadycznie. Nieliczne zakłady znajdują się w Tajlandii i Japonii. Mała popularność metody wynika z konieczności stosowania w procesie produkcji suchej celulozy, która obecnie jest praktycznie niedostępna, co wiąże się bezpośrednio z istotnym obniżeniem parametrów fizykomechanicznych płyt. Dodatkowym mankamentem tej metody są ograniczenia wynikające z wielkości urządzenia produkcyjnego i jego wydajności [206]. Obecnie w Europie najczęściej do produkcji płyt włóknisto-cementowych wykorzystywane są technologie Hatscheka i flow-on. Różnica między nimi polega na zastosowaniu innych maszyn formujących płyty. W przypadku technologii flow-on konstrukcja maszyny jest znacznie prostsza, nie ma kadzi z cylindrami. Choć powoduje to znacznie zmniejszenie kosztów eksploatacji, to w konsekwencji wydajność produkcji jest znacznie mniejsza. Technologia Hatscheka jest obecnie najczęściej wykorzystywana z uwagi na najwyższą wydajność produkcyjną.

2.2.2. Park maszynowy

Linia technologiczna do produkcji płyt włóknisto-cementowych powinna być wyposażona w odpowiedni park maszynowy. W opracowanej przy

współdziale autora technologii produkcji [191] zaprojektowano niezbędny park maszynowy niezbędny do prawidłowego funkcjonowania linii, do którego należą:

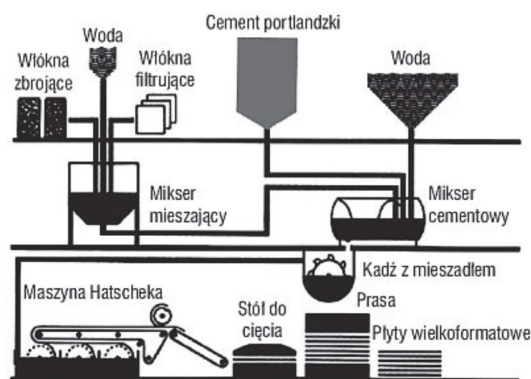
1. maszyny i urządzenia do przygotowania składników do produkcji płyt (strefa przygotowania) oraz maszyny do recyklingu makulatury w celu pozyskania celulozy;
2. maszyna do formowania płyt (maszyna Hatscheke lub flow-on);
3. wstępna obróbka płyt za pomocą cięcia nożami, piły panelowej lub piły wodnej (np. water jet);
4. maszyny, robot lub roboty do sortowania, układania w stosy i przekładania płyt (Stacker, De-Stacker);
5. prasa;
6. suwnica lub lokalnie dźwigi;
7. tunel do wstępnej obróbki cieplnej i dojrzewania płyt;
8. komory klimatyczne do przyspieszenia procesu dojrzewania;
9. maszyna do końcowego suszenia;
10. maszyny do obróbki końcowej płyt – cięcia i frezowania, polerowania powierzchni;
11. urządzenia do nakładania lakieru z możliwością nakładania dodatkowych warstw (np. powłoki antygrafiti, UV);
12. system wózków transportowych;
13. układ elektryczny i układ automatyki;
14. maszyny do pakowania, foliowania;
15. maszyny i urządzenia transportowe (dźwigi, wózki widłowe, samochody dostawcze);
16. przekładki metalowe, płyty metalowe, maszyny do czyszczenia i oliwienia przekładek.

Wymienione urządzenia zostaną syntetycznie opisane w dalszej części pracy.

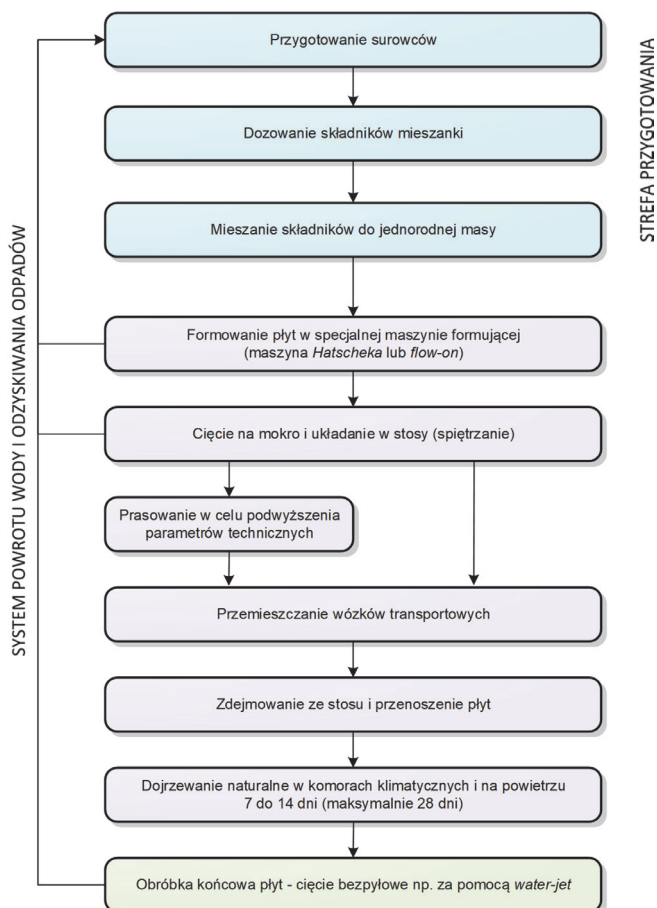
2.2.3. Schemat procesu technologicznego

Na rysunku 2.8 przedstawiono modelowy schemat procesu produkcji płyt włóknisto-cementowych najczęściej pojawiający się w literaturze dotyczącej tego zagadnienia [187].

Na rysunku 2.9 z kolei pokazano ogólny schemat procesu technologicznego produkcji płyt włóknisto-cementowych. Schemat ten pochodzi z opracowanej przy współdziale autora technologii produkcji [191].



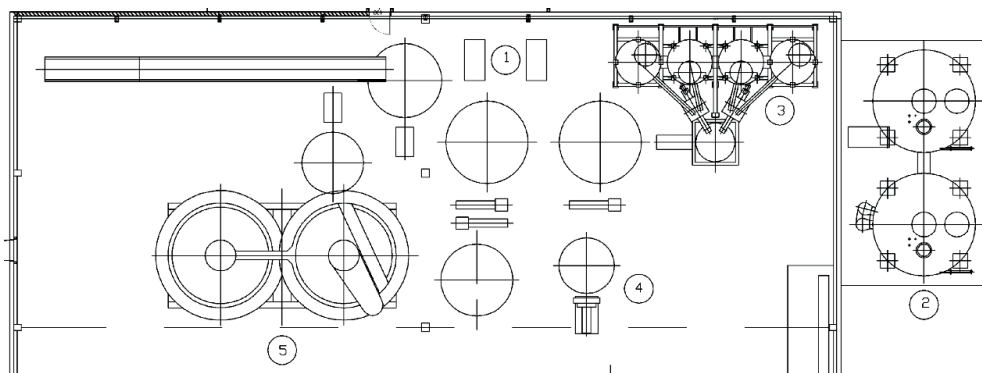
Rys. 2.8. Modelowy schemat procesu produkcji płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem technologii Hatscheka [187]



Rys. 2.9. Ogólny schemat procesu technologicznego produkcji płyt włóknisto-cementowych; oprac. T. Gorzelańczyk na podst.: [191]

2.2.4. Strefa przygotowania i mieszania surowców

Na rysunku 2.10 przedstawiono schemat strefy składowania, przygotowania i mieszania składników według technologii opisanej w opracowaniu [191]. Urządzenia znajdujące się w tej strefie opisano w dalszej części pracy. Fotografie ilustrujące opisywane urządzenia wykonano w zakładzie produkcyjnym, w którym zaimplementowano autorską technologię produkcji płyt włóknisto-celulozowych.



1) Strefa magazynowania celulozy i np. makulatury do pozyskania celulozy, 2) silosy na cement oraz krzemionkę, 3) silosy dziennego zapotrzebowania na materiały sypkie, 4) jednostka mieszająca składniki, 5) zbiorniki na wodę.

Rys. 2.10. Strefa przygotowania i mieszania surowców; oprac. T. Gorzelańczyk na podst.: [191]

Linia technologiczna obejmuje:

- miejsce składowania makulatury, z której będzie pozyskiwana celuloza,
- silos na cement o pojemności około 150–250 m³ z przenośnikiem transportowym,
- silos na krzemionkę o pojemności około 150–250 m³ z podajnikiem ślimakowym,
- silos wapna o pojemności około 80–150 m³ z przenośnikiem transportowym,
- silos kaolinu o pojemności około 80–150 m³ z przenośnikiem transportowym.

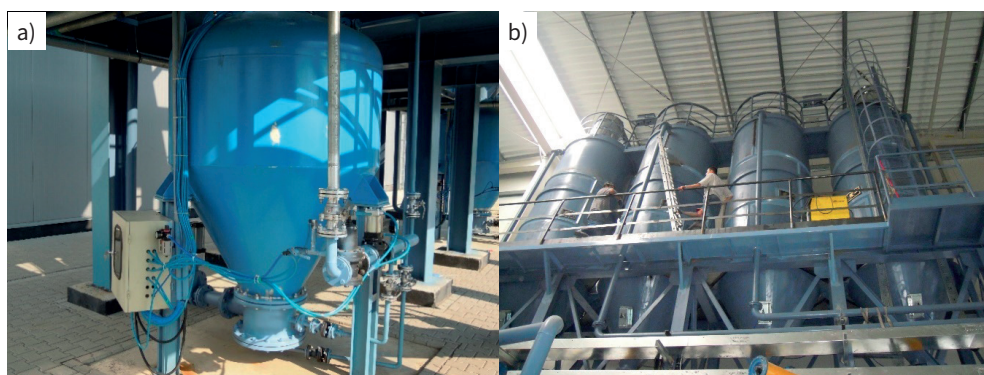
Dodatkowo, w zależności od rodzaju i technologii produkcji płyt włóknisto-cementowych, na linii technologicznej należy przewidzieć:

- kosz dzienny na wapień lub kaolin o pojemności około 5 m³ z podajnikiem ślimakowym,
- kosz dzienny na polioctan winylu (PVA) o pojemności około 5 m³, do ręcznego podawania oraz podajnik ślimakowy.

Na rysunku 2.11 pokazano silosy na materiały sypkie (np. cement i krzemionkę). Silosy te są wyposażone m.in. w system kontroli poziomu wypełnienia silosu, filtry pochłaniające zapylenie, ekran wibracyjny do usuwania zanieczyszczeń z cementu, pneumatyczne systemy otwierania zaworów. Rozładowywanie tych silosów następuje za pomocą stożków wibracyjnych uniemożliwiających blokowanie materiału w silosie, np. po kontakcie z wilgotnym powietrzem. Następnie materiał jest transportowany z użyciem np. przenośnika komorowego (rys. 2.12a) do silosów dziennego zapotrzebowania na surowce, znajdujących się w hali produkcyjnej (rys. 2.12b).

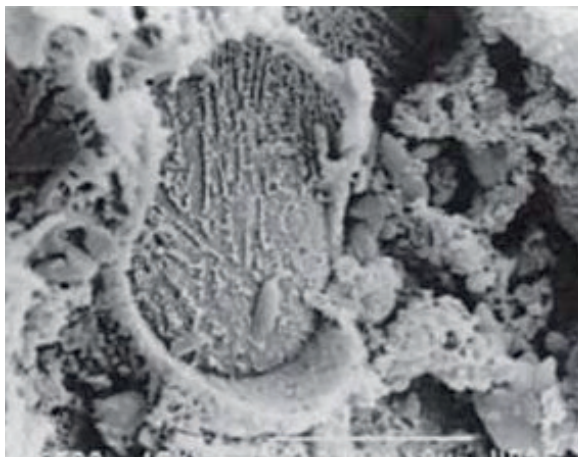


Rys. 2.11. Silosy na materiały sypkie; fot. T. Gorzelańczyk

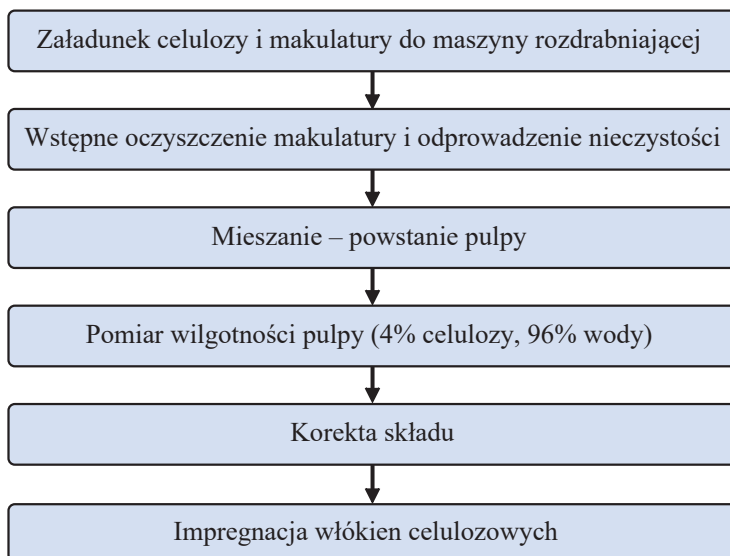


Rys. 2.12. Przenośnik komorowy pod silosem (a) i silosy dziennego zapotrzebowania na surowce (b); fot. T. Gorzelańczyk

Kolejnym etapem procesu jest właściwe przygotowanie włókien celulozowych. Źródłem włókien zbrojących, tj. włókien celulozowych w płytach włóknisto-cementowych jest celuloza pozyskana z materiałów drzewnych lub z makulatury. Przykładowe włókno celulozowe w otoczeniu cementu pokazano na rys. 2.13 [12], natomiast schemat zaprojektowanego procesu przygotowania włókien celulozowych do produkcji na linii technologicznej pokazano na rys. 2.14 [191].

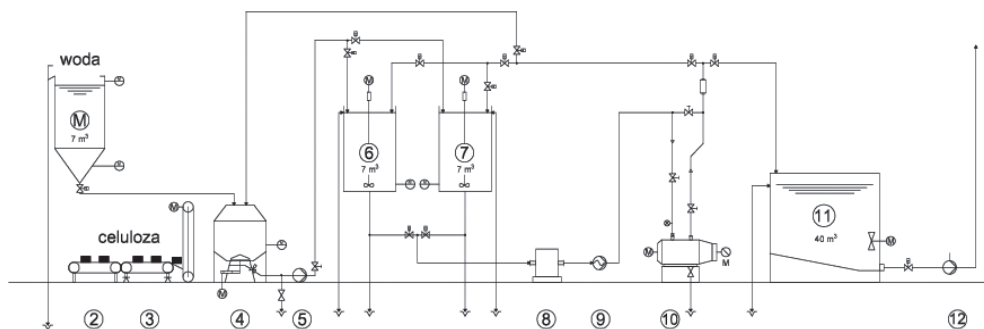


Rys. 2.13. Włókno celulozowe w otoczeniu cementu [12]



Rys. 2.14. Schemat procesu przygotowania włókien celulozowych;
oprac. T. Gorzelańczyk na podst.: [191]

Pierwszym etapem produkcji płyt włóknisto-cementowych jest odpowiednie przygotowanie celulozy w strefie przygotowania. Schemat działania systemu przygotowania celulozy oraz urządzeń wchodzących w skład tego systemu przedstawiono i opisano na rys. 2.15.



1 – zbiornik dozujący wodę, 2 – system podający celulozę i makulaturę do maszyny rozcierającej celulozę na miazgę, 3 – waga, 4 – maszyna do rozcierania celulozy na miazgę (pulper), 5 – pompa do przepompowywania zawiesiny celulozy, 6, 7 – zbiorniki cykliczne, 8 – separator zanieczyszczeń, w szczególności zanieczyszczeń z makulatury, 9 – pompa, 10 – rafiner, 11 – pojemniki magazynowe na celulozę z przepływomierzem i konwerterem do sterowania przepływem celulozy, 12 – pompa dozująca

Rys. 2.15. Schemat działania systemu przygotowania celulozy;
oprac. T. Gorzelańczyk na podst. [191]

Na rysunkach 2.16–2.18 natomiast pokazano wybrane urządzenia wchodzące w skład przedstawionego systemu przygotowania celulozy. I tak, na rys. 2.16 pokazano maszynę do rozcierania celulozy i makulatury, na



Rys. 2.16. Maszyna do rozcierania celulozy na miazgę – pulper (po lewej),
przenośnik taśmowy do podawania celulozy (po prawej); fot. T. Gorzelańczyk

miazgę (pulper) z widocznym przenośnikiem taśmowym. Celuloza z makułatury do pulpera podawana jest w odmierzonych porcjach wynoszących około od 200 do 300 kg każda. Do pulpera dostarczana jest woda, w celu zmiękczenia celulozy i roztarcia jej na miazgę (pulpę). Powstała w ten sposób pulpa charakteryzuje się zawartością celulozy wynoszącą około 4% objętości wagowej.

W celu zabezpieczenia włókien celulozowych przed korozją biologiczną do pulpera dozowany jest środek biobójczy. Równocześnie, w zależności od typu produkowanych płyt włóknisto-cementowych, wraz z celulozą może być dodawany środek hydrofobizujący [191]. Ze zbiornika pulpa transportowana jest do rafinerów, w których następuje kolejny proces przetwarzania celulozy, tj. rafinacja włókien celulozowych. W procesie rafinacji mogą brać udział od jednego do czterech rafinerów (młynków), rys. 2.17.



Rys. 2.17. Rafinerie do przetwarzania celulozy; fot. T. Gorzelańczyk

Po procesie rafinacji pulpa transportowana jest do zbiorników magazynowych. W zależności od potrzeby istnieje możliwość, aby na przykład w jednym zbiorniku przechowywać pulpę, której włókna pozyskiwane z makułatury były impregnowane środkiem hydrofobizującym, a w drugim pulpę, której włókna celulozowe nie były impregnowane [191], [206]. Zbiorniki te wraz z urządzeniami mieszającymi pokazano na rys. 2.18.



Rys. 2.18. Zbiorniki do przechowywania celulozy z systemem pomp; fot. T. Gorzelańczyk

Ostatnim etapem w strefie przygotowania jest jednostka mieszająca wszystkie składniki. Woda, przygotowana celuloza (w tym również celuloza pozyskana z makulatury), cement i wypełniacz (np. kaolin, mączka wapienna, płynna krzemionka) dostarczane są do mieszalnika pokazanego na rys. 2.19. Następnie z mieszalnika za pomocą systemu pomp zarób jest transportowany i gromadzony w zasobniku (rys. 2.20). Zanim zarób trafi do dozownika maszyny do kąpieli cementowej Hatscheka lub flow-on transportowany jest systemem pomp do miksera (rys. 2.21), gdzie dodawana jest woda z systemu odzyskiwania oraz superplastyfikator, środki przeciwpieniące i flokulant. Znajduje się tu także urządzenie do pomiaru konsystencji i gęstości płynnej masy. W razie potrzeby dozowana jest woda lub gęstszy zarób do chwili uzyskania wymaganych właściwości. Stąd gotowy zarób dostarczany jest do dozownika, a następnie kadzi (ang. vat's) maszyny produkcyjnej – maszyny Hatscheka lub flow-on, gdzie następuje formowanie płyty.

W przypadku pozyskania celulozy z makulatury musi ona zostać poddana specjalnej impregnacji, której podlegają włókna celulozowe. Dzięki temu procesowi włókna celulozowe będą miały zwiększoną stabilność biologiczną. Dotychczasowe rozwiązania obróbki celulozy za pomocą związków biologicznie toksycznych dawały ulepszoną odporność na rozpad, jednak te metody obróbki nie były w pełni zadowalające, ponieważ włókna musiały być oczyszczone przed ich zastosowaniem, energochłonność oczyszczania



Rys. 2.19. Mieszalnik o pojemności około 5 m³;
fot. T. Gorzelańczyk



Rys. 2.20. Zasobnik na gotowy zaczyn o pojemności 7,0 m³; fot. T. Gorzelańczyk



Rys. 2.21. Mikser z urządzeniem do pomiaru gęstości płynnej masy; fot. T. Gorzelańczyk

była bardzo duża i utrata długości włókna dość znaczna. Stosowana obróbka włókna celulozowego za pomocą chlorku didecylo-dimetylamonowego (didecyldimethylammonium) (DDAC) (poszczególne słowa dimethyl-etan,

didecyl-didecyl; ammonium chloride – chlorek amonu) lub bromku (DDAB) daje najlepsze rezultaty. Substancje te w połączeniu z niską zawartością miedzi powodują, że produkt cechuje bardzo dobra stabilność biologiczna, bez dużego wzrostu poboru energii oczyszczania lub strat długości włókna [191]. Przygotowane w ten sposób włókno jest doskonałym elementem wzmacniającym wyroby włóknisto-cementowe.

Warto zaznaczyć, że środowisko produkcyjne płyt ze spoiwem cementowym jest silnie alkaliczne. Istnieją dwa problemy związane z zastosowaniem masy celulozowej – jeden podczas produkcji, drugi w eksploatacji. Pierwszy ze względu na ługowanie alkaliczne materiałów nieusuwane z włókien w procesie tworzenia masy. Ogólnie materiały te to resztki rozłożonej ligniny i węglowodanów. Jeżeli występują w nadmiernej ilości, przeszkadzają w procesie twardnienia i mogą mieć szkodliwy wpływ na wytrzymałość wyrobów finalnych. W niektórych warunkach eksploatacyjnych włókna mogą ulegać oddziaływaniu biologicznemu, które również może osłabić wyrób. Problem impregnacji włókien celulozowych szczegółowo opisano już w pracach [191], [206]. Drugi problem występuje z kolei w okresie użytkowania płyt. Włókna celulozowe są wówczas narażone na długotrwały kontakt z wilgocią i alkalicznym środowiskiem matrycy, a także zmienne warunki cieplno-wilgotnościowe. Z czasem prowadzi to do powolnej degradacji chemicznej celulozy (hydroliza alkaliczna, utlenianie), zmniejszenia przyczepności włókien do matrycy, pękania włókien lub utraty ich właściwości mechanicznych, a w efekcie – obniżenia wytrzymałości na zginanie. Proces ten jest przyspieszany przez cykle mokro–sucho i zamarzania–odmarzania, wysoką temperaturę i promieniowanie UV (w płytach elewacyjnych) oraz karbonatyzację powierzchni i migrację alkaliów [9].

2.2.5. Formowanie płyt

Proces formowania płyt włóknisto-cementowych odbywa się automatycznie w maszynie Hatscheka lub flow-on. Na rysunkach 2.22 i 2.23 pokazano maszynę Hatscheka, a na rys. 2.24 maszynę flow-on. Obie maszyny, Hatscheka i flow-on, są w pełni zautomatyzowane. Grubość nawijanej płyty jest kontrolowana laserowo przez system pomiarowy znajdujący się na początku maszyny. W przypadku stwierdzenia nieprawidłowej grubości płyty system automatycznie reguluje gęstość płynnej masy w celu uzyskania wymaganej grubości (gdy płyta jest za cienka, zwiększana jest gęstość masy, natomiast w przypadku, gdy płyta jest za gruba, gęstość masy jest zmniejszana). Proces formowania płyt jest

następujący. Gotowa masa celulozowo-cementowa wylewana jest z dozownika (rys. 2.25) wprost na taśmę (rys. 2.24). Podczas przesuwu taśmy podciśnieniowo usuwany jest nadmiar wody za pomocą systemu odsączania wody. Tak wytworzona odsączona cienka warstwa o grubości około 0,5–0,6 mm nawijana jest na obracający się bęben formujący (rys. 2.26). W zależności od wymaganej grubości płyty na bęben nawijana jest odpowiednia ilość warstw. Po uzyskaniu oczekiwanej grubości, kontrolowanej z wykorzystaniem wielopunktowego urządzenia laserowego, mokra płyta jest odcinana z bębna nożem pneumatycznym umieszczonym na bębnie formującym.



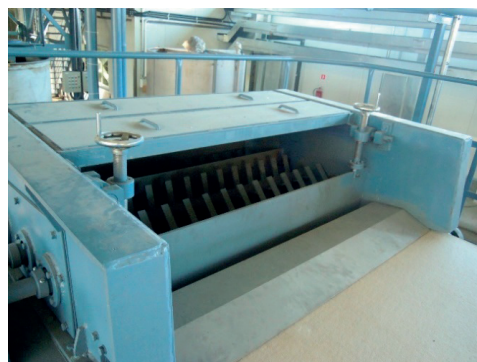
Rys. 2.22. Maszyna Hatscheka w trakcie konserwacji [191]



Rys. 2.23. Maszyna Hatscheka [191]



Rys. 2.24. Maszyna flow-on; fot. T. Gorzelańczyk



Rys. 2.25. Dozownik; fot. T. Gorzelańczyk

Podczas procesu formowania płyty należy uwzględnić późniejsze prasowanie arkuszy płyt. W tym celu trzeba odpowiednio zwiększyć grubość płyty, gdyż w procesie prasowania spadek jej grubości wynosi ok. 20–30%, np. płyta



Rys. 2.26. Bęben formujący maszyny flow-on; fot. T. Gorzelańczyk

o grubości 10,2 mm po sprasowaniu ma grubość 8 mm. Po uzyskaniu wymaganej grubości nawinięta płyta jest rozcinana nożem pneumatycznym znajdującym się na bębnie i układana na przesuwającej się taśmie, na której przenoszona jest do urządzenia w postaci systemu noży obcinającego brzegi (rys. 2.27) lub do piły wodnej „water-jet” w celu uzyskania wymaganych wymiarów.



Rys. 2.27. Urządzenie do przycinania krawędzi arkusza płyty i cięcia na mniejsze formaty (w zależności od jej przeznaczenia); fot. T. Gorzelańczyk

Linia technologiczna z zainstalowaną maszyną Hatscheka ma zdecydowanie większą wydajność od maszyny flow-on, ale jest znacznie bardziej kosztowna w eksploatacji.

W trakcie procesu produkcyjnego powstają mokre odpady z przycinanych płyt. Cięcie płyt odbywa się za maszyną Hatscheka lub flow-on. Tam też powinien znajdować się system odzyskiwania odpadów [161]. Przykładowe urządzenie do odzyskiwania odpadów pokazano na rys. 2.28. Przycięte kawałki transportowane są przenośnikiem taśmowym do śluzy, gdzie za pomocą systemu pomiaru wagi badana jest gęstość odpadów. Następnie odpadki są transportowane do urządzenia odzyskiwania, skąd zaczyn utworzony systemem pomp trafia ponownie do zasobnika. W procesie produkcyjnym zużywane są również znaczne ilości wody. Niewykorzystaną wodę z maszyny produkcyjnej można odzyskać. Służą do tego celu systemy odzyskiwania wody pokazane na rys. 2.29. W trakcie produkcji woda jest wykorzystywana w obiegu zamkniętym, co oznacza, że odzyskana woda trafia ponownie do maszyny produkcyjnej, jest również wykorzystywana w procesie przygotowywania materiałów [191].



Rys. 2.28. Urządzenie do odzyskiwania odpadów; fot. T. Gorzelańczyk



Rys. 2.29. Urządzenie do odzyskiwania wody wraz ze zbiornikiem wody powrotnej; fot. T. Gorzelańczyk

2.2.6. Układanie w stosy

Po docięciu brzegów płyty włóknisto-cementowe przesuwane są na taśmociąg do urządzenia elektropneumatycznego (ang. *Stacker*), które układa kolejne płyty w stos na przemian z płytami (przekładkami) stalowymi (rys. 2.30). Płyty stalowe zapobiegają wzajemnemu sklejanu się płyt włóknisto-cementowych. Powinny być płaskie, pozbawione zanieczyszczeń, które mogłyby odcisnąć się na płycie, i pokryte środkiem antyadhezyjnym, aby można było je

w łatwy sposób rozdzielić. Za urządzeniem układającym płyty w stos znajduje się system przesuwu wózków (ang. *Stack Car Transport System*), za pomocą którego, w zależności od dalszego przeznaczenia płyt, wózki ze stosem poukładanych płyt włóknisto-cementowych ze stalowymi przekładkami przemieszczane są do prasy lub do tunelu obróbki cieplnej.



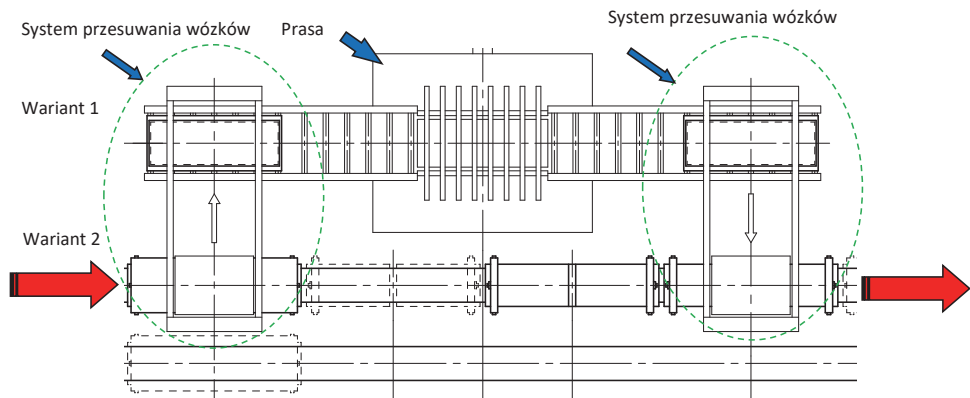
Rys. 2.30. Urządzenie do układania płyt włóknisto-cementowych w stos (Stacker) wraz z systemem przesuwu wózków; fot. T. Gorzelańczyk

2.2.7. Prasowanie płyt

Kolejnym etapem produkcji płyt włóknisto-cementowych jest prasowanie, które ma na celu wyciśnięcie nadmiaru wody zgromadzonej w płytach, powodując jednocześnie uzyskanie lepszych parametrów technicznych tych płyt. Rekomendowana jest na linii produkcyjnej prasa o nacisku 6000–12 000 ton. Płyty włóknisto-cementowe ułożone w stosy na wózkach stalowych można przemieszczać dwiema drogami (ciągami technologicznymi) w zależności od przewidywanej ich dalszej obróbki – dwa warianty (rys. 2.31).

Wariant 1: jeżeli płyty włóknisto-cementowe mają być poddane prasowaniu, przemieszczane są do prasy „górną” trasą (rys. 2.31 u góry).

Wariant 2: jeżeli płyty włóknisto-cementowe mają być dostarczone do tunelu obróbki cieplnej, transportowane są „dolną” trasą (rys. 2.31 na dole). Z kolei na rysunku 2.32 pokazano prasę.



Rys. 2.31. Sposoby przemieszczania płyt włóknisto-cementowych za pomocą wózków; oprac. T. Gorzelańczyk na podst.: [191]



Rys. 2.32. Prasa; fot. T. Gorzelańczyk

2.2.8. Dojrzewanie i pielęgnacja płyt

Po sprasowaniu kolejnym etapem produkcji jest umieszczenie płyt w stosach na wózkach w komorze obróbki cieplnej w celu przyspieszenia ich dojrzewania. Obróbka cieplna w komorze trwa zazwyczaj ok. 8–10 godzin w temperaturze 80°C. Do wykonania komory można użyć zarówno betonu, jak

i elementów stalowych. Istotne jest, aby starannie wykonać izolację termiczną komór oraz kurtyny (najlepiej gumowe) na początku i na końcu tuneli, które mają za zadanie zapobiec stratom ciepła. Na rysunku 2.33 pokazano komorę do obróbki cieplnej. Do komory tej transportowane są wózki z płytami ułożonymi w stosy. Po procesie wstępnego podsuszenia wózki z płytami przesuwane są do urządzenia, gdzie następuje rozładowanie stosów z wózków (ang. *De-Stacker*). Następnie wyjęte przekładki stalowe są oczyszczane i oliwione w służącym do tego celu urządzeniu, skąd specjalnym taśmociągim wracają do urządzenia układającego w stos.



Rys. 2.33. Komora do obróbki cieplnej; fot. T. Gorzelańczyk

Po wstępnym osuszeniu w komorach do obróbki cieplnej płyty włókni-sto-cementowe przechodzą proces dojrzewania naturalnego. W tym celu płyty przenoszone są na wydzielone stanowiska w hali produkcyjnej, gdzie w warunkach powietrzno-suchych dojrzewają od 14 do 28 dni. Aby przyspieszyć dojrzewanie, płyty można umieścić w specjalnej komorze klimatycznej w celu ustabilizowania warunków ich dojrzewania.

Komora klimatyczna została opracowana przy współudziale autora i jest chroniona patentem pt. „Komora klimatyczna do pielęgnacji płyt włókni-sto-cementowych podczas ich dojrzewania i sposób pielęgnacji płyt włókni-sto-cementowych podczas ich dojrzewania” [140]. Rozwiązanie to zostało wdrożone na linii produkcyjnej w zakładzie produkującym płyty włókni-sto-cementowe,



Rys. 2.34. Zaprojektowana komora klimatyczna do pielęgnacji płyt włóknisto-cementowych podczas ich dojrzewania; fot. T. Gorzelańczyk

co pokazano na rys. 2.34. Komora klimatyczna do pielęgnacji płyt włóknisto-cementowych znajduje zastosowanie podczas procesu ich dojrzewania, powodując jego istotne przyspieszenie.

Innym sposobem pielęgnacji płyt włóknisto-cementowych może być ich utwardzenie w autoklawach. Proces autoklawizacji trwa przeważnie od 8 do 15 godzin. Polega on na poddaniu w autoklawach parowych płyt włóknisto-cementowych działaniu nasyczonej pary wodnej o temperaturze od 180 do 190°C i ciśnieniu od 1,0 do 1,3 MPa. Proces autoklawizacji jest bardzo popularny w krajach azjatyckich oraz w krajach Ameryki Południowej, gdzie średnia roczna temperatura wynosi powyżej +20°C i praktycznie nie ma zimy, a co się z tym wiąże – tzw. przejścia przez 0°C, które znacząco niekorzystnie



Rys. 2.35. Piec końcowego wypalania płyt włóknisto-cementowych: z przodu (po lewej), z boku (po prawej); fot. T. Gorzelańczyk

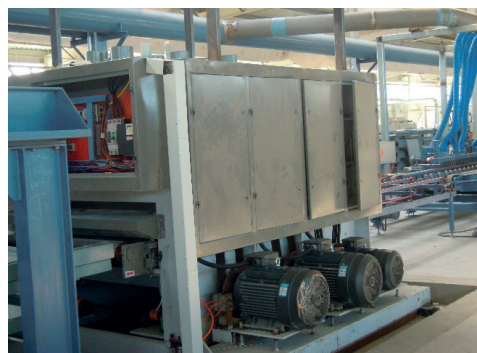
wpływa na wyroby budowlane. Warto dodać, że płyty włóknisto-cementowe poddane przyspieszonemu dojrzewaniu nie sprawdziły się w Europie, szczególnie w części północnej, ze względu na surowy klimat. Płyty autoklawizowane ulegały zdecydowanie szybszej degradacji, widocznej już po pierwszej zimie od czasu ich zamontowania na elewacji [206].

Warto nadmienić, że opcjonalnym etapem produkcji płyt włóknisto-cementowych może być także ich przesuszanie w specjalnym tunelu, zwanym potocznie piecem końcowego wypalania, który pokazano na rys. 2.35.

Proces w piecu podzielony jest na trzy etapy – podgrzewanie, następnie suszenie w temperaturze 120–180°C i chłodzenie. W tym procesie celem jest redukcja zawilgocenia płyt włóknisto-cementowych do poziomu około 4–6%, wymaganej najczęściej przy nakładaniu lakieru lub struktury ozdobnej. W Europie płyty włóknisto-cementowe przemieszczane są przez tunel najczęściej za pomocą przenośnika taśmowego, w krajach azjatyckich natomiast popularne są tzw. przenośniki widelcowe, które pokazano w pracy [206]. Utrzymanie stałych warunków środowiskowych, tj. wilgotności i temperatury powietrza zapewnia w piecu końcowego wypalania system wentylatorów rozprawdzających powietrze w komorach tunelu. Cały proces przesuwu płyt przez tunel z reguły jest zautomatyzowany i kontrolowany. W razie potrzeby zwiększana lub zmniejszana jest prędkość przesuwu. Ma to na celu uzyskanie optymalnych i bezpiecznych warunków dla płyt włóknisto-cementowych. Dzięki temu zabezpiecza się płyty przed ich uszkodzeniem lub niedostatecznym podgrzaniem, a tym samym nieprawidłowym wysuszeniem.

2.2.9. Obróbka końcowa płyt

Jednym z ostatnich etapów produkcji płyt włóknisto-cementowych jest ich cięcie i obróbka krawędzi. Stosuje się także frezowanie krawędzi w celu ułatwienia procesu montażu płyt. Podczas procesu produkcji, szczególnie podczas prasowania, krawędzie płyt mogą ulec uszkodzeniu. Aby produkt końcowy spełniał założone wymagania, należy go poddać obróbce krawędzi, polegającej na ponownym ich docięciu i oszlifowaniu. Do tego celu służą urządzenia pokazane przykładowo na rys. 2.36, natomiast na rys. 2.37 pokazano pilę panelową, tj. urządzenie do cięcia na sucho płyt włóknisto-cementowych na dany wymiar czy formatkę. Na rysunku 2.38 z kolei pokazane jest urządzenie do cięcia na mokro płyt włóknisto-cementowych (ang. *water-jet*). Umożliwia ono wycinanie dowolnych kształtów w płycie.



Rys. 2.36. Urządzenie do obróbki krawędzi płyt włóknisto-cementowych (po lewej), do szlifowania powierzchni płyt (po prawej); fot. T. Gorzelańczyk



Rys. 2.37. Urządzenie do cięcia płyt włóknisto-cementowych na sucho; fot. T. Gorzelańczyk



Rys. 2.38. Urządzenie do cięcia płyt włóknisto-cementowych na mokro (*water-jet*); fot. T. Gorzelańczyk

2.2.10. Nakładanie struktury ozdobnej

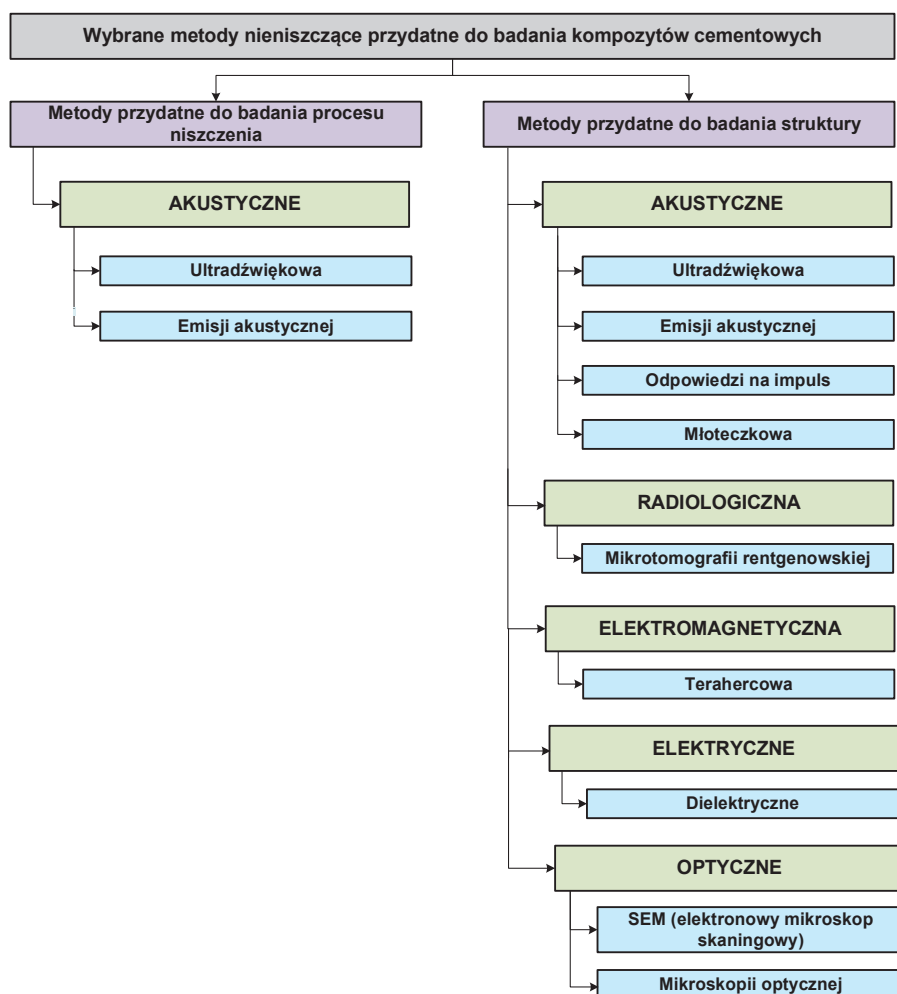
Opcjonalnym etapem na linii technologicznej jest malowanie (lakierowanie) płyt włóknisto-cementowych [77]. Służy do tego specjalna linia lakiernicza, którą przykładowo pokazano na rys. 2.39. Proces malowania podzielony jest na trzy etapy. Pierwszym etapem jest oczyszczenie płyt. Następnie (etap drugi) płyty przemieszczane są do komory lakierniczej, gdzie poddawane są malowaniu podkładem i warstwą właściwą metodą natryskową, kurtynową lub rołkową. Trzecim etapem jest utwardzanie lakieru. Odbywa się to w trakcie przesuwania płyt taśmociągami umieszczonym w podgrzewanych tunelach (*Heating conveyor*) lub odpowiednich piecach.



Rys. 2.39. Wybrane urządzenia wchodzące w skład linii lakierniczej; fot. T. Gorzelańczyk

2.3. Wybrane metody nieniszczące stosowane w badaniach kompozytów włóknisto-cementowych

Z dostępnych w literaturze informacji wynika, że w przypadku włóknisto-cementowych materiałów kompozytowych od kilku lat poszukiwane są metody badawcze, które umożliwiłyby opisanie procesu niszczenia oraz zmian w strukturze tych materiałów pod wpływem czynników produkcyjnych i eksploatacyjnych [178], [206], [221]. Do celu przydatne mogą być metody nieniszczące NDT (ang. *Non-Destructive Testing*), które są wykorzystywane m.in. do określenia wytrzymałości materiałów, różnego rodzaju wad, uszkodzeń i nieciągłości materiałowej, głębokości pęknięć oraz analizy przebiegu i propagacji destrukcji w materiałach i elementach konstrukcyjnych [1], [16], [17], [39], [108], [117], [122], [214], [215]. Do badań materiałów kompozytowych cementowych, kompozytów polimerowych oraz stalowych najczęściej wykorzystywane następujące metody: ultradźwiękowa [5], [6], [8], [27]–[29], [39]–[41], [44], [75], [93], [94], [98], [149], [160], [188]–[190], [216], [218], emisji akustycznej (ang. *acoustic emission*) [3], [10], [46], [53], [54], [59], [60]–[62], [65], [70]–[72], [90], [92], [104], [105], [110], [113], [115], [116], [119]–[121], [127], [128], [130]–[133], [147], [148], [158], [163]–[175], [211], [221]–[225], [233], [236], [238], odpowiedzi na impuls (ang. *impulse response*) [67], [68], [135], młoteczkowa (ang. *impact-echo*) [39], [182], radiologiczna [73], [74], [76], elektromagnetyczna [18], [19], elektryczna [73], [74], [76] oraz metody optyczne [45], [176], [204], [243]. Metody te zestawiono na rys. 2.40, dzieląc je na dwie grupy, tj. metody przydatne do badania procesu niszczenia oraz metody przydatne do badania struktury [206], [221]. Wybrane metody opisano w dalszej części monografii.



Rys. 2.40. Podział wybranych metod nieniszczących przydatnych do badania kompozytów cementowych

Na podstawie informacji dostępnych w literaturze należy zaznaczyć, że płyty włóknisto-cementowe, ze względu na swoją strukturę oraz niewielką grubość nie przekraczającą 15 mm, będą miały inny przebieg procesu niszczenia i co się z tym wiąże, inny zakres możliwych do zastosowania metod badawczych [73], [116], [221]. Biorąc pod uwagę szerokie spektrum metod nieniszczących do badania betonów i różnych kompozytów z matrycą cementową, należy oczekiwać, że będzie przydatne w poszukiwaniu metod właściwych do badania płyt włóknisto-cementowych, co zostało już opisane w pracy [178].

Dotychczasowe wykorzystanie metod nieniszczących do badań płyt włókno-cementowych opisanych w literaturze jest nieliczne. Najczęściej są to badania pilotażowe z użyciem metody ultradźwiękowej [31]–[33] albo metody emisji akustycznej [53], [177]. Badania kontroli mikrostruktury płyt wykonywane były także za pomocą metod terahercowych i rentgenograficznych [2], [3], [193], [204]. Ograniczały się one w zasadzie do prób wykrycia i zlokalizowania różnych wad i imperfekcji powstałych w strukturze płyt. Stanowiły też często metody wspomagające badania wytrzymałościowe płyt włókno-cementowych. Metodę badawczą, która pozwala odróżnić proces destrukcji zawartych w materiałach kompozytowych włókien od procesu destrukcji samej matrycy cementowej oraz szacować zawartość włókien w płycie pod wpływem działania wybranych czynników eksploatacyjnych opisał Szymków w rozprawie doktorskiej [221]. W tym celu bardzo przydatne okazało się połączenie metody ultradźwiękowej i metody emisji akustycznej ze sztuczną inteligencją oraz metody optycznej z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).

Czynniki eksploatacyjne są typowe dla elementów poddanych ekspozycji zewnętrznej. Destrukcyjnym działaniem na płyty włókno-cementowe będzie nie tylko sama wilgoć, niskie temperatury a w szczególności częstym przejściem temperatury przez 0°C w cyklu dobowym (cyklicznym zamrażaniem-rozmrażaniem). Badanie wpływu czynników eksploatacyjnych, takich jak wysoka temperatura, cykle zamrażania – rozmrażania oraz cykle grzania – deszczowania na wytrzymałość na zginanie płyt włókno-cementowych były przedmiotem prac Ardunay’ego, Claramunta, Couttsa, Mohra, Savastano, Toledo Filho oraz Li [7], [9], [20], [26], [34], [35], [95], [112], [123]–[125]. Z kolei wpływ wysokiej temperatury (pirolizy) był przedmiotem badań prowadzonych przez Ranachowskiego i Schabowicza. Były to badania pilotażowe płyt wyprodukowanych metodą ekstruzji [177]. Materiały kompozytowe włókno-cementowe wyraźnie reagują na wilgoć, tj. ulegają rozszerzeniu pod jej wpływem i kurczeniu w momencie suszenia. Może to prowadzić do deplanacji, a w skrajnych przypadkach nawet do lokalnych uszkodzeń. Oddziaływanie cykli zamrażania i rozmrażania jest również czynnikiem istotnym dla tych materiałów kompozytowych. Wynika to z faktu, że woda wnika-jąca w strukturę płyty włókno-cementowej, ulegając zamrożeniu, zwiększa objętość wypełnionych porów. Następnie po rozmrożeniu i ponownym zawilgoceniu zajmuje już powiększoną objętość. Taki proces wielokrotnie powtarzany prowadzi do osłabienia struktury płyty [21], [111]. Z kolei działanie wysokich temperatur i ognia prowadzi do uszkodzenia włókien lub ich całkowitej degradacji, co pokazano m. in. w pracach [2], [9], [177], [179], [209],

[210], [221], a działanie siły zewnętrznej oznacza wprowadzenie dodatkowych naprężeń i ugięć. W przypadku wiatru będą to oddziaływania cykliczne związane z dynamiką siły wiatru. Z kolei działanie czynników chemicznych może powodować karbonatyzację matrycy cementowej, utlenianie włókien lub depolimeryzację celulozy [21]. Porażanie biologiczne celulozy natomiast może wystąpić jedynie podczas nieodpowiedniego jej magazynowania na etapie przygotowania produkcji [38]. W aspekcie wymagań normowych odnośnie do płyt włóknisto-cementowych [154] należy zaznaczyć, że akceptowane jest obniżenie wytrzymałości *MOR* pod wpływem działania czynników eksploatacyjno-klimatycznych. Fakt ten może świadczyć o dopuszczeniu pewnych zmian powstałych w strukturze płyty. Jak już wspomniano, badania normowe opierają się w zasadzie na kontroli wytrzymałości na zginanie *MOR*. Jednak, zdaniem autora, może to być niewystarczające i istnieje potrzeba dokładnego rozpoznania procesów i zmian zachodzących w materiałach kompozytowych włóknisto-cementowych pod wpływem różnych czynników eksploatacyjnych, które z pewnością powodują pogorszenie ich parametrów nie tylko wytrzymałościowych oraz zmiany w ich strukturze. Jest to niezwykle istotne z punktu widzenia trwałości i bezpiecznej eksploatacji płyt włóknisto-cementowych [205]. W tym celu na pewno pomocne będą metody nieniszczące, dające szersze możliwości badawcze oraz możliwość rozpoznania i oceny procesu destrukcji płyt pod wpływem czynników eksploatacyjnych, co już zostało z powodzeniem zainicjowane m.in. w pracy [221].

2.3.1. Metoda ultradźwiękowa

Metoda ultradźwiękowa oparta jest na związkach między prędkością fal sprężystych o wysokiej częstotliwości powyżej 20 kHz, rozprzestrzeniających się w ośrodku stałym, a własnościami tego ośrodka. Jest ona zaliczana do metod impulsowych wykorzystujących drgania mechaniczne zwane ultradźwiękami. Między parametrami fali zachodzi związek opisany równaniem (2.6):

$$\lambda = c \cdot T = c / f, \quad (2.6)$$

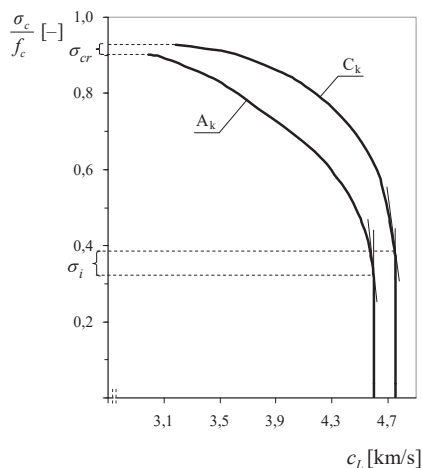
gdzie:

- λ – długość fali [m],
- c – prędkość fali [m/s],
- T – okres drgań [s],
- f – częstotliwość [Hz],

Z teorii ruchu falowego wynika, że prędkość rozchodzenia się podłużnych fal sprężystych w materiale zależy od jego modułu sprężystości i rodzaju składników materiałowych [17], [46]. Na rysunku 2.41 pokazano miernik ultradźwiękowy, a na rys. 2.42 przykładowe wyniki zmiany prędkości podłużnych fal ultradźwiękowych w ściskanych betonach w funkcji przyrostu względnej wartości naprężeń z wcześniejszych badań autora [46].



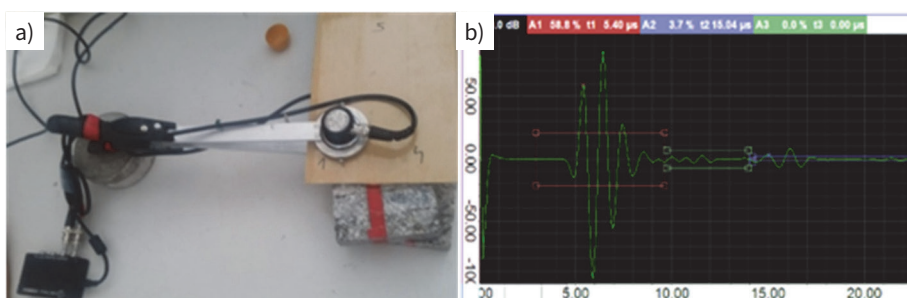
Rys. 2.41. Przykładowy miernik ultradźwiękowy



Rys. 2.42. Przykładowe wyniki zmiany prędkości podłużnych fal ultradźwiękowych w ściskanych betonach w funkcji przyrostu względnej wartości naprężeń [46]

Dotychczas badania metodą ultradźwiękową na szeroką skalę dotyczyły głównie betonu i stali. Niewiele natomiast jest w literaturze zastosowań tej metody do badania kompozytów cementowych (o grubości do 15 mm) i zmian zachodzących w ich strukturze, a w szczególności płyt włóknisto-cementowych. W pracy [230] opisana została metoda do wykrywania delaminacji w elementach kompozytowych za pomocą ruchomej głowicy ultradźwiękowej. Badanie polega na umieszczeniu elementu w basenie z wodą tak, aby zapewnić powtarzalne sprzężenie głowic ultradźwiękowych z testowanym elementem. Czasem stosuje się cienkie maty gumowe pomiędzy badanym obiektem a głowicą ultradźwiękową. Podczas przesuwu głowic po badanym elemencie sygnał elektryczny z głowic zawierający informację o lokalnie występujących delaminacjach przetwarzany jest w cyfrowym defektoskopie ultradźwiękowym na mapy uszkodzeń. Opisane badanie można wykonać głównie w laboratoriach badawczych ze względu na brak praktycznych możliwości przemieszczania całego zestawu diagnostycznego.

Nowatorskie urządzenie ultradźwiękowe do wykrywania delaminacji w płytach włóknisto-cementowych, które przedstawiono na rys. 2.43a, zostało opatentowane przez zespoły z IPPT PAN i Politechniki Wrocławskiej [27], [139], [206]. Urządzenie to umożliwia wykrywanie delaminacji o długości powyżej 10 mm w płytach włóknisto-cementowych o grubości od 4 mm do 40 mm oraz zapewnia wysoką dokładność wyznaczania prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej w badanym materiale przez zastosowanie cyfrowego defektoskopu ultradźwiękowego. Wykrywanie delaminacji w płytach włóknisto-cementowych odbywa się na zasadzie pomiaru lokalnych zmian prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej i porównania ich z prędkością podłużnej fali ultradźwiękowej we wzorcowej próbce pozbawionej delaminacji. Na rysunku 2.43b pokazano przykładowy przebieg fali ultradźwiękowej zarejestrowanej urządzeniem do wykrywania delaminacji podczas badania płyt włóknisto-cementowych.



Rys. 2.43. Urządzenie ultradźwiękowe do wykrywania delaminacji w płytach włóknisto-cementowych: a) fotografia urządzenia, b) przykładowy przebieg fali ultradźwiękowej zarejestrowanej podczas badania [27], [139], [206]

Prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej c_L wyznaczana jest ze wzoru (2.7):

$$c_L = \frac{2g}{(t_2 - t_1)} + c, \quad (2.7)$$

gdzie:

- c_L – prędkość fali ultradźwiękowej,
- t_1 – czas rejestracji pierwszego echa docierającego do głowicy odbiorczej [μs],
- t_2 – czas rejestracji drugiego echa docierającego do głowicy odbiorczej [μs],
- g – grubość płyty włóknisto-cementowej,
- c – poprawka wyznaczana na podstawie pomiaru na znormalizowanym wzorcu o znanej grubości i prędkości fali ultradźwiękowej.

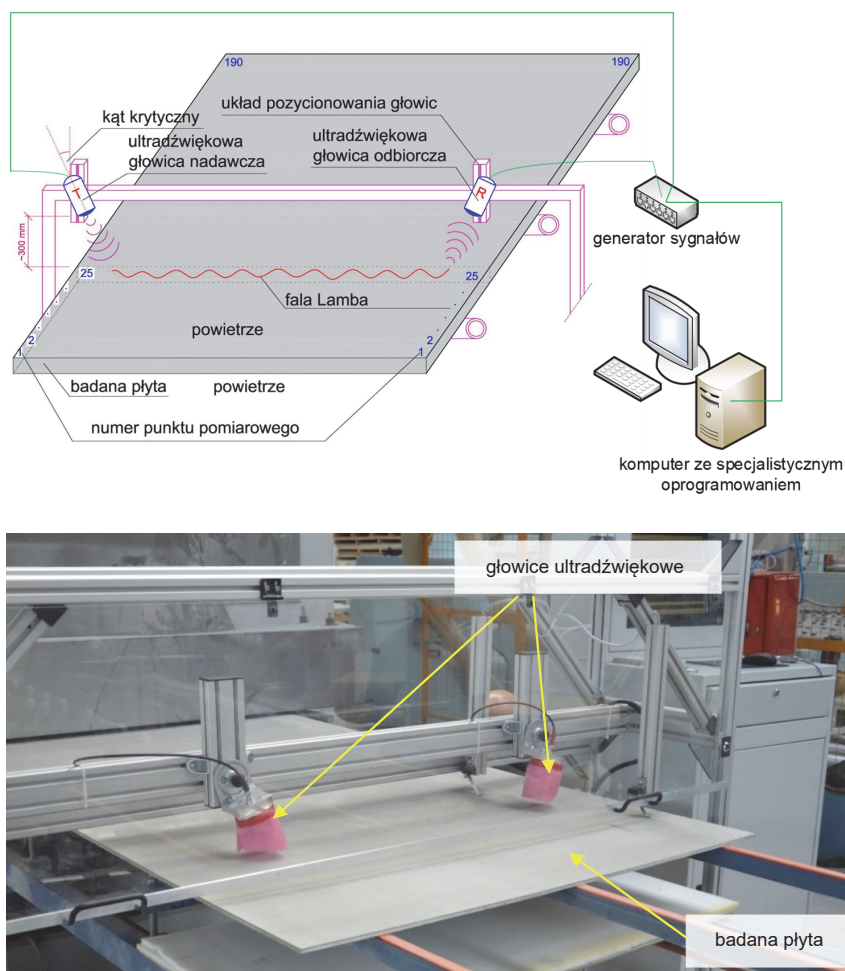
Warto dodać, że w pracy [178] autorzy wykazali, iż wymaganą czułość metod ultradźwiękowych, niezbędną do określenia właściwości strukturalnych cienkich materiałów włóknisto-cementowych, osiąga się dla podobnej długości fali ultradźwiękowej do wielkości defektu. Porównanie prędkości fali podłużnej w płytach włóknisto-cementowych może również posłużyć do potwierdzenia zmiany struktury płyty zachodzącej pod wpływem oddziaływania wysokich temperatur.

Do fal ultradźwiękowych zalicza się także fale płytowe Lamba, które są odmianą powierzchniowych fal sprężystych. Rozchodzą się one w ośrodku ograniczonym dwiema równoległymi płaszczyznami, których odległość jest porównywalna z długością fali i nie przekracza kilku jej długości. Przekazywanie drgań sąsiadnym cząstkom jest wynikiem nakładania się na siebie dwóch fal Rayleigha, biegnących po obydwu powierzchniach w tym samym kierunku [215]. W pracach [6], [8], [28]–[30], [98], [106], [118], [136], [180], [194], [220], [232], [237] zaproponowano wykorzystanie fal płytowych Lamba do bezkontaktowego testowania cienkich elementów, najczęściej o grubości do 15 mm w ograniczonym powierzchniowo zakresie. W pracach [32], [33], [194] przedstawiono możliwość wykorzystania fal Lamba w ultradźwiękowym bezdotykowym skanerze do wykrywania wad w płytach włóknisto-cementowych na etapie produkcji.

Warto nadmienić, że grupa badawcza kierowana przez prof. Krzysztofa Schabowicza przy istotnym współudziale autora niniejszej monografii we współpracy z zespołem prof. Mariusza Kaczmarka z Instytutu Mechaniki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy na zlecenie zakładu produkcyjnego opracowała metodę oraz urządzenie pomiarowe przeznaczone do oceny jakości materiałów płytowych będących w ruchu w sposób bezkontaktowy i nieniszczący z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal płytowych (Lamba). Metoda ta nie wymaga stosowania środków sprzęgających, na przykład cieczy lub materiałów stałych pomiędzy przetwornikami ultradźwiękowymi a badaną płytą. W ramach tej samej współpracy z prof. Kaczmarkiem opracowano także sposób bezkontaktowej kontroli jakości kompozytowych płyt włóknisto-cementowych, w którym wykorzystuje się fale Lamba. Polega on na pobudzeniu odpowiednim sygnałem elektrycznym o modulowanej liniowo częstotliwości przetwornika głowicy nadawczej, przeznaczonego do pracy w powietrzu, z którego pod kątem ostrym względem normalnej do powierzchni płyty emitowana jest ultradźwiękowa fala podłużna wzbudzająca falę Lamba w płycie włóknisto-cementowej. Zarówno sposób, jak i metoda badania oraz urządzenie uzyskały patenty [139], [141], [142]. Należy także zaznaczyć, że z udziałem autora

opisywany układ oraz sposób bezkontaktowej kontroli jakości materiałów płytowych w ruchu zostały wdrożone w zakładzie produkującym kompozytowe płyty włóknisto-cementowe.

Na rysunku 2.44 przedstawiono schemat i fotografię zbudowanego na linii produkcyjnej bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego [33].



Rys. 2.44. Schemat i fotografia stacjonarnego bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego [194];
fot. T. Gorzelańczyk

Układ pomiarowy w postaci stacjonarnego bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego bazuje na wzbudzeniu fali sprężystej w badanym elemencie. Wykorzystuje się tu technikę przechodzącej fali Lamba, wprowadzanej do materiału badanego przez powietrze, bez kontaktu głowic nadawczej (T)

i odbiorczej (R) z testowanym materiałem. Obydwie głowice umieszczone są po tej samej stronie badanej płyty na przeciwległych jej krawędziach, obejmujących całą jej szerokość. Za pomocą tego urządzenia podczas produkcji można wykrywać delaminacje lub ubytki i nieciągłości w strukturze, co w konsekwencji umożliwia wyeliminowanie wadliwej partii płyt. Skanerem tym można również badać rozkład wilgotności po długości płyty.

2.3.2. Metoda emisji akustycznej

Metoda emisji akustycznej (EA) oparta jest na znajomości zjawiska powstawania i rozprzestrzeniania się w danym ośrodku fal sprężystych, powstałych w materiale wskutek wyzwolenia zakumulowanej w nim energii sprężystej [116]. Należy ona do grupy metod pasywnych, to znaczy, że aparatura EA nie emituje sygnałów i nie wpływa na stan fizyczny badanego obiektu, natomiast rejestruje jedynie efekty fizyczne samoistnie powstające w monitorowanym materiale, elemencie itp., w tym proces ich niszczenia i zmiany struktury. Źródłami sygnału emisji akustycznej są powstające i propagujące mikrorysy, procesy korozyjne, pękanie strun w konstrukcjach sprężonych itp. Źródła EA generują fale sprężyste w objętości badanego materiału, a propagują się na powierzchni ograniczającej materiał [174]. Na powierzchni fale te mogą wówczas zostać zarejestrowane przez odpowiednie przetworniki, które przekształcają je na napięcie elektryczne. Najczęściej w badaniach konstrukcji inżynierskich stosowane są czujniki o zakresie pomiarowym od 30 do 450 kHz. Metodą tą można wykryć wszelkiego rodzaju wady materiałowe w całej objętości badanego elementu, nieciągłości, ale także umożliwia on ciągle i przede wszystkim bieżące „śledzenie” badanego elementu pod wpływem oddziaływania czynników zewnętrznych.

Pierwsze prace dotyczące metody emisji akustycznej zapoczątkował J. Kaiser w latach 50. XX wieku [70]. Efektem tych prac było odkrycie nazwane obecnie efektem Kaisera. Polega on na braku znaczących sygnałów emisji akustycznej przy wartości naprężenia mniejszej od wartości wcześniej przyłożonego naprężenia [70], [72], [116]. Przy ponownym obciążeniu znaczące sygnały EA będą generowane dopiero po przekroczeniu uprzedniego naprężenia. Intensywny rozwój emisji akustycznej nastąpił w połowie lat 60. ubiegłego wieku, a wraz z zastosowaniem technik komputerowych w latach 70. zwiększających dokładność pomiarów rozszerzyła się możliwość analizy parametrów EA [116]. Fowley i Gray pod koniec lat 70. wprowadzili współczynniki „Felicity” dla materiałów kompozytowych w związku z pojawieniem się

wyraźnych sygnałów EA przy niższych poziomach obciążenia, pojawiających się w kolejnych cyklach. Był to zupełnie inny efekt niż w przypadku materiałów, w których występuje efekt Kaisera [166]. Dzięki stale udoskonalonej technice pomiarowej emisji akustycznej udaje się odczytać znacznie więcej parametrów (deskryptorów). Najczęściej wykorzystywane deskryptory emisji akustycznej zestawiono w tab. 2.12 [174].

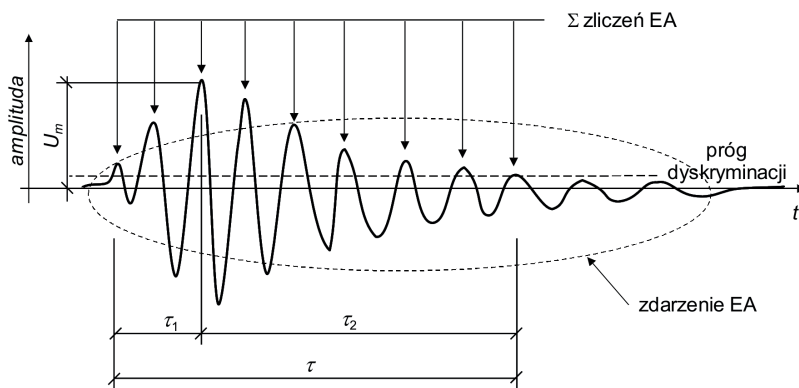
Tabela 2.12. Najczęściej stosowane deskryptory emisji akustycznej [174]

Nazwa deskryptora EA	Dodatkowe wyjaśnienia
Pochodne zmian w czasie	
Suma przekroczeń	Uzyskuje się przez zliczanie obszarów, w których amplituda przekracza próg wykrywalności
Suma zdarzeń całego pomiaru	Suma wszystkich zdarzeń emisji akustycznej zarejestrowanych w serii pomiarowej
Średnia liczba zdarzeń w serii pomiarowej	Suma zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę pomiarów n_{ti} $N_{\text{ær}} = \frac{\sum N_{\text{zd}}}{n_{ti}}$
Liczba przejść przez wybrany poziom amplitud	Liczba przekroczeń 10%, 20%, 50% amplitudy maksymalnej
Pochodne przebiegów czasowych	
Amplituda szczytowa U_m	Maksymalna amplituda w czasie trwania sygnału impulsowego
Średnia wartość amplitudy w serii pomiarowej	Suma amplitud szczytowych wszystkich zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę zdarzeń $U_{\text{ær}} = \frac{\sum U_m}{N_{\text{zd}}}$
Powierzchnia nad wartością średnią	Suma iloczynów kolejnych próbek wartości sygnału i przedziałów próbkowania
Okres półtrwania	Czas trwania sygnału do osiągnięcia połowy amplitudy
Pochodne energii	
Wartość skuteczna za przedział czasu T	$U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$

Tabela 2.12 cd. Najczęściej stosowane deskryptory emisji akustycznej [174]

Pochodne energii cd.	
Współczynnik kształtu	Stosunek U_m do U_{rms}
Energia zdarzenia EA	Połowa iloczynu amplitudy szczytowej i czasu trwania zdarzenia podzielona przez wartość impedancji sensora $E_{zd} = \frac{1}{2} U_m^2 \Delta t / Z$
Średnia energia zdarzeń EA w serii pomiarowej	Suma energii E_{zd} wszystkich zdarzeń EA zarejestrowanych w serii pomiarowej podzielona przez liczbę N_{zd} zdarzeń $E_{\text{ser}} = \frac{\sum E_{zd}}{N_{zd}}$
Pochodne rozkładu częstotliwościowego	
Mediana rozkładu widmowego	Granica podziału rozkładu na części o równej mocy
Współczynnik kształtu prążków widmowych	Stosunek prążka maksymalnego do średniej wartości prążka
Liczba przekroczeń wybranego poziomu przez prążki widma	Liczba przekroczeń 10%, 20%, 50% wartości prążka maksymalnego

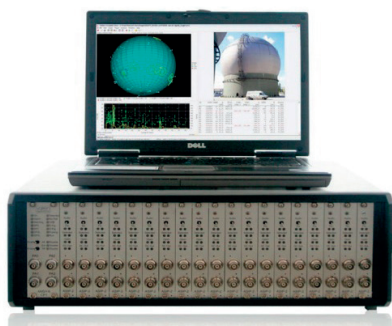
Na rysunku 2.45 pokazano przykładowy pojedynczy impuls emisji akustycznej i jego parametry [46], [116].



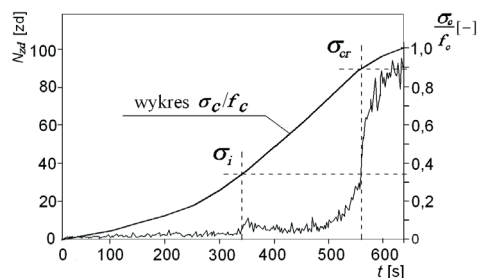
Rys. 2.45. Przykładowy impuls emisji akustycznej: τ – czas trwania impulsu, τ_1 – czas narastania, τ_2 – czas zaniku, U_m – wartość szczytowa amplitudy [46]

Liczba i rodzaj możliwych do odczytania deskryptorów zależą od klasy aparatury pomiarowej. Informacje o badanym elemencie można otrzymać nie tylko na podstawie samych deskryptorów EA, lecz także poprzez odpowiednią

obróbkę otrzymanych sygnałów z wykorzystaniem nowoczesnego oprogramowania, opartego na algorytmach matematycznych, sztucznej inteligencji i transformacji falkowej [115], [116], [166], [171]. Na rysunku 2.46 przedstawiono przykładowy zestaw do badań metodą emisji akustycznej, natomiast na rys. 2.47 pokazano przykładowe rezultaty badań uzyskane przy wykorzystaniu tej metody we wcześniejszych badaniach autora [46].



Rys. 2.46. Przykładowy zestaw pomiarowy do badań metodą emisji akustycznej [79]



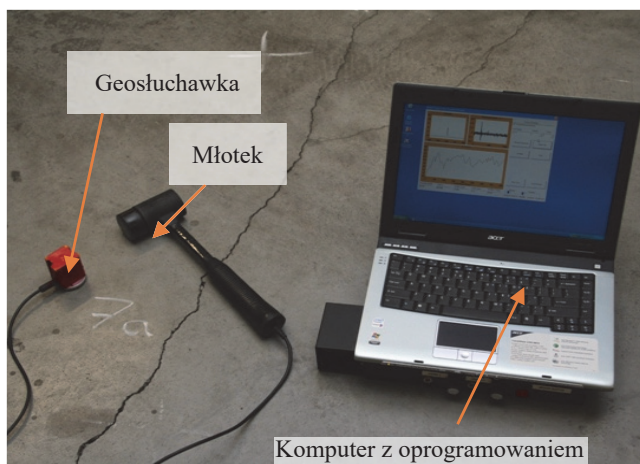
Rys. 2.47. Przykładowy zapis tempa zdarzeń N_{zd} emisji akustycznej wraz z naniesionym wykresem przyrostu względnej wartości naprężeń ściskających w funkcji czasu niszczenia w betonie [46]

Zastosowania metody emisji akustycznej do badań betonu, w szczególności do analizy procesu niszczenia oraz diagnozowania elementów konstrukcji, można znaleźć m.in. w pracach Ranachowskiego, Moczko, Hoły, Goszczyńskiej, Świta, Logonia oraz w pracach własnych autora [46], [60], [70]–[72], [113], [164], [221]. Wykorzystaniem tej metody do badań stali zajmowali się m.in. autorzy prac [115], [148], [225]. Metodę emisji akustycznej stosowano także do badania wielu innych materiałów, takich jak: kompozytów polimerowych [104], ceramiki [147], drewna [127], a nawet produktów spożywczych (chipsów i pieczywa) [61], [119]–[121]. W literaturze jak dotychczas istnieje niewiele informacji na temat badań materiałów kompozytowych włóknisto-cementowych z wykorzystaniem emisji akustycznej. W pracy [130] opisano właściwości akustyczne i tłumienie kompozytów włóknisto-cementowych, a w opracowaniu [177] autorzy opisali pilotażowe badania płyt włóknisto-cementowych produkowanych metodą ekstruzji z wykorzystaniem metody emisji akustycznej w celu określenia wpływu włókien celulozowych na wytrzymałość płyt oraz próby rozróżnienia emitowanych zdarzeń EA przez włókna i matrycę cementową. W pracy [53] na podstawie przeprowadzonych badań autorzy potwierdzają przydatność tej metody do badań płyt

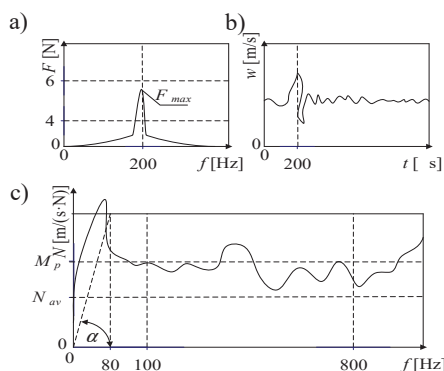
włóknisto-cementowych. Istotne badania identyfikacji stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych produkowanych metodą Hatscheka z wykorzystaniem metody emisji akustycznej przeprowadził Szymków w pracy [221]. Mając na uwadze przedstawioną analizę stanu wiedzy, stwierdzono, że metoda emisji akustycznej będzie właściwa do oceny wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych i wad produkcyjnych na strukturę kompozytów włóknisto-cementowych, dlatego zostanie wykorzystana w badaniach własnych autora.

2.3.3. Metoda odpowiedzi na impuls

Metoda odpowiedzi na impuls IR (ang. *impulse response*) polega na pobudzeniu w badanym elemencie fali sprężystej w wyniku uderzenia w jego powierzchnię skalibrowanym młotkiem ze specjalnym gumowym zakończeniem obucha [67], [68], [73], [75]. Rejestracja sygnału fali sprężystej rozprzestrzeniającej się w elemencie następuje z użyciem geosłuchawki, z równoczesnym jego wzmocnieniem za pomocą wzmacniacza, o częstotliwości do 1000 Hz. Obróbka zarejestrowanych podczas badań sygnałów następuje za pomocą specjalistycznego oprogramowania, zainstalowanego na przenośnym komputerze wchodzącym w skład zestawu pomiarowego. Na rysunku 2.48 pokazano zestaw pomiarowy do badań metodą odpowiedzi na impuls, a na rys. 2.49 przedstawiono przykładowe rezultaty badań uzyskane z użyciem tej metody.

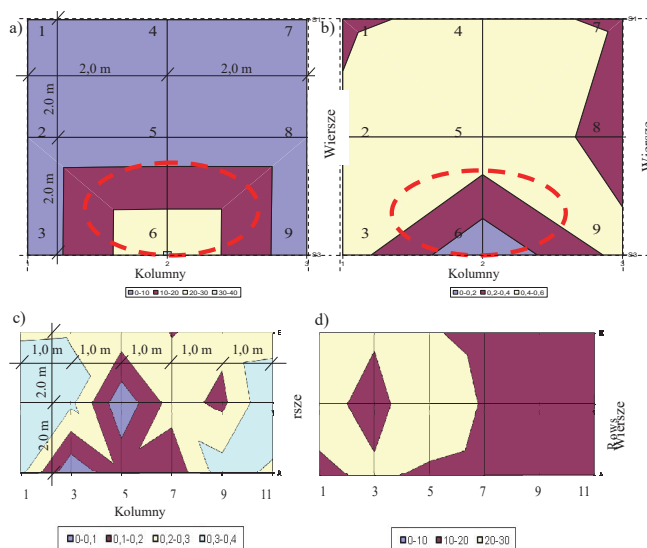


Rys. 2.48. Zestaw pomiarowy do badań metodą odpowiedzi na impuls [73]



Rys. 2.49. Przykładowe rezultaty badań: a) wykres wartości siły sprężystej F wywołanej przez młotek, b) wykres prędkości fali sprężystej zarejestrowanej przez geostuchawkę, c) wykres zmienności N_{av} w funkcji częstotliwości [73]

Wynikiem badań są tzw. mapy rozkładów pięciu charakterystycznych parametrów: średniej zmienności N_{av} (*average mobility*), sztywności dynamicznej K_d (*stiffness*), skoku zmienności M_p (*mobility slope*), średniej zmienności pomnożonej przez skok zmienności $N_{av} \times M_p$ (*mobility times mobility slope*) oraz współczynnika wad v (*voids index*), otrzymane dla badanej powierzchni. Przykładowe mapy rozkładów pokazano na rys. 2.50.

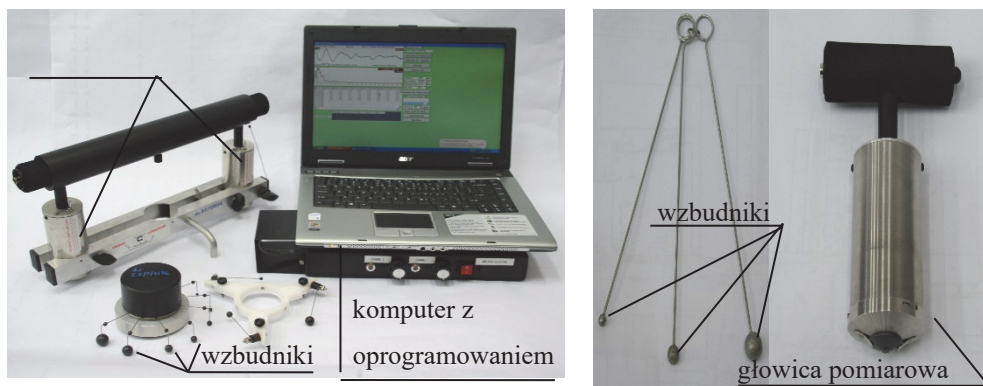


Rys. 2.50. Przykładowe mapy rozkładu dwóch charakterystycznych parametrów otrzymane na powierzchni badanego elementu powierzchni metodą *impulse response*: a) mapa zmienności N_{av} dla posadzki, b) mapa sztywności K_d dla posadzki, c) mapa zmienności N_{av} dla płyty fundamentowej, d) mapa sztywności K_d dla płyty fundamentowej [73]

Metoda ta wykorzystywana jest między innymi do badania płyt i posadzek żelbetowych, sprawdzania długości i ciągłości pali, wykrywania pustek pod płytami betonowymi i żelbetowymi oraz lokalizacji obszarów niejednorodnych w elementach betonowych. Do jej zalet można zaliczyć prosty i szybki sposób badania, niewymagający stosowania środka sprzęgającego geosłuchawki z podłożem, oraz możliwość szybkiego badania płyt betonowych i żelbetowych o dużej powierzchni. Wadami są mała dokładność lokalizacji oraz trudności związane z interpretacją wyników badań. Ponieważ metoda ta jest przeznaczona do badania elementów o grubości powyżej 100 mm, może być nieprzydatna do badania cienkich elementów, w tym włókniasto-cementowych [67], [68], [135]. Uderzenie młotką, jak wykazano na podstawie badań wstępnych, może uszkodzić płytę i z tego powodu metoda ta nie może być przeznaczona do badania płyt włókniasto-cementowych.

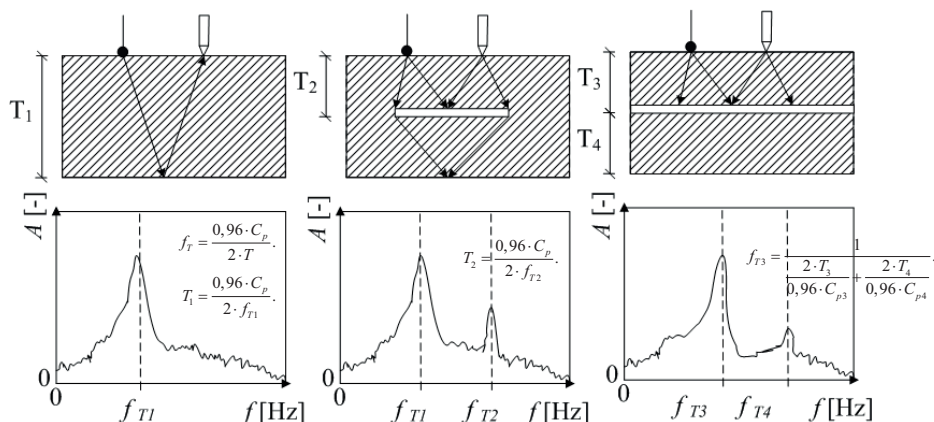
2.3.4. Metoda młoteczkowa

Metoda młoteczkowa IE (ang. *impact-echo*) polega na wzbudzeniu w badanym elemencie fali sprężystej w wyniku uderzenia w jego powierzchnię stalową kulką. Częstotliwość wygenerowanych drgań wynosi od 10 do 150 kHz i zależy od średnicy użytej do badania kulki. Metoda młoteczkowa należy do bardzo często wybieranych metod ultradźwiękowych. Informacje, które otrzymuje się z badania tą metodą, dotyczą uszkodzeń już powstałych. Metoda ta jest przydatna między innymi do określania grubości płyt betonowych i żelbetowych dostępnych jednostronnie, wykrywania w płytach i posadzkach takich defektów, jak rozwarstwienia, odspojenia, wady lokalne, pęknięcia itp. [73].



Rys. 2.51. Zestaw pomiarowy do badań metodą młoteczkową wraz ze wzбудnikami i głowicą pomiarową [73]

Na rysunku 2.51 pokazano zestaw pomiarowy do badań metodą młoteczkową wraz z wzbudnikami i głowicą pomiarową, natomiast na rys. 2.52 przedstawiono przykładowe rezultaty badań uzyskane z użyciem tej metody.



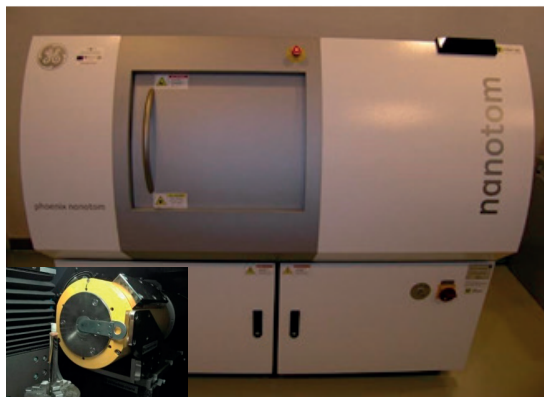
Rys. 2.52. Przykładowe rezultaty badań: a) widmo amplitudowo-częstotliwościowe otrzymane w przypadku pomiaru grubości płyty lub posadzki betonowej, b) widmo amplitudowo-częstotliwościowe otrzymane w przypadku istnienia wady w płycie lub posadzce [73], c) widmo amplitudowo-częstotliwościowe otrzymane w przypadku istnienia w płycie lub posadzce delaminacji między warstwami

Wykorzystanie metody młoteczkowej do wykrycia takich wad, jak delaminacja w elementach betonowych była przedmiotem badań przedstawionych w [39], [135], [182]. Potwierdzono w nich przydatność wykorzystania metody młoteczkowej do wykrycia delaminacji w betonie. W pracach [74]–[76] zaproponowano z kolei, aby metodę młoteczkową stosować łącznie z metodą odpowiedzi na impuls do rozpoznawania delaminacji w elementach betonowych. Kombinacja tych dwóch metod potwierdziła bardziej efektywne rezultaty. Należy zauważyć, że powyższe badania dotyczyły głównie elementów betonowych o grubości ponad 100 mm. Wadą tej metody są powstałe zakłócenia z powodu wielokrotnego odbicia fal, co utrudnia interpretację otrzymanego obrazu. Stąd też wykorzystywanie tej metody do płyt włóknisto-cementowych o grubości znacznie mniejszej, bo wynoszącej około 8 mm, jest niewskazane.

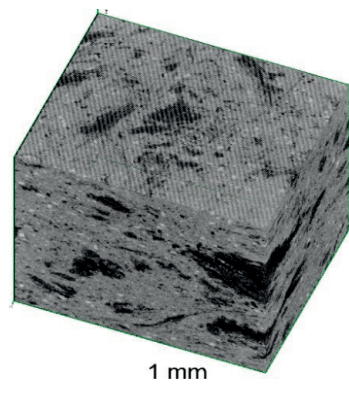
2.3.5. Metoda mikrotomografii rentgenowskiej

Metoda mikrotomografii rentgenowskiej (ang. *mikro-CT*) jest nieniszczącą techniką obrazowania. Jest ona stosowana zarówno do jakościowej wizualizacji wewnętrznych własności materiałów, jak i do pozyskiwania

danych ilościowych. Micro-CT polega na zapisywaniu projekcji promieniowania X badanej próbki pod różnymi kątami. Wizualizowanym parametrem jest współczynnik atenuacji liniowej, który zależy od energii promieniowania X, liczby atomowej oraz gęstości badanej próbki. Na rysunku 2.53 pokazano przykładowy mikrotomograf rentgenowski, a na rys. 2.54 przykładowy obraz struktury matrycy włóknisto-cementowej uzyskany z wykorzystaniem tego urządzenia [178].



Rys. 2.53. Przykład mikrotomografu i użytego w nim źródła promieniowania rentgenowskiego [178]

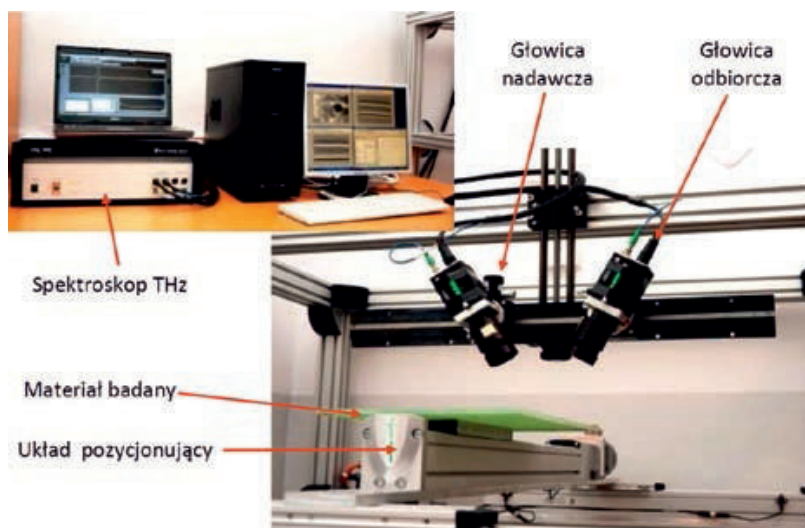


Rys. 2.54. Przykładowy obraz struktury matrycy włóknisto-cementowej uzyskany z wykorzystaniem mikrotomografu rentgenowskiego [178]

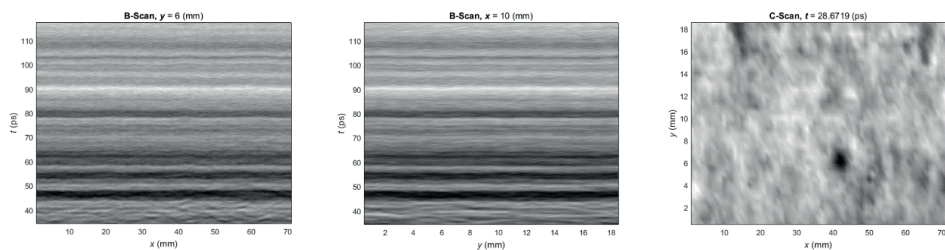
Metoda ta przez ostatnich kilka dekad była wykorzystana przede wszystkim do wizualizacji mikrostruktury materiałów cementowych [42], [109], [114]. Obecnie jest ona owszechnie stosowana w badaniach różnego typu materiałów i kompozytów [129], [176]. W pracy [243] przedstawiono analizę mikrostruktury na cienkich przekrojach barytu za pomocą mikrotomografii rentgenowskiej oraz mikroskopii optycznej. Przy użyciu mikrotomografii możliwe było wizualizowanie rozkładu przestrzennego pęknięć, delaminacji pustek i porów. W pracy [196] natomiast zastosowano tę metodę do określenia delaminacji i regionów o niskiej gęstości w płytach włóknisto-cementowych. Na podstawie rezultatów tych badań pokazano, że zastosowana metoda precyzyjnie pokazuje różnice w mikrostrukturze płyt. Opisana metoda może być stosowana jako przydatne narzędzie do testowania struktury płyt włóknisto-cementowych, w których z powodu błędów produkcyjnych mogą pojawić się defekty. Największą zaletą tej metody jest możliwość przedstawienia mikrostruktury całej objętości próbki w stosunkowo krótkim czasie [178].

2.3.6. Metoda terahercowa

W metodzie terahercowej wykorzystuje się fale elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości 0,5–10 THz i jest coraz częściej wykorzystywana w różnych dziedzinach nauki i przemysłu [242]. Właściwości promieniowania terahercowego (ang. *T-ray*) dają możliwość wykorzystania ich do diagnostyki materiałów kompozytowych. Systemy terahercowe pracujące w dziedzinie czasu przekazują sygnały zawierające dokładną informację o wewnętrznej strukturze materiałów poddanych badaniu. Technologia terahercowa w badaniach nieniszczących jest wykorzystywana do oceny stanu różnych struktur nieprzewodzących, m.in. kompozytów dielektrycznych, powłok malarskich i materiałów ceramicznych. Omawiane urządzenia umożliwiają wykrywanie takich defektów, jak rozwarstwienia, puste przestrzenie, braki kleju, braki żywicy czy nierównomierności wzmocnienia. Na rysunku 2.55 pokazano przykładowo system do badań metodą terahercową [18], a na rys. 2.56 zamieszczono przykładowe obrazy sygnałów zarejestrowanych dla płyty włóknisto-cementowej z wykorzystaniem tej metody [18]. W pracach [18], [19] opisano pilotażowe badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem metody terahercowej. Na podstawie wstępnych badań potwierdzono przydatność zaproponowanej metody do badań płyt włóknisto-cementowych. Sygnały terahercowe mają charakter bardzo zbliżony do uzyskiwanych w metodach ultradźwiękowych. Zaletami T-ray jest duża rozdzielczość sygnałów, pomiar bezkontaktowy i bardzo krótki czas pomiaru.



Rys. 2.55. Przykład systemu do badań metodą terahercową [18]



Rys. 2.56. Przykładowe obrazy sygnałów zmierzonych dla płyty włókno-cementowej z wykorzystaniem metody terahercowej [18]

2.3.7. Metody optyczne

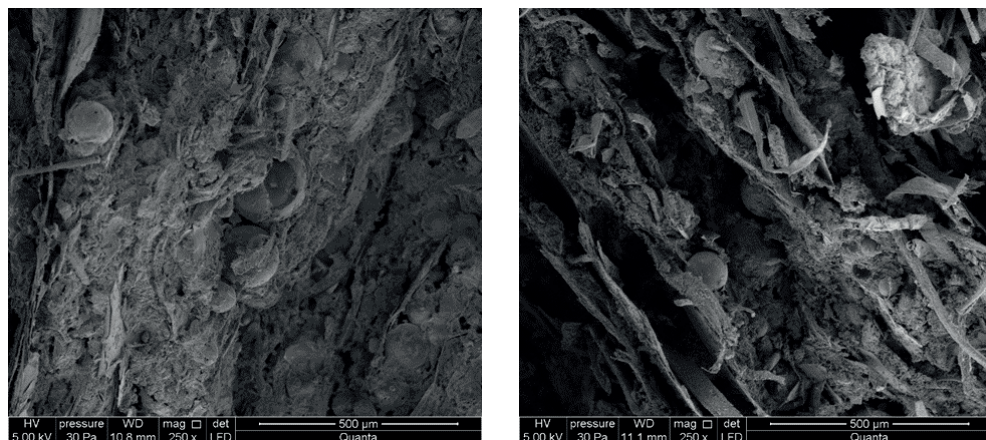
Metoda optyczna wykorzystująca elektronowy mikroskop skaningowy

Mikroskopy elektronowe do tworzenia obrazu wykorzystują wiązkę elektronów, która emitowana jest z katody, przyspieszana w polu elektrycznym i formowana przez układ soczewek elektromagnetycznych. Rozdzielczość uzyskanego obrazu zależy od długości fali elektronów, która jest funkcją użytego napięcia przyspieszającego (im większe napięcie, tym długość fali krótsza i lepsza rozdzielczość) oraz średnicy wiązki. Mikroskopy elektronowe dzieli się na skaningowe i transmisyjne. Metoda optyczna z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego SEM (ang. *Scanning Electron Microscope*) jest powszechnie wykorzystywana do badania mikrostruktury różnych materiałów, w tym kompozytowych [2], [178].



Rys. 2.57. Skaningowy mikroskop elektronowy z analizatorem EDS [2]

Na rysunku 2.57 pokazano skaningowy mikroskop elektronowego z analizatorem EDS (wykorzystany także w opisanych w dalszej części pracy badaniach własnych autora). Z kolei na rysunku 2.58 pokazano przykładowe obrazy płyt włóknisto-cementowych uzyskane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego.

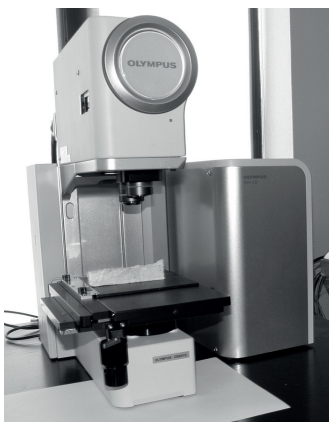


Rys. 2.58. Przykładowe obrazy płyt włóknisto-cementowych uzyskane z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego [2]

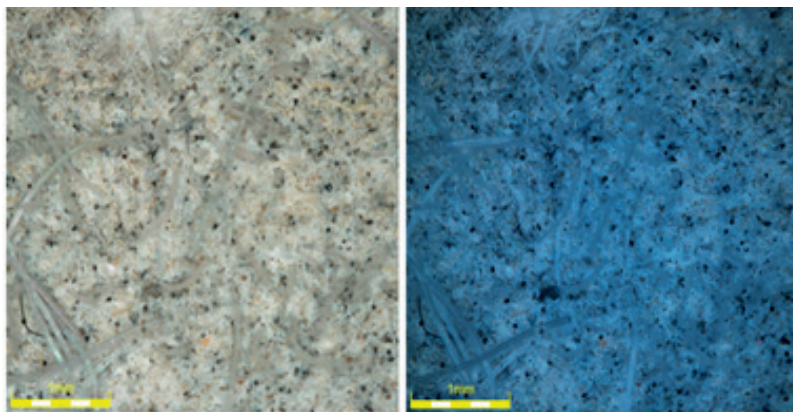
Mikroskopia skaningowa umożliwia ocenę kształtu i wielkości ziaren, morfologii powierzchni, obecności zrostów, wtrąceń, spękań, sposobu zabudowy przestrzeni, kształtu porów. Główną zaletą metody jest bardzo prosta preparatyka. Próbkę mają postać okruchów lub przełamów. Zaletą techniki SEM jest bardzo duże powiększenie, do kilku tysięcy razy, z jednoczesnym uzyskaniem rozdzielczości możliwej do oceny związków cementowych i pojedynczych włókien [9], [45]. Rozwijając tę metodę w wizualizacji materiałów do nanometrycznej wielkości, dąży się do wykrycia wszelkich, do tej pory niewidocznych efektów, spowodowanych oddziaływaniem różnych czynników na strukturę badanego materiału. Nowoczesne metody mikroskopowe zintegrowane z innymi technikami badawczymi, stosowanymi w odniesieniu do materiałów budowlanych umożliwiają korelację między mikrostrukturą a właściwościami materiału [183]. Badania matrycy cementowej wzmacnianej włóknami celulozowymi z zastosowaniem techniki SEM opisano w pracach [9], [25]. W pracy [2] z kolei zaprezentowano wyniki badań skaningowych płyt włóknisto-cementowych poddanych wysokiej temperaturze i zmiennym cyklom zamrażania i rozmrażania. Autor na podstawie badań wstępnych udowodnił przydatność tej metody do próby oceny zmian zachodzących w strukturze kompozytów włóknisto-cementowych pod wpływem wybranych czynników eksploatacyjnych.

Metoda optyczna z użyciem mikroskopu optycznego

Metoda z użyciem mikroskopu optycznego – mikroskopia z rozszerzonym zakresem ogniskowania EFI (ang. *extended focal imaging*) umożliwia obrazowanie dużych obszarów poprzez ręczne przemieszczenie etapu próbki lub w pełni zautomatyzowane skanowanie wspomagane oprogramowaniem. Na rysunku 2.59 pokazano przykładowy mikroskop optyczny, a na rysunku 2.60 obraz struktury matrycy kompozytu włóknisto-cementowego uzyskany z wykorzystaniem tego urządzenia.



Rys. 2.59. Przykładowy mikroskop optyczny [178]



Rys. 2.60. Przykładowe obrazy struktury matrycy włóknisto-cementowej uzyskane z wykorzystaniem mikroskopu optycznego [178]

Analiza polega na wykonaniu kilku zdjęć, które następnie są łączone w jeden obraz. W taki sposób można stworzyć obraz 3D badanej próbki.

Rozwiązanie to eliminuje problemy ze złożonymi, nierównymi powierzchniami lub z wystającymi włóknami, które pojawiają się w przełamach płyt włóknisto-cementowych. Metoda ta umożliwia łatwe zidentyfikowanie rodzajów zastosowanych w materiale włókien. W pracy [178] zamieszczono obrazy płyt włóknisto-cementowych wykonane metodą EFI. Jak dotąd w literaturze pojawiło się niewiele informacji dotyczących zastosowania tej metody do badania kompozytów włóknisto-cementowych.

2.4. Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych w badaniach własnych

W badaniach własnych do rozpoznawania sygnałów uzyskanych w metodzie emisji akustycznej autor wykorzystał sztuczną inteligencję (AI) w postaci sztucznych sieci neuronowych (SSN). Początki tych sieci sięgają roku 1943, kiedy to McCulloch i Pitts opracowali matematyczny model sztucznego neuronu [103]. Udowodnienie w 1969 r. przez Minsky'ego i Paperta, że sieci jednowarstwowe mają ograniczone możliwości zastosowania spowodowało zniechęcenie wielu środowisk naukowych do zajmowania się problemem sztucznych sieci neuronowych [134]. W drugiej połowie lat 80. ubiegłego wieku opracowano model sieci wielowarstwowej i algorytm jej uczenia, znanej dzisiaj pod nazwą algorytmu wstecznej propagacji. Algorytm ten został opracowany w latach 1974–1986 przez Werbosa, Parkera i Rumelharta. Niewątpliwie to opracowanie spowodowało ponowne zainteresowanie sztucznymi sieciami neuronowymi, ponieważ z algorytmu uczenia usunięto wiele ograniczeń dotyczących zastosowań sztucznych sieci neuronowych, wskazywanych przez Minsky'ego i Paperta. Opracowanie w podobnym czasie sieci Kohonena z pamięcią asocjacyjną, sieci Hopfielda ze sprzężeniem zwrotnym, a także sieci ART (ang. *adaptive resonance theory*) [103], [226] było także dużym wkładem w rozwój sztucznych sieci neuronowych.

2.4.1. Podstawowe zagadnienia dotyczące sztucznych sieci neuronowych

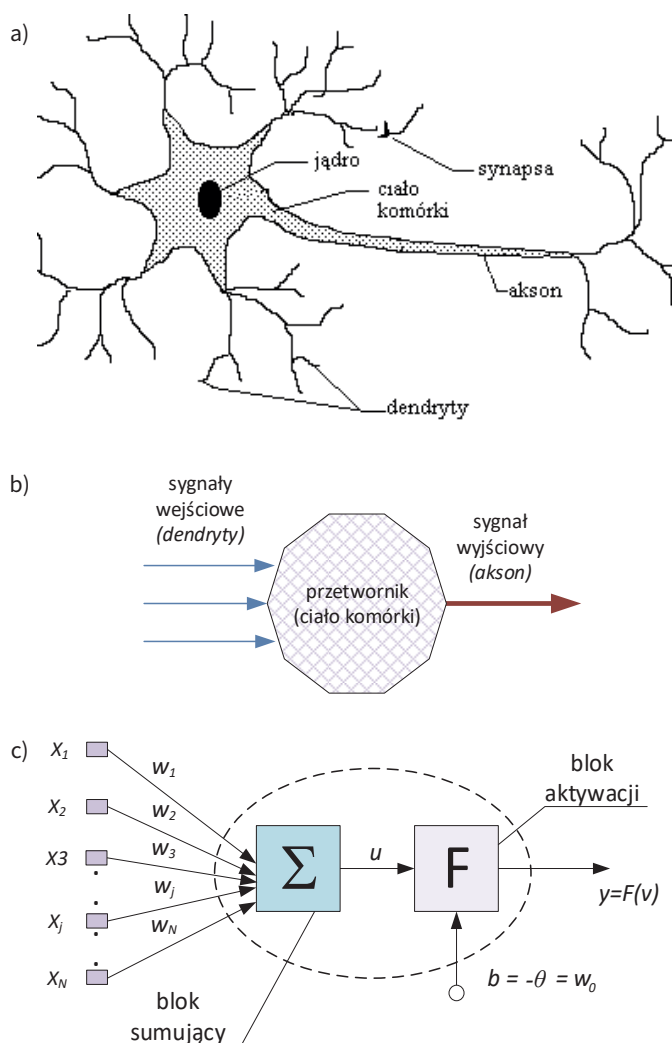
W badaniach własnych wykorzystano określenia dotyczące sztucznych sieci neuronowych (SSN), nazywanych także w literaturze sieciami neuronowymi lub wprost sieciami. W celu lepszego rozumienia w pracy wymieniono i wyjaśniono krótko ważniejsze z nich za [188]. I tak:

- *Sztuczne sieci neuronowe*: uproszczony model biologicznego układu nerwowego, a także struktury, metody i algorytmy mogące go modelować;
- *Typ sieci neuronowej*: zdefiniowana sieć neuronowa pod względem sposobu wzajemnego powiązania neuronów, struktury i algorytmu jej uczenia;
- *Struktura sieci*: system zbudowany z neuronów, które są powiązane ze sobą w określony sposób;
- *Algorytm uczenia*: logiczny ciąg operacji, podający sposób uczenia sieci w celu rozwiązania określonego zadania;
- *Identyfikacja*: rozpoznawanie czegoś lub jego wynik utożsamiania systemu, układu, parametrów obiektu;
- *Predykcja*: przewidywanie cech, zdarzeń, sygnałów wyjściowych lub przebiegu procesu na podstawie danych wejściowych;
- *Dane uczące*: określona liczba sygnałów wejściowych i wyjściowych, otrzymana na podstawie przeprowadzonych badań;
- *Epoka*: jedna operacja zmiany konfiguracji sieci neuronowej w odniesieniu do wszystkich zaprezentowanych wzorców w procesie uczenia;
- *Uczenie sieci neuronowych*: działanie polegające na iteracyjnym dostrajaniu wartości wag na połączeniach między neuronami oraz wartości progowych.

Sztuczne sieci neuronowe stanowią skuteczne narzędzie do rozwiązywania różnych problemów i są powszechnie stosowane w wielu dziedzinach życia. Stosuje się je m.in. do zagadnień optymalizacyjnych, w teorii sterowania i w diagnostyce obiektów technicznych [4], [103]. Najważniejszą cechą sieci neuronowych jest równoległe przetwarzanie informacji. Według autorów publikacji [134] i [226] umożliwia to znaczne przyspieszenie obliczeń, zwłaszcza przy rozwiązywaniu zadań optymalizacji kombinatorycznej.

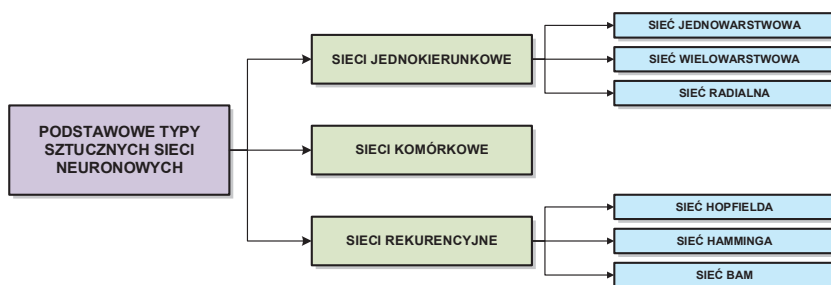
Sztuczną sieć neuronową przedstawia się jako uproszczony model systemu nerwowego, składający się ze znacznej liczby elementów przetwarzających informacje, nazywanych sztucznymi neuronami. Ich pierwowzorem jest neuron biologiczny. Schemat komórki nerwowej wraz z jej cybernetycznym odpowiednikiem przedstawiono na rys. 2.61. Dendryty zbierają sygnały z komórek nerwowych, a sygnały ze wszystkich dendrytów są zbierane i sumowane w ciele komórkowym. Ciało komórkowe wyznacza sygnał wyjściowy przekazywany poprzez akson, który to rozsyła ten sygnał do innych komórek nerwowych poprzez synapsy. Synapsy pobudzają neuron, który za pomocą aksona wysyła sygnał elektrochemiczny o charakterystycznej amplitudzie, kształcie i czasie trwania.

Połączone ze sobą sztuczne neurony tworzą sieć, których struktura jest zazwyczaj warstwowa. Wyróżnia się tu wejścia odbierające sygnały z zewnątrz i wprowadzające je do wnętrza sieci, neurony przetwarzające informację oraz neurony wyjściowe generujące wyniki. Model sztucznego neurona przedstawiono na rys. 2.61. Dendryty stanowią tu wektory wejściowe sieci $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, których sygnałom wejściowym przypisywane są odpowiednie wektory wag $w_i = (w_1, w_2, \dots, w_N)$. Sygnał wyjściowy wyznaczany jest przy pomocy funkcji aktywacji $F(v)$.



Rys. 2.61. Schemat komórki nerwowej (a), cybernetycznego odpowiednika komórki nerwowej (b), model sztucznego neurona (c) [103], [188], [226]

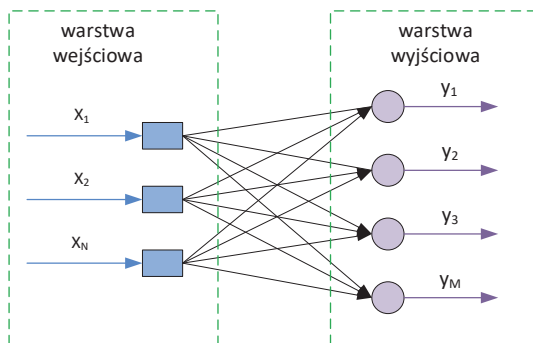
Sztuczne neurony, tworząc sieć, przetwarzają informację w sposób równoległy i można je traktować jako elementarne procesory, a w zależności od sposobu połączenia neuronów wyróżnia się następujące podstawowe typy sztucznych sieci neuronowych: jednokierunkowe, rekurencyjne, komórkowe [103], [134], [188]. Pokazano je na rys. 2.62 i krótko scharakteryzowano w dalszej części pracy.



Rys. 2.62. Typy sztucznych sieci neuronowych [188]

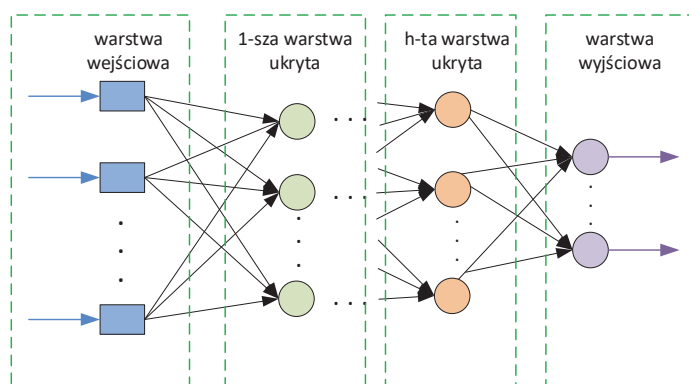
2.4.2. Sieci jednokierunkowe

Sieci jednokierunkowe charakteryzują się jednokierunkowymi połączeniami między elementami przetwarzającymi. Mają one na ogół strukturę warstwową, a połączenia między poszczególnymi warstwami są takie, że każdy element warstwy poprzedniej jest połączony z każdym elementem warstwy następnej, zaś neurony w danej warstwie nie są ze sobą połączone. Do sieci jednokierunkowych zalicza się m. in. sieć jednowarstwową, sieć wielowarstwową i sieć radialną [103], [226]. Sieć jednowarstwową tworzą neurony ułożone w jednej warstwie, warstwie wyjściowej, tak jak pokazano to na rys. 2.63, na którą podawane są sygnały wejściowe.



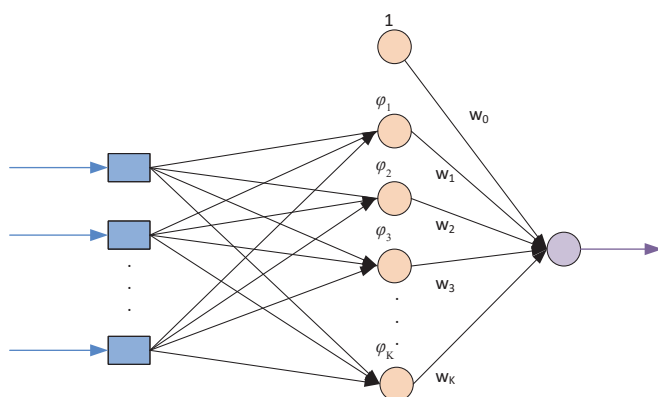
Rys. 2.63. Schemat sieci jednowarstwowej [103], [188]

W sieci wielowarstwowej przetwarzanie odbywa się nie tylko w warstwie wyjściowej, lecz także w jednej lub wielu warstwach ukrytych, stąd też nazwa – sieć wielowarstwowa (rys. 2.64). Sygnały wejściowe są podawane na pierwszą warstwę ukrytą neuronów, a te następnie przekazują je do kolejnej warstwy. Dzieje się tak dlatego, że warstwy są ze sobą połączone. W sieciach tych wykorzystuje się przeważnie uczenie nadzorowane.



Rys. 2.64. Ogólna struktura sieci jednokierunkowej wielowarstwowej [134], [188]

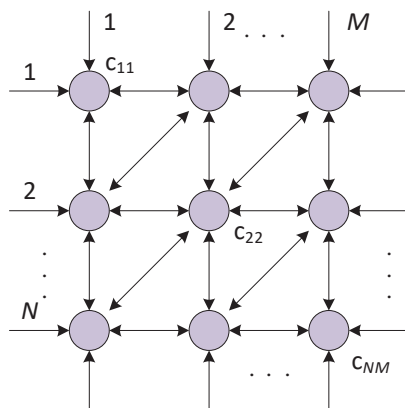
Kolejnym typem sieci jednokierunkowej jest sieć o radialnych funkcjach bazowych. Struktura tej sieci jest identyczna jak sieci wielowarstwowej z jedną warstwą ukrytą, tak jak pokazano to na rys. 2.65. Neurony ukryte odgrywają tu rolę funkcji $\varphi(x)$ zmieniającej się kołowo wokół wybranego centrum, które trzeba określić. Posługując się funkcjami mającymi wartość niezerową tylko w określonej przestrzeni wokół centrum, otrzymuje się aproksymację typu lokalnego.



Rys. 2.65. Ogólna struktura sieci radialnej [134], [188]

2.4.3. Sieci komórkowe

W sieciach komórkowych poszczególne neurony połączone są jedynie lokalnie ze swoimi sąsiadami, a połączenia te są dwukierunkowe i dotyczą neuronów znajdujących się w najbliższym sąsiedztwie, tak jak pokazano to na rys. 2.66. Mają one charakter nieliniowy i są opisane za pomocą układu równań różniczkowych [103], [134].



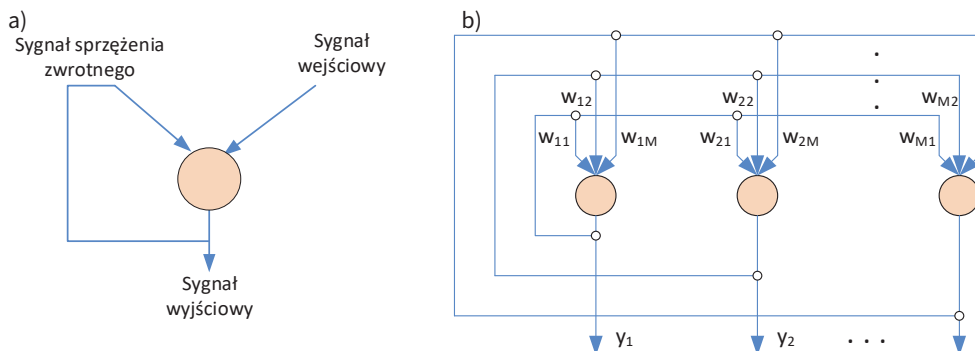
Rys. 2.66. Ogólna struktura sieci komórkowej [103], [134], [188]

W sieciach tych wykorzystuje się przeważnie uczenie nienadzorowane wtedy, kiedy cel uczenia nie jest określony, a jedyne dostępne informacje to korelacje danych wejściowych. Sieć tworzy „kategorie” na podstawie tych korelacji i generuje sygnały odpowiadające kategoriom wejściowym [66], [103].

2.4.4. Sieci rekurencyjne

W sieciach rekurencyjnych połączenia między neuronami są dwukierunkowe [134], [226]. Są to połączenia typu sprzężenia zwrotnego, czyli zawierają sygnały z dalszych neuronów sieci do neuronów warstwy wejściowej lub do wcześniejszych warstw ukrytych. Uproszczoną strukturę takiej sieci pokazano na rys. 2.67a. Ma ona dwa wejścia – jedno w postaci sygnału wejściowego, a drugie stanowi sygnał wyjściowy, tworząc w ten sposób sprzężenie zwrotne [226].

Z kolei przykładami złożonych sieci rekurencyjnych są: sieć Hopfielda (rys. 2.67b), sieć Hamminga i sieć BAM [103], [134], [226]. W sieciach tych nie ma wydzielonych warstw, a poszczególne neurony łączą się na zasadzie „każdy z każdym”.



Rys. 2.67. Sieci rekurencyjne: a) uproszczona struktura neuronowa ze sprzężeniem zwrotnym, b) struktura sieci Hopfielda [188], [226]

Podsumowując przedstawione informacje oraz analizę dostępnej literatury, należy stwierdzić, że sztuczne sieci neuronowe były wykorzystywane w rozwiązywaniu wielu zagadnień mieszczących się w obszarze budownictwa. Szczególnie interesujące jest wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do analiz wyników otrzymanych metodą emisji akustycznej. Na przykład w pracy [164] w badaniu naprężeń termicznych betonu analizowano strukturę widm częstotliwości sygnałów EA, wykorzystując do tego SSN, a w pracy [115] opisano badanie stali narzędziowej z wykorzystaniem metody emisji akustycznej oraz sztucznych sieci neuronowych do analizy otrzymanych wyników. Natomiast w pracy [221] autor z powodzeniem zastosował sieci neuronowe do identyfikacji stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych na podstawie parametrów uzyskanych metodą emisji akustycznej. W pracach tych potwierdzono jednoznacznie przydatność połączenia metody emisji akustycznej i sieci neuronowych w badaniach różnych materiałów, w tym także materiałów kompozytowych włóknisto-cementowych. Najbardziej przydatnym typem sieci neuronowej stosowanym w rozwiązywaniu różnorodnych zagadnień inżynierskich są sieci jednokierunkowe. Między innymi dlatego do wykonania zadań postawionych w niniejszej pracy została wybrana sieć jednokierunkowa wielowarstwowa. Jest to także istotne w aspekcie możliwości odniesienia się autora do wyników dostępnych w literaturze.

2.5. Badania kompozytów włóknisto-cementowych w świetle dotychczasowych badań

W przedstawionej w pracy analizie literatury zdaniem autora pokazano znaczny potencjał badawczy, jaki mają kompozyty włóknisto-cementowe.

Są one innowacyjnym wyrobem budowlanym, który obecnie jest stosowany przede wszystkim jako okładzina zewnętrzna w elewacjach wentylowanych na różnych podkonstrukcjach, a także na pokrycia dachowe lub jako okładzina wewnętrzna [52], [159], [192], [195], [197], [199], [200], [203], [206], [234], [235]. Płyty te jako okładziny stosowane są również z powodzeniem w obiektach rewitalizowanych [51]. Płyty włóknisto-cementowe, jak wiele kompozytów, w szczególności tzw. cienkich, narażone są na powstanie wielu defektów produkcyjnych [33] oraz na oddziaływanie czynników eksploatacyjnych, w tym wysokich i niskich temperatur [126].

2.5.1. Stan wiedzy dotyczącej składu kompozytów włóknisto-cementowych oraz wykorzystywanych metod badawczych

Postęp technologiczny i naukowy umożliwia wykrycie wielu wad i defektów oraz dokładniejsze rozpoznanie procesów zachodzących w różnych materiałach. Badania dotyczące płyt włóknisto-cementowych, choć nieliczne, prowadzone są głównie w krajach Ameryki Południowej, gdzie produkt ten jest bardzo popularny. Badania związane są przede wszystkim z procesem produkcji, jego optymalizacji, w tym autoklawizacji, i dotyczą głównie właściwości mechanicznych tych płyt [9], [21]. Jak już wspomniano, płyty mogą być produkowane w technologii tradycyjnej, tj. Hatscheka, flow-on [22], [78], [206] lub metodą ekstruzji, która jest popularna w krajach azjatyckich [112], [212]. Znane są badania płyt włóknisto-cementowych określające wpływ różnego rodzaju włókien pochodzenia naturalnego, takich jak: eukaliptusa, pszenicy, topoli, sosny, sizalu, wełny owczej, włókien syntetycznych: PVA, PP, PE, materiałów z recyklingu i innych dodatków, na właściwości mechaniczne płyt [7], [9], [11], [26], [50], [58], [78], [97]. Znane są także badania wpływu wysokich temperatur, również cykli zawilgocenia i suszenia, cykli zamrażania i rozmrażania, a także procesu starzenia, ale głównie na wytrzymałość na zginanie *MOR* płyt włóknisto-cementowych [2], [9], [20], [125], [126]. Zdaniem autora niezbędne jest zaproponowanie i wykorzystanie w pracy metod badawczych umożliwiających opisanie procesu niszczenia oraz zmian zachodzących w strukturze płyt włóknisto-cementowych.

W przeprowadzonym przeglądzie literatury dotyczący badań nieniszczących przedstawiono pewien zakres dostępnych nowoczesnych metod i możliwości ich praktycznego wykorzystania w produkcji płyt włóknisto-cementowych. Użycie materiałów o matrycy cementowej i niewielkiej grubości do 15 mm w znacznym stopniu ogranicza możliwość zastosowania wielu spośród

przedstawionych w pracy metod nieniszczących. Jednak mimo tego ograniczenia, biorąc pod uwagę dostępne w literaturze rezultaty, można stwierdzić, że dostępne są metody wystarczające do kompleksowego określenia właściwości materiału, jego struktury, opisu procesu niszczenia pod wpływem wybranych czynników eksploatacyjnych. Oprócz badań opisanych w pracy [221] brak, jak dotąd, informacji w literaturze na temat badań opisujących proces niszczenia oraz zmian w strukturze płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem metod nieniszczących. Dotychczasowe wykorzystanie metod nieniszczących do badań płyt włóknisto-cementowych w literaturze poza pracą [221] i pracami własnymi autora jest sporadyczne i związane przede wszystkim z metodą emisji akustycznej [53], [177], metodą ultradźwiękową [27], [33], [93], metodą terahercową [18], mikroskopową i rentgenograficzną [196], [198], [204] przede wszystkim w celu lokalizacji imperfekcji produkcyjnych, w tym także zawilgocenia wynikającego z niewłaściwego procesu suszenia płyt [48], [49], [194]. Mimo dostępności wielu różnych metod nieniszczących w literaturze można znaleźć stosunkowo niewiele informacji na temat badań płyt włóknisto-cementowych. Obecnie coraz częściej aparatura do badań nieniszczących wyposażona jest w oprogramowanie oparte na złożonych algorytmach matematycznych i sztucznej inteligencji, co umożliwia zaawansowaną i wieloskalową analizę wyników badań, w szczególności dużą rolę odgrywają tutaj sztuczne sieci neuronowe. Są one z powodzeniem wykorzystywane jako praktyczne narzędzie do analizy rezultatów badań, także w budownictwie. Mogą być stosowane do rozpoznawania sygnałów uzyskanych w metodzie emisji akustycznej, co wykazano m.in. w pracach [69], [115], [174], [190], [226], [238].

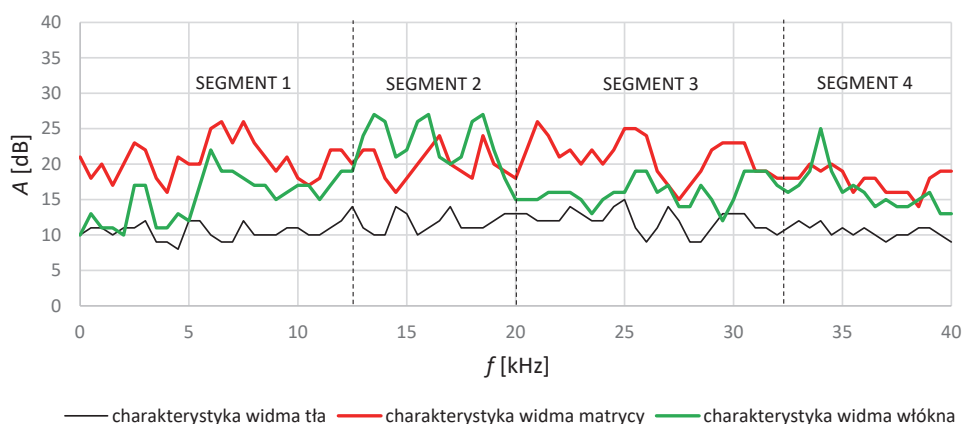
2.5.2. Wpływ wybranych czynników eksploatacyjnych na proces destrukcji i strukturę płyt włóknisto-cementowych w świetle dotychczasowych badań

W nawiązaniu do przedstawionej analizy aktualnego stanu wiedzy należy stwierdzić, że w literaturze dostępne są nieliczne rezultaty badań wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia oraz strukturę płyt włóknisto-cementowych. Na szczególną uwagę zasługuje praca Szymkowska [221]. Celem autora tej pracy była identyfikacja stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury 230°C przez 3 godziny oraz 400°C w wyniku działania ognia w czasie od 1 do 15 minut, przy wykorzystaniu metody ultradźwiękowej, metody emisji

akustycznej, metody optycznej z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego i sztucznych sieci neuronowych. Zamierzeniem autora było opracowanie oryginalnej metodyki umożliwiającej wiarygodną identyfikację stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury oraz jej praktyczna weryfikacja. Wykorzystanie metod nieniszczących oraz sztucznych sieci neuronowych posłużyło do określenia i zidentyfikowania stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury. Zakres badań obejmował pięć serii płyt włóknisto-cementowych, różniących się parametrami technicznymi, składem, technologią produkcji oraz obszarem zastosowania.

Na podstawie rezultatów z przeprowadzonych badań określono trzy stopnie destrukcji – destrukcja nieistotna, istotna oraz krytyczna. Poszczególne stopnie destrukcji zostały zidentyfikowane przez rozpoznanie zdarzeń towarzyszących pękaniu włókien z zarejestrowanych sygnałów emisji akustycznej z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Przedstawienie zależności pracy łamania W_f od zdarzeń pochodzących od pękania włókien zarejestrowanych podczas trójpunktowego zginania umożliwiło odpowiednie sparаметryzowanie stopnia destrukcji płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania wysokich temperatur. W pracy [221] wykazano, że praca łamania W_f zależy od zawartych w płytach włóknisto-cementowych włókien, a co za tym idzie – od liczby zdarzeń emisji akustycznej pochodzących od pękania włókien dla płyt poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury. Wraz ze spadkiem liczby odczytanych zdarzeń EA pochodzących od pękania włókien praca łamania W_f odpowiednio maleje. Zależność ta pozwoliła na sparаметryzowanie stopnia destrukcji.

Ponadto, wykorzystując metodę emisji akustycznej, w tym deskryptory, takie jak: suma zdarzeń ΣN_{zd} , tempo zdarzeń N_{zd} , energia zdarzeń E_{zd} oraz rozkład częstotliwościowy, zidentyfikowano i rozróżniono sygnały pękania włókien od sygnałów pękania matrycy cementowej. Sygnał towarzyszący pękaniu włókien charakteryzuje się wysoką aktywnością akustyczną w przedziale częstotliwości 12–20 kHz oraz 32–40 kHz. Sygnał pojawiający się w trakcie pękania matrycy charakteryzuje się zwiększoną aktywnością akustyczną w zakresie częstotliwości 5–10 kHz oraz 20–32 kHz. Na rysunku 2.68 przedstawiono zapis wzorcowych charakterystyk widma akustycznego sygnału towarzyszącego pękaniu matrycy cementowej, włókna oraz dla tła (wg [221]). Opisana charakterystyka widm przypisanych dla sygnałów pojawiających się w trakcie pękania włókien i matrycy została potwierdzona we wszystkich badanych seriach płyt włóknisto-cementowych.

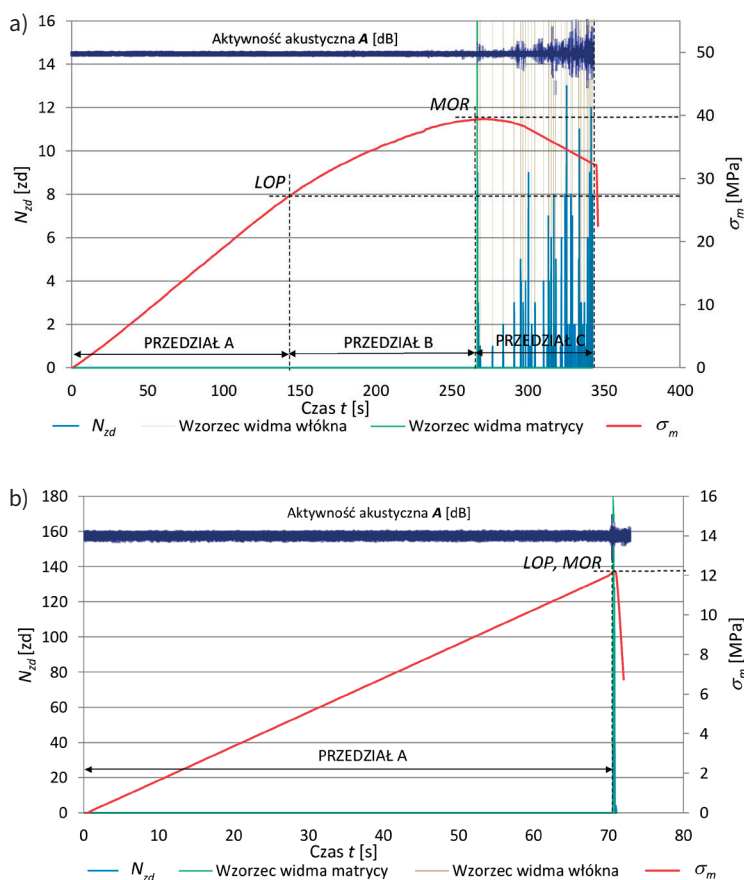


Rys. 2.68. Charakterystyka widma akustycznego tła, włókna oraz matrycy cementowej w funkcji częstotliwości [221]

W pracy [221] opisano zarejestrowane za pomocą sztucznych sieci neuronowych i wytypowanych wzorcowych charakterystyk widm emisji akustycznej zdarzenia wraz z przypisaniem ich do wzorców widma akustycznego towarzyszącego pękaniu włókien lub matrycy cementowej.

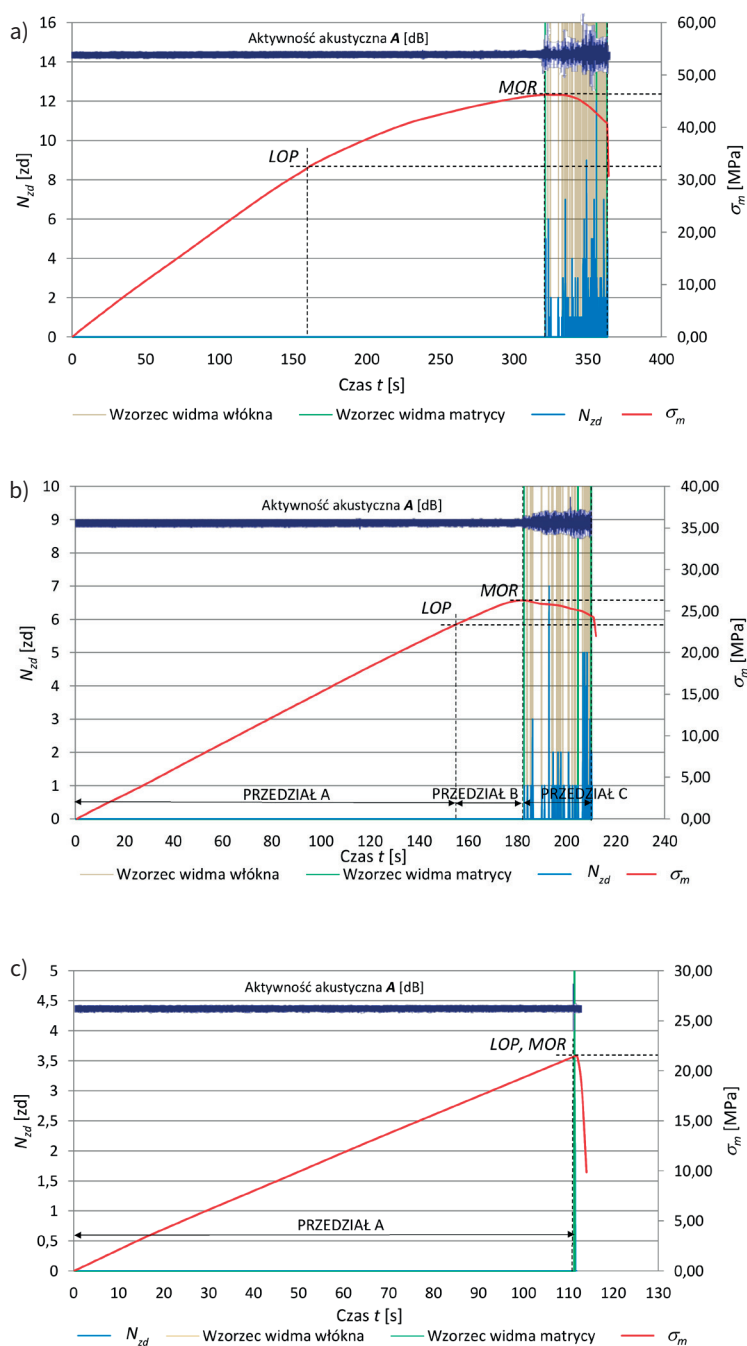
Najważniejsze wnioski wynikające z badań przeprowadzonych w pracy [221], opublikowanych również w [59], [207], [208] są następujące:

1. Włókna w płytach włóknisto-cementowych ulegają całkowitej destrukcji w temperaturze 230°C po 3 godzinach. Zostało to potwierdzone poprzez brak rozpoznanych zdarzeń emisji akustycznej EA towarzyszących pękaniu włókien. Zniszczenie podczas zginania płyt włóknisto-cementowych następuje przez kruche wysokoenergetyczne pęknięcie. Pod wpływem temperatury badane płyty włóknisto-cementowe uległy istotnej lub krytycznej destrukcji [208], [221]. Fakt ten został przykładowo pokazany na rys 2.69 dla wybranej płyty referencyjnej i płyty poddanej działaniu temperatury 230°C przez 3 godziny [221].
2. Oddziaływanie wysokiej temperatury w wyniku działania ognia wpływa destrukcyjnie na płyty włóknisto-cementowe. Wraz z czasem oddziaływania temperatury włókna ulegają stopniowej destrukcji, co objawiało się spadkiem liczby zdarzeń EA rozpoznanych jako towarzyszące pękaniu włókien oraz spadkiem pracy łamania W_f . Płyty zawierające większą liczbę włókien uległy gwałtownej krytycznej destrukcji, płyty zawierające mniejszą liczbę włókien podczas oddziaływania temperatury uległy stopniowej destrukcji. Na rysunku 2.70 przedstawiono przykładowe wyniki rozpoznania wzorców widma akustycznego matrycy



Rys. 2.69. Przykładowy przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych dla: a) płyty referencyjnej, b) płyty poddanej oddziaływaniu temperatury 230°C przez 3 godziny [221]

cementowej i włókna płyt poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury 400°C kolejno przez 2,5, 7,5 oraz 10 min. Naniesiono je na zapisie tempa zdarzeń N_{zd} oraz przebiegu naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu. Na wykresach naniesiono również zapis aktywności akustycznej A [207], [221]. Oddziaływanie wysokich temperatur cechowało się także zwiększeniem prędkości fali ultradźwiękowej c_L , zwiększeniem wartości modułu Younga E_D , liniowym przebiegiem naprężeń zginających σ_m podczas próby trójpunktowego zginania, zrównaniem granicy proporcjonalności LOP z wytrzymałością na zginanie MOR oraz zwiększeniem energii zdarzeń emisji akustycznej E_{zd} pochodzących od kruchego pęknięcia matrycy cementowej.



Rys. 2.70. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych płyt poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury 400°C przez: a) 2,5 min, b) 7,5 min, c) 10 min [221]

3. Potwierdzono zależność prędkości fali ultradźwiękowej w płytach włókno-cementowych zarówno od gęstości objętościowej ρ płyt włókno-cementowych, jak i od modułu Younga E_D . Metoda ultradźwiękowa z użyciem defektoskopu ultradźwiękowego umożliwia zgrubne określenie miejsca destrukcji w płytach włókno-cementowych przez pomiar i porównanie prędkości fali podłużnej rozchodzącej się wewnątrz płyty [179], [221].

2.5.3. Podsumowanie przeglądu literatury

Na podstawie opracowanej analizy stanu wiedzy stwierdzono, że dotychczasowe badania kompozytów włókno-cementowych związane są przede wszystkim z procesem ich produkcji, jego optymalizacji, w tym autoklawizacji, i dotyczą głównie właściwości mechanicznych tych płyt. W literaturze znaleźć można także wyniki badań płyt włókno-cementowych określające wpływ różnego rodzaju włókien na właściwości mechaniczne płyt. Znane są badania wpływu wysokich temperatur, cykli zawilgocenia i suszenia, cykli zamrażania i rozmrażania, a także procesu starzenia, ale dotyczące jedynie wytrzymałości na zginanie MOR płyt włókno-cementowych.

Jak wykazano, dostępne w literaturze rezultaty badań dotyczą głównie oceny wpływu czynników technologicznych (związanych ze składem lub procesem produkcji) oraz niektórych eksploatacyjnych na określaną wytrzymałość na zginanie MOR płyt włókno-cementowych. Zdaniem autora zakres tych informacji nie odpowiada w pełni potrzebie badawczym kompozytów włókno-cementowych.

Badania Szymkowa [221] wykazały jednoznacznie, że włókna w płytach włókno-cementowych ulegają całkowitej destrukcji w temperaturze 230°C po 3 godzinach. Zostało to potwierdzone to przez brak rozpoznanych zdarzeń emisji akustycznej EA towarzyszących pękaniu włókien. Zniszczenie podczas zginania płyt włókno-cementowych następuje przez kruche wysokoenergetyczne pęknięcie. Pod wpływem temperatury badane płyty włókno-cementowe uległy istotnej lub krytycznej destrukcji.

Oddziaływanie wysokiej temperatury w wyniku działania ognia powoduje z kolei, że wraz z czasem oddziaływania temperatury włókna ulegają stopniowej destrukcji, co objawiało się spadkiem liczby zdarzeń EA rozpoznanych jako towarzyszące pękaniu włókien oraz spadkiem pracy łamania W_f . Oddziaływanie wysokich temperatur charakteryzowało się także zwiększeniem prędkości fali ultradźwiękowej c_L , zwiększeniem wartości modułu

Younga E_D , liniowym przebiegiem naprężeń zginających σ_m podczas próby trójpunktowego zginania, zrównaniem granicy proporcjonalności LOP z wytrzymałością na zginanie MOR oraz zwiększeniem energii zdarzeń emisji akustycznej E_{zd} pochodzących od kruchego pęknięcia matrycy cementowej.

Podsumowując dokonany w pracy przegląd stanu wiedzy, wykazano, że brakuje badań kompozytów włóknisto-cementowych dotyczących wpływu:

1. niskiej temperatury, w szczególności cyklicznego zamrażania-rozmrażania,
2. wysokich temperatur i oddziaływania pożaru,
3. promieniowania UV.

W związku z powyższym w dalszej części pracy autor podjął wyzwanie uzupełnienia luki wynikającej z aktualnego stanu wiedzy i wyznaczył nowe cele naukowe. Głównym celem naukowym autora była ocena wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na strukturę i proces niszczenia kompozytów włóknisto-cementowych. Czynnikiem eksploatacyjnym, których wpływ wzięto pod uwagę, było: cykliczne zamrażanie-rozmrażanie, promieniowanie UV (badania starzeniowe), wysoka temperatura 230°C oraz oddziaływanie pożaru.

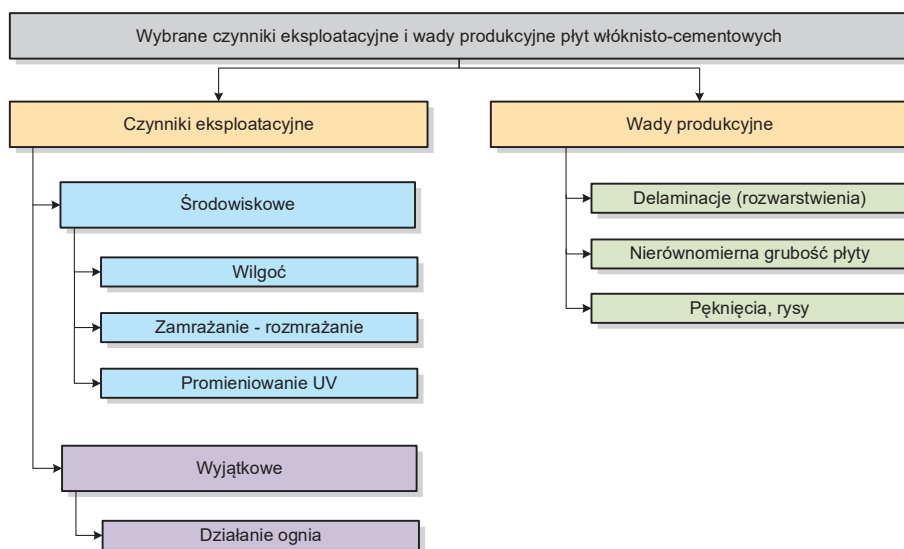
W badaniach wykorzystano metodę emisji akustycznej w połączeniu ze sztuczną inteligencją, metodę optyczną z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego oraz metodę nanoindentacji.

Kolejnym celem naukowym stała się identyfikacja imperfekcji materiałowych (wad produkcyjnych), takich jak delaminacje i rysy. W tym celu wykorzystano bezkontaktowy skaner ultradźwiękowy.

Końcowym rezultatem praktyczno-aplikacyjnym, podsumowującym uzyskane rezultaty i wysunięte na ich podstawie wnioski, było opracowanie oryginalnej metody umożliwiającej rzeczywistą ocenę wpływu wymienionych wyżej czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i zmiany w strukturze płyt włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym.

3. Zakres badań własnych i metodyka analiz

W pracy przedstawiono badania doświadczalne obejmujące grupę wybranych czynników eksploatacyjnych i imperfekcji materiałowych, wynikających z wad produkcyjnych, stanowiących lukę w badaniach materiałów kompozytowych włóknisto-cementowych. Czynniki te wyszczególniono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Wybrane czynniki eksploatacyjne i wady produkcyjne płyt włóknisto-cementowych

Badania własne w zależności od analizowanego czynnika i możliwości badawczych (wynikające również ze współpracy z innymi ośrodkami badawczymi) obejmowały od jednej do pięciu serii płyt włóknisto-cementowych oznaczonych literami od A do E. Przedmiotem badań były płyty płaskie do zastosowań zewnętrznych i wewnętrznych na ściany i sufity, określone zgodnie z normą [154]. Płyty poszczególnych serii różniły się parametrami technicznymi, składem, technologią produkcji oraz obszarem zastosowania i stanowiły reprezentatywną próbę dostępnych na rynku budowlanym tego typu wyrobów budowlanych. Podstawową metodą badawczą wykorzystywaną do oceny procesu niszczenia płyt włóknisto-cementowych była metoda emisji akustycznej. Wspomagająco wykorzystano metodę optyczną z użyciem mikroskopii skaningowej (SEM). Badania z wykorzystaniem metody emisji akustycznej wykonywano w próbie trójpunktowego zginania. W trakcie

tego badania rejestrowano obciążenie F , odkształcenie ε oraz sygnały emisji akustycznej EA. Do określenia stopnia destrukcji wykorzystano deskryptory emisji akustycznej, takie jak tempo zdarzeń N_{zd} , suma zdarzeń ΣN_{zd} , energia zdarzeń E_{zd} oraz rozkład częstotliwościowy sygnału EA. Na podstawie rozkładu częstotliwościowego zarejestrowanych sygnałów EA określono wzorcowe charakterystyki widm akustycznych towarzyszące pękaniu włókien i matrycy cementowej oraz tła. Następnie wykonano analizę otrzymanych rezultatów z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych w celu rozróżnienia charakterystyk widmowych EA oznaczających pęknięcia matrycy i włókien. Dodatkowo określono wytrzymałość na zginanie MOR , przebieg naprężeń zginających σ_m , granicę proporcjonalności LOP oraz moduł Younga E_D . Z kolei metodą optyczną z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej określono wizualnie zmiany zachodzące w strukturze płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania wysokich temperatur.

3.1. Charakterystyka badanych płyt włóknisto-cementowych

W tabeli 3.1 zestawiono serie od A do E płyt włóknisto-cementowych użyte do badań własnych wraz z wykazem podstawowych parametrów technicznych.

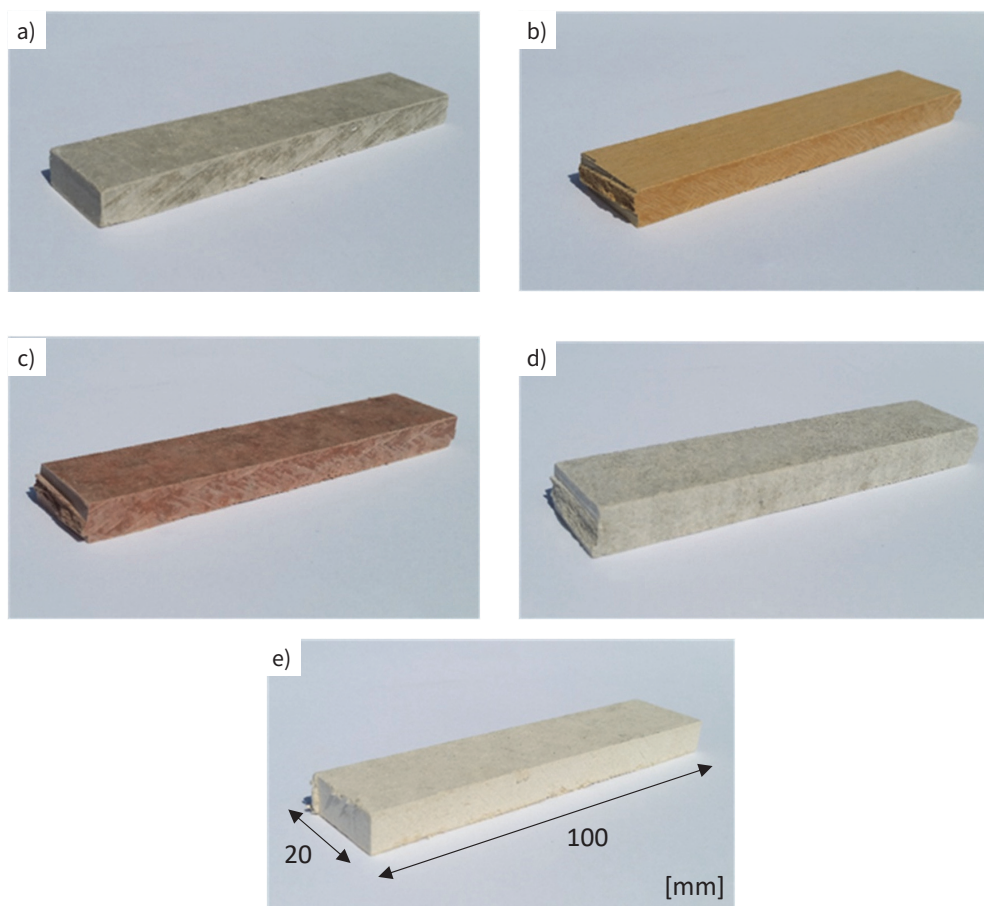
Tabela 3.1. Zestawienie serii od A do E płyt włóknisto-cementowych użytych do badań z wykazem podstawowych parametrów technicznych

Lp.	Seria	Grubość płyty e [mm]	Barwa płyty	Zastosowanie	Gęstość objętościowa płyty ρ [g/cm ³]	Prasowanie podczas produkcji	Wytrzymałość na zginanie MOR [MPa]
1	A	8,0	naturalna	zewnątrzne	1,60	tak	25
2	B	8,0	barwiona w masie	zewnątrzne	1,60	tak	30
3	C	8,0	barwiona w masie	zewnątrzne	1,65	tak	30
4	D	8,0	naturalna	wewnętrzne	1,70	tak	20
5	E	8,0	naturalna	wewnętrzne	1,20	częściowo	12

Podstawowym typem płyt włóknisto-cementowych jest płyta tzw. naturalna – seria A. Płyty powlekane farbami lub masami produkowane są na bazie płyty naturalnej, następnie w ostatniej strefie produkcyjnej są one

malowane lub licowane. Rzadziej płyty malowane są bezpośrednio na miejscu wbudowania. Spośród dostępnych na rynku rodzajów płyt włóknisto-cementowych bardzo popularne są płyty barwione w masie – seria B i C, z zastosowaniem różnych barwników. Cechują się one unikalną barwą, są trwałe, a także dzięki jednorodności koloru w strukturze drobne uszkodzenia na jej powierzchni są mało widoczne. Płyty mają typową grubość wynoszącą 8 mm. Cieńsze płyty płaskie do zastosowań zewnętrznych nie są w zasadzie produkowane ze względu na zbyt niską wytrzymałość na zginanie. Niekiedy mogą być także produkowane płyty elewacyjne o grubościach 10 mm i 12 mm, z przeznaczeniem do montażu w sposób niewidoczny lub do frezowania powierzchni, ale znacznie zwiększa to koszty produkcji. Obecnie opracowane systemy montażu mechanicznego niewidocznego możliwe są już dla płyt o grubości 8 mm. Coraz bardziej rozpropagowywany jest system montażu płyt za pomocą kleju, stąd zastosowanie płyt grubszych niż 8 mm jest znacznie mniejsze. Płyty różnych grubości produkowane są z zastosowaniem takiego samego procesu technologicznego. W aspekcie przeprowadzonych badań, w celu porównania, do badań wytypowano płyty włóknisto-cementowe o grubości 8 mm. Ze względu na różne technologie barwienia wybrano dwa rodzaje płyt barwionych w masie – seria B i C. Na rysunku 3.2 pokazano przykładowe próbki płyt włóknisto-cementowych z każdej badanej serii. Podsumowując, do badań wytypowano trzy rodzaje płyt włóknisto-cementowych zewnętrznych o grubości 8 mm: naturalną – przedstawioną na rys. 3.2a (seria A), barwiona w masie w kolorze żółtym – przedstawiona na rys. 3.2b (seria B) oraz barwiona w masie w kolorze czerwonym – przedstawioną na rys. 3.2c (seria C).

Płyty zewnętrzne miały zbliżone parametry mechaniczne deklarowane przez producentów. Należy jednak zwrócić uwagę, że receptury płyt włóknisto-cementowych i ich proces technologiczny są ściśle chronione przez producentów, a informacje dotyczące konkretnych składników, ich ilości i dostawców oraz szczegółów produkcyjnych są mocno ograniczane. Badane płyty włóknisto-cementowe wykonane zostały z użyciem podstawowych składników, takich jak cement portlandzki CEM I 42,5N, włókna celulozowe, włókna syntetyczne PVA oraz dodatki w postaci mączki wapiennej. Płyty barwione w masie zawierają dodatkowo domieszki barwiące. Wszystkie płyty wyprodukowane zostały w procesie Hatscheka. Spośród dostępnych płyt włóknisto-cementowych wewnętrznych z kolei wybrano płytę wewnętrzną o podwyższonej wytrzymałości, przedstawioną na rys. 3.2d (seria D) oraz płytę wewnętrzną lekką pokazaną na rys. 3.2e (seria E). Płyty serii E są na etapie produkcji prasowane pod mniejszym naciskiem (stąd w tab. 3.1 określenie „częściowo”) tak,



Rys. 3.2. Zestawienie próbek płyt włóknisto-cementowych badanych serii A–E:

- a) seria A – płyta zewnętrzna naturalna, b) seria B – płyta zewnętrzna barwiona w kolorze żółtym,
- c) seria C – płyta zewnętrzna barwiona w masie w kolorze czerwonym,
- d) seria D – płyta wewnętrzna o podwyższonej wytrzymałości, e) seria E – płyta wewnętrzna lekka

aby uzyskać mniejszą gęstość objętościową i dobre możliwości aplikacyjne z wykorzystaniem wkrętów i gwoździ. W przypadku płyt wewnętrznych jest to jedna z podstawowych cech użytkowych. Płyty te wykonane zostały z użyciem składników, takich jak cement portlandzki CEM I 42,5N, włókna celulozowe, włókna syntetyczne PVA oraz dodatek w postaci mączki wapiennej. Płyty zostały także wyprodukowane w procesie Hatscheka.

Przyjęte do badań płyty włóknisto-cementowe są reprezentatywne i wyczerpują, zdaniem autora, zakres najczęściej produkowanych i wbudowywanych rodzajów płyt włóknisto-cementowych objętych normą [154]. Do badania trójpunktowego zginania przygotowano próbki o wymiarach

20 × 100 mm. Były one wycinane w jednym kierunku, równoległym do długości płyty, z pominięciem strefy krawędziowej płyty wynoszącej 50 mm. Do przeprowadzenia badania optycznego metodą optyczną (SEM) wykorzystano próbki o wymiarach 20 × 100 mm uprzednio poddane trójpunktowemu zginaniu.

3.2. Opis wybranych przypadków badawczych

Ocenę procesu niszczenia i wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na strukturę płyt włóknisto-cementowych wykonano dla następujących przypadków badawczych:

1. stanu powietrzno-suchego (brak destrukcji, stan odniesienia, referencyjny);
2. oddziaływania 1 cyklu zamrażania–rozmrażania;
3. oddziaływania 10 cykli zamrażania–rozmrażania;
4. oddziaływania promieniowania UV (badania starzeniowe);
5. oddziaływania ognia w warunkach pożaru.

W tabeli 3.2 przedstawiono zestawienie serii płyt włóknisto-cementowych i przypadków badawczych wraz z przyjętym oznaczeniem próbek.

Tabela 3.2. Zestawienie serii płyt włóknisto-cementowych i przypadków badawczych wraz z przyjętym oznaczeniem próbek

Lp.	Nazwa serii / przypadek badawczy	Seria A	Seria B	Seria C	Seria D	Seria E
1	Stan powietrzno-suchy	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	E ₁
2	Oddziaływanie zamrażania–rozmrażania 1 cykl	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂	E ₂
3	Oddziaływanie zamrażania–rozmrażania 10 cykli	A ₃	B ₃	C ₃	D ₃	E ₃
4	Oddziaływanie promieniowania UV (badania starzeniowe)	A ₄	B ₄	–	–	–
5	Oddziaływanie ognia – warunki pożaru					
	– temperatura 400°C	–	–	C ₅	–	–
	– temperatura 500°C	–	–	C ₆	–	–

Pierwszy przypadek badawczy A1–E1 dotyczy płyt referencyjnych, które przechowywane były w stałych warunkach laboratoryjnych (+23°C, 60% wilgotności). Na podstawie tego przypadku określono referencyjne wartości wytrzymałości na zginanie *MOR* oraz wzorcowe charakterystyki widma akustycznego pochodzące od pękania włókien podczas próby zginania.

Działanie zmiennych cykli zamrażania i rozmrażania jest typowym czynnikiem środowiskowym, klimatycznym, występującym w wielu krajach. Badanie mrozoodporności (zmiennych cykli zamrażania i rozmrażania) jest obowiązkowe w przypadku płyt do zastosowań zewnętrznych według normy [155]. W badaniach własnych próbki płyt włóknisto-cementowych poddano działaniu jednego i dziesięciu cykli zamrażania–rozmrażania. Na podstawie wstępnych badań własnych stwierdzono, że największy spadek wytrzymałości płyt odnotowuje się właśnie pomiędzy jednym a dziesięcioma cyklami zamrażania i rozmrażania. Stąd też przyjęto w programie badawczym przygotowanie próbek poddanych działaniu jednego i dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania. Cykle te prowadzone były dla serii płyt A2–E2 oraz A3–E3 zgodnie z pkt. 7.4.1 normy [221], [154]. Każdy cykl rozpoczynało zamrażanie w temperaturze –20°C przez 2–3 godziny, a następnie rozmrażanie w kąpeli wodnej w temperaturze +20°C przez kolejne 2–3 godziny. Na rysunku 2.4 przedstawiono stanowisko do badań mrozoodporności. W badaniach wstępnych wykazano, że próbki płyt włóknisto-cementowych, które uległy zawilgoceniu, wykazują znacznie słabsze wartości deskryptorów emisji akustycznej EA, dlatego w dalszych badaniach nie wytypowano tego czynnika jako jednego z czynników eksploatacyjnych. Jednak tego aspektu nie można całkowicie pominąć. Z tego też powodu w programie badawczym zostało uwzględnione badanie zmiennych cykli zamrażania i rozmrażania, w którym oprócz wpływu niskich temperatur po części obserwuje się także wpływ zawilgocenia płyty włóknisto-cementowej na proces jej niszczenia m.in. w trakcie rozmrażania w czasie kąpeli wodnej.

Wpływ promieniowania UV jest również istotnym czynnikiem eksploatacyjnym. Wpływ tego czynnika w dużej mierze jest uzależniony od koloru i powłoki, jaką może być pokryta płyta włóknisto-cementowa, a także od stopnia ekspozycji. Z uwagi na długi czas prowadzenia badań oraz ograniczone możliwości skorzystania ze specjalistycznych komór do badań wytypowano tylko dwie serie płyt włóknisto-cementowych – A4 i B4. Do badań starzeniowych¹ wykorzystano komorę WEATHER-OMETER Ci 4000 firmy Atlas, którą

1 Opisane badania zostały przeprowadzone w ramach interdyscyplinarnego projektu naukowo-badawczego nr 01/02/2017 pn. „Nieniszcząca diagnostyka obiektów budowlanych

przedstawiono na rys. 3.3. Urządzenie jest przeznaczone do wykonywania przyspieszonych starzeń materiałów i wyrobów pod wpływem światła i warunków klimatycznych, takich jak temperatura, wilgotność względna oraz deszcz. Źródłem promieniowania jest lampa ksenonowa chłodzona wodą o mocy elektrycznej regulowanej w zakresie od 2500 do 7500 W, z szerokim zestawem filtrów światła do doboru widmowego rozkładu promieniowania oraz zestawem filtrów umożliwiającym symulację „naturalnego światła słonecznego” [81]. Naświetlanie próbek trwało 1600 h przy natężeniu napromieniowania $0,35 \text{ W/m}^2$, temperaturze $65 \pm 3^\circ\text{C}$, wilgotności $60\% \pm 5 \text{ RH}$. Przyjęto następujące cykle: 102 min światło, 18 min światło i deszczowanie próbek. Zastosowano zewnętrzny i wewnętrzny BS system filtrów. Należy także zaznaczyć, że 1000 h naświetlania odpowiada ok. 1 rokowi ekspozycji na promieniowanie słoneczne w naszych warunkach klimatycznych.



Rys. 3.3. Komora do badań starzeniowych; fot. T. Gorzelańczyk

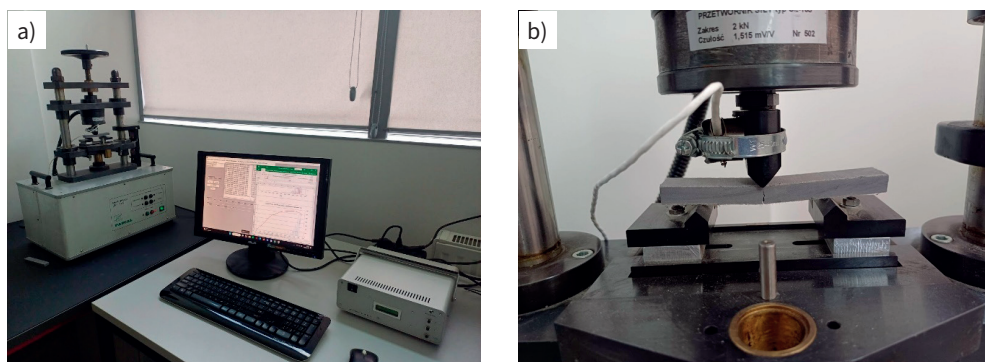
i technicznych w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności ich eksploatacji”, realizowanego w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej przy współpracy pracowników Politechniki Wrocławskiej oraz Instytutu Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. Autor był członkiem zespołu badawczego utworzonego w ramach tego projektu. Prowadził między innymi badania i analizę wyników próbek poddanych wcześniej oddziaływaniu promieniowania UV w próbie trójpunktowego zginania z wykorzystaniem metody emisji akustycznej. Istotnym rezultatem aktywności naukowej autora w ramach tej współpracy są m.in. wspólne publikacje [56], [202].

Działanie ognia jest czynnikiem wyjątkowym, charakteryzującym się wysoką temperaturą oddziaływania, występującym między innymi podczas pożaru. W badaniach wykorzystano próbki płyt włóknisto-cementowych, które wycięto z okładziny elewacyjnej zamontowanej na modelu rzeczywistym². Okładzina zamontowana była za pomocą połączeń mechanicznych do podkonstrukcji aluminiowej. W skład podkonstrukcji wchodziły metalowe profile pionowe montowane w sposób mechaniczny poprzez konsole do podłoża. Z komory spalania wydobywał się ogień, który oddziaływał wysokimi temperaturami na elewacje. W ten sposób realizowany był scenariusz pożaru w pomieszczeniu i wydobywaniu się ognia przez otwór okienny na elewację. W komorze spalania na tylnej ścianie umieszczono nadmuch, który umożliwiał odwzorowanie rzeczywistych warunków panujących w trakcie pożaru. Z poddanego oddziaływaniu pożarem modelu wielkoskalowego zostały następnie pobrane próbki z nadmuchu komory spalania oznaczone symbolami A6 oraz A5, które odpadały odpowiednio w 13:30 i 17:15 minucie. Przebieg temperatur rejestrowały termopary, które można odnieść do położenia wyciętych później próbek A6 i A5. W przypadku próbki A6, znajdującej się w najbliższej strefie źródła ognia, temperatura osiągała ponad 600°C, a dla próbki A5 temperatury mieściły się w przedziale 400–500°C.

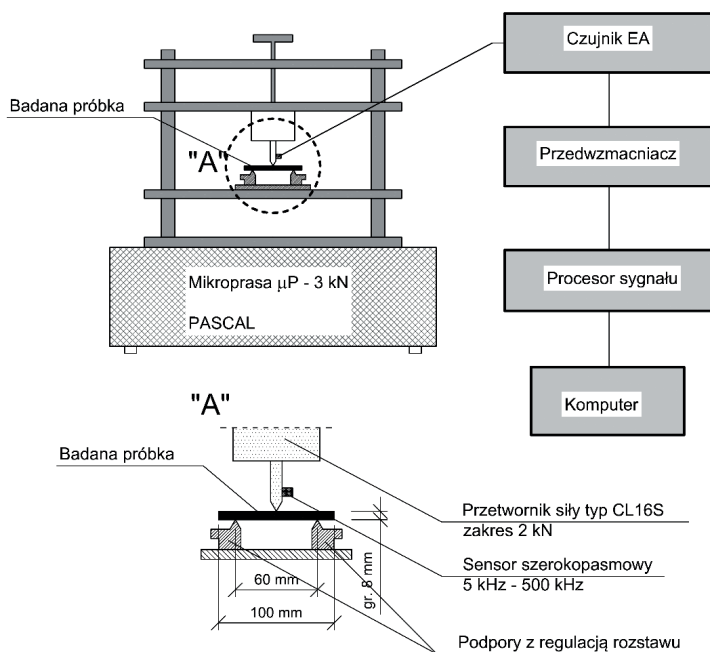
3.3. Stanowisko do badań metodą emisji akustycznej w próbie trójpunktowego zginania

W badaniach własnych wykorzystano metodę emisji akustycznej do oceny procesu niszczenia płyt włóknisto-cementowych w trakcie próby trójpunktowego zginania. Stanowisko badawcze zostało zbudowane przez autora w ramach współpracy z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. Na rysunku 3.4 przedstawiono przygotowane stanowisko badawcze do pomiaru emisji akustycznej podczas próby zginania. Na rysunku 3.5 natomiast pokazano schemat tego stanowiska badawczego.

2 Badania z wykorzystaniem opisanego modelu stanowiły program badawczy rozprawy doktorskiej Zawislaka. Model został także dokładnie opisany w pracach wspólnych Zawislaka i autora [209], [210]. Autor współuczestniczył w tych badaniach, a do badań własnych wykorzystał pozyskane próbki, które zostały wycięte z okładziny elewacyjnej poddanej oddziaływaniu pożaru z wykorzystaniem wyżej przedstawionego modelu.



Rys. 3.4. Stanowisko badawcze do pomiaru emisji akustycznej: a) zestaw aparaturowy, b) próbka płyty włóknisto-cementowej w trakcie badania w chwili zniszczenia; fot. T. Gorzelańczyk



Rys. 3.5. Schemat stanowiska badawczego do próby trójpunktowego zginania wraz z pomiarem emisji akustycznej

Do badania trójpunktowego zginania wykorzystano maszynę wytrzymałościową PASCAL MIKROPRASA μP – 3 kN o zakresie obciążenia od 0 do 3 kN. Podczas badań próbek włóknisto-cementowych ustawiono stały przyrost przemieszczenia trawersy wynoszący 0,1 mm/min. Rozstaw podpór w maszynie wynosił 60 mm, a siła przyłożona była osiowo. Wytrzymałość na zginanie *MOR* wyznaczono ze wzoru (2.2).

Do pomiarów emisji akustycznej użyto sensora szerokopasmowego o paśmie przenoszenia 5–500 kHz oraz analizatora sygnału EA. W analizatorze EA sygnał z sensora był wzmacniany i poddawany wstępnej filtracji w celu usunięcia tła akustycznego pochodzącego z otoczenia monitorowanego elementu. Następnie sygnał przekształcany jest na postać cyfrową. Na potrzeby dalszej obróbki sygnałów zostało stworzone specjalistyczne oprogramowanie, które powstało w ramach współpracy z IPPT PAN. Autor był członkiem tego zespołu i zajmował się testowaniem, korygowaniem, walidowaniem, a następnie wdrażaniem oprogramowania do realizowanych badań naukowych. Obróbkę zapisów cyfrowych przeprowadzono za pomocą oprogramowania do analizy plików dźwiękowych. Do analizy spektralnej 3d wykorzystano program „SpectraPlus S-C” (autor Zbigniew Ranachowski, IPPT PAN). W trakcie badania rejestrowanymi deskryptorami EA w funkcji czasu były tempo zdarzeń N_{zd} i suma zdarzeń $\sum N_{zd}$ oraz energia zdarzeń E_{zd} sygnałów EA. Do wyznaczania deskryptorów EA wykorzystano program „Policz” (autor Zbigniew Ranachowski, IPPT PAN). Działa on na zasadzie wyznaczania pochodnej z ciągu próbek sygnału. W celu zniwelowania wpływu szumu losowego w sygnale pochodna jest wyznaczana z kolejnych par próbek sygnału. Procedura w programie działa na segmentach zarejestrowanego sygnału o długości 0,1 sekundy, a do wyznaczenia wykorzystano 160 próbek sygnałów sąsiadujących z centralną próbką wykrytego zdarzenia emisji akustycznej – maksimum sygnału.

Sensor rejestrujący sygnał został umieszczony na grocie maszyny wytrzymałościowej, co pokazano na rys. 3.4b. Było to konieczne ze względu na małe wymiary próbki i zapewnienie powtarzalności uzyskanych rezultatów. Powierzchnia zarówno sensora, jak i grotu została pokryta żelą silikonowym w celu uzyskania lepszego sprzężenia między tymi elementami. Na podstawie badań przedstawionych w pracy [177] materiałów włóknisto-cementowych z umieszczonym sensorem na grocie potwierdzono skuteczność takiego rozwiązania. W pilotażowych badaniach autora również została potwierdzona poprawność rejestracji sygnałów z wykorzystaniem wyżej opisanego sposobu zamocowania sensora EA.

Moduł Younga przy zginaniu wyznaczono ze wzoru (3.1).

$$E_D = \frac{Fl_s^3}{4fbe^3}, \quad (3.1)$$

gdzie:

E_D – moduł Younga [GPa],
 F – siła [N],

- l_s – rozstaw podpór [mm],
- f – ugięcie [mm],
- b – szerokość próbki [mm],
- e – grubość próbki [mm].

Na wykresach przebiegu naprężeń zginających σ_m oznaczono granicę proporcjonalności *LOP* (ang. *load of proportionality*), która jest granicą stosowności prawa Hooke'a, czyli granicy, do której przyrostom wydłużenia jednostkowego odpowiadają proporcjonalne przyrosty naprężeń. Granicę wyznaczono z wykorzystaniem metody graficznej.

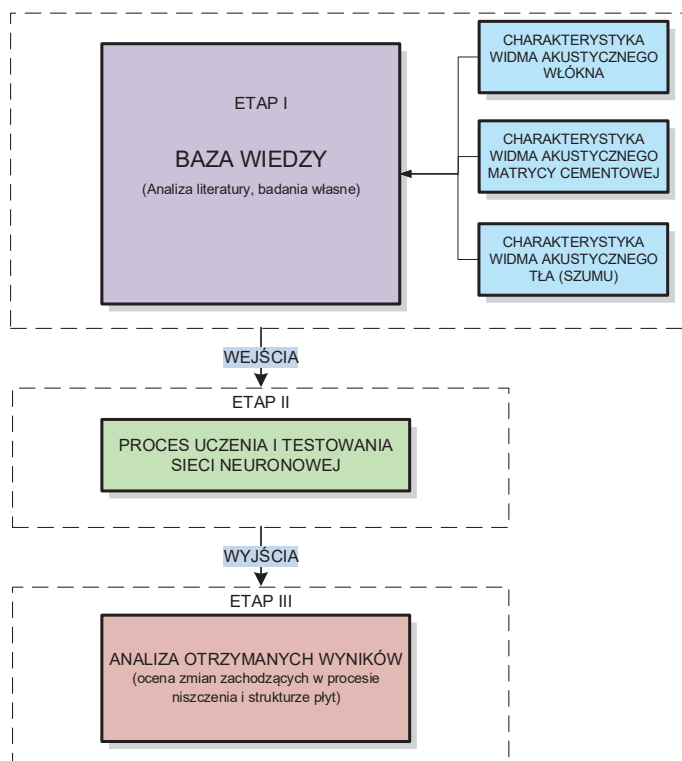
3.4. Stanowisko badawcze metodą optyczną z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego

W badaniach³ wykorzystano wysokorozdzielczy środowiskowy skaningowy mikroskop elektronowy Quanta 250 FEG, FEI z analizatorem EDS, który przedstawiono na rys. 2.57. Do badań wykorzystano próbki użyte wcześniej w badaniach metodą emisji akustycznej podczas próby trójpunktowego zginania. Przedmiotowe badania polegały na umieszczeniu w komorze mikroskopu na stoliku próbki płyty, a następnie skanowaniu jej powierzchni linia po linii. Pod wpływem wiązki elektronów próbka emitowała różne sygnały (m.in. elektrony wtórne, elektrony wstecznie rozproszone, charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie), które były rejestrowane za pomocą odpowiednich detektorów, a następnie przetwarzane na obraz próbki lub widmo promieniowania rentgenowskiego. Dzięki nim otrzymano bardzo precyzyjny opis struktury badanej płyty. Umożliwiły one m.in. opisanie struktury badanych płyt włóknisto-cementowych pod kątem jakości samej matrycy, rozmieszczenia włókien, ich degradacji, wiązania włókien z matrycą itp. Badania te umożliwiły również analizę składu pierwiastkowego matrycy próbek. Dzięki uzyskanym результатам możliwe było powiązanie tych badań z wynikami badań otrzymanych z wykorzystaniem emisji akustycznej do oceny procesu niszczenia pod wpływem oddziaływania wybranych czynników eksploatacyjnych i wyjątkowych.

3 Badania metodą optyczną z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego wykonane były we współpracy z Wydziałem Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej. Istotnym rezultatem aktywności naukowej autora w ramach tej współpracy jest między innymi wspólna publikacja [2].

3.5. Metodyka badań

W celu wykazania destrukcyjnego wpływu oddziaływania wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i zmiany w strukturze płyt włóknisto-cementowych przyjęto schemat postępowania, który pokazano na rys. 3.6. W schemacie tym można wyróżnić trzy zasadnicze etapy, a dotyczy on badań płyt włóknisto-cementowych poddanych oddziaływaniu cyklicznego zamrażania-rozmrażania oraz promieniowania UV.



Rys. 3.6. Schemat postępowania oceny destrukcyjnego wpływu oddziaływania wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i zmiany w strukturze płyt włóknisto-cementowych

Etap 1 to przygotowanie bazy wiedzy, którą stanowiły wyniki z przeprowadzonych badań doświadczalnych płyt włóknisto-cementowych. Na podstawie badań dostępnych w literaturze, w których autor także miał swój aktywny udział [207], [208], [221], ustalono, że danymi wejściowymi będą wzorcowe charakterystyki widmowe przypisane w sposób doświadczalny sygnałom towarzyszącym pękaniu włókien pochodzącym z płyt włóknisto-cementowych

w stanie powietrzno-suchym (tj. referencyjnych). Wzorcowe charakterystyki sygnałów towarzyszących pękaniu matrycy pochodziły z kolei z płyt wypalonych w temperaturze 230°C przez 3 godziny. Wynika to z faktu, że w tej temperaturze włókna zawarte w strukturze płyt włóknisto-cementowych ulegają pirolizie. Można założyć, że po takim procesie płyta jest całkowicie pozbawiona włókien i pozostaje tylko matryca cementowa. Dodatkowo, badając płyty zarówno referencyjne, jak i poddane oddziaływaniu temperatury 230°C, wyodrębniono wzorcowe charakterystyki sygnałów tła (szumu). Uzyskane dane zapisano do pliku i wprowadzono jako parametry wejściowe w celu uczenia sztucznych sieci neuronowych.

Etap 2 był procesem uczenia i testowania sztucznych sieci neuronowych – wykonanie tzw. symulacji sieciowych. Charakterystyki widmowe składające się z 80 współczynników widmowych gęstości mocy sygnału na potrzeby algorytmu klasyfikacji neuronowej zostały przetworzone metodą kodowania binarnego na odpowiednie zbiory zer i jedynek, liczące po 4000 elementów. Zbiory te były wektorami cech związanymi z klasami sygnałów EA i rozpoznawanymi przez sieć. Wzorce uczące podawano w odpowiednio dobranych kombinacjach i liczbach iteracji (epok). Wyniki uczenia i testowania sieci, m.in. strukturę, wartości wagowe, zapisywano w postaci elektronicznej do pliku. Wyuczoną sieć neuronową, mającą zapamiętane w pliku wartości uzyskane podczas nauki, wykorzystywano do rozpoznawania wzorców. Dane wyjściowe z etapu 2 analizowano w etapie 3.

Etap 3 był analizą rezultatów otrzymanych z etapu 2 oraz filtracja zapisów zarejestrowanych sygnałów emisji akustycznej podczas próby trójpunktowego zginania. Do tego etapu podawano dwie pary danych wejściowych. Jedną stanowiły dane pochodzące z etapu 2, które zostały uzyskane przy pomocy wyuczonej sztucznej sieci neuronowej, drugą stanowiły dane pochodzące z zapisu metodą emisji akustycznej sygnałów podczas próby trójpunktowego zginania. Na wyjściu z tego segmentu otrzymano rozpoznane sygnały EA, które były podstawą do oceny zmian zachodzących w procesie niszczenia i w strukturze płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania wybranych czynników.

3.5.1. Określenie wzorcowych widm akustycznych

W trakcie trójpunktowego zginania płyty włóknisto-cementowej przy jednoczesnym wykorzystaniu metody emisji akustycznej rejestruje się dużą liczbę zdarzeń EA. Sygnały EA pochodzą z różnych procesów i mogą zachodzić

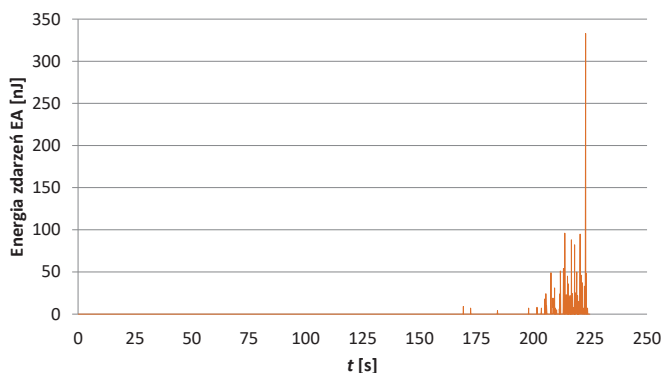
jednocześnie. Zdarzenia te różnią się energią oraz charakterystyką widmową. Identyfikatorem różnych źródeł sygnału mogą być różnice energii zdarzeń EA generowanych przez te źródła. Energię zdarzenia E_{AE} wyznaczono według wzoru (3.2):

$$E_{AE} = \frac{1}{2Z} A_i^2 \Delta t, \quad (3.2)$$

gdzie:

- A_i – amplituda napięcia zarejestrowana przez sensor w trakcie generowania i -tego zdarzenia EA [V],
- Z – impedancja elektryczna zastosowanego sensora EA (1000 [V/A]),
- Δt – czas trwania i -tego zdarzenia EA [s].

Przykładowy zapis energii zdarzeń E_{zd} w funkcji czasu zarejestrowanych łącznie i sumowanych w kolejnych sekundach pomiaru pokazano na rys. 3.7.



Rys. 3.7. Przykładowy zapis energii zdarzeń E_{zd} w funkcji czasu podczas próby trójpunktowego zginania płyty włóknisto-cementowej

Zdarzenia o wysokiej energii świadczą o postępującym procesie niszczenia przy zginaniu, a w celu ich zidentyfikowania należy przypisać propagujące się zdarzenia do pęknięcia matrycy lub włókna. Zdarzenia te różnią się energią zdarzeń oraz charakterystyką widma akustycznego. W tym celu posłużono się deskryptorem, jakim jest charakterystyka widm akustycznych poszczególnych zdarzeń. Funkcję gęstości widmowej (ang. *power spectrum function*) sygnału EA wyznacza się ze wzoru (4.6) nazywanego przekształceniem Fouriera. Ciągły sygnał emisji akustycznej $v(t)$ w określonym przedziale czasu można przedstawić w postaci sumy jego składników częstotliwościowych. W ten sposób sygnał zostanie przedstawiony

w dziedzinie częstotliwości. Przy założeniu bezwzględnej całkowalności funkcji $v(t)$ może ona zostać liniowo przekształcona na funkcję gęstości widmowej $A(\omega)$, co przedstawiono we wzorze (3.3):

$$v(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} A(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)] d\omega, \quad (3.3)$$

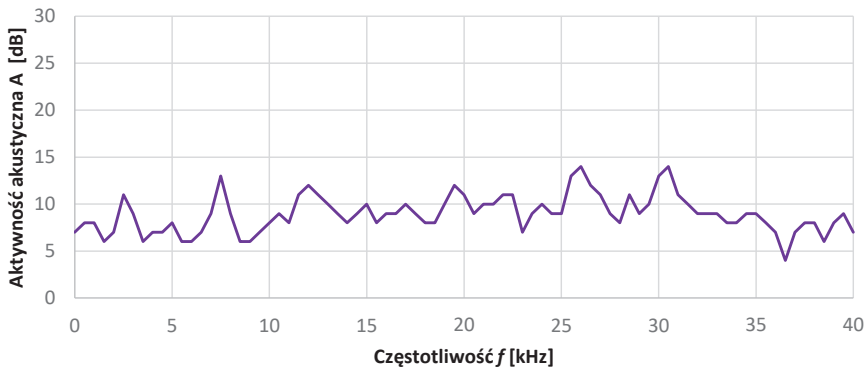
gdzie φ jest parametrem reprezentującym fazę przekształcanego sygnału.

Zależność mocy sygnału od częstotliwości jest przedstawiona jako $A(\omega)$, a ω (pulsacja) jest analogiem częstotliwości f , określonym wzorem (3.4):

$$\omega = 2\pi f. \quad (3.4)$$

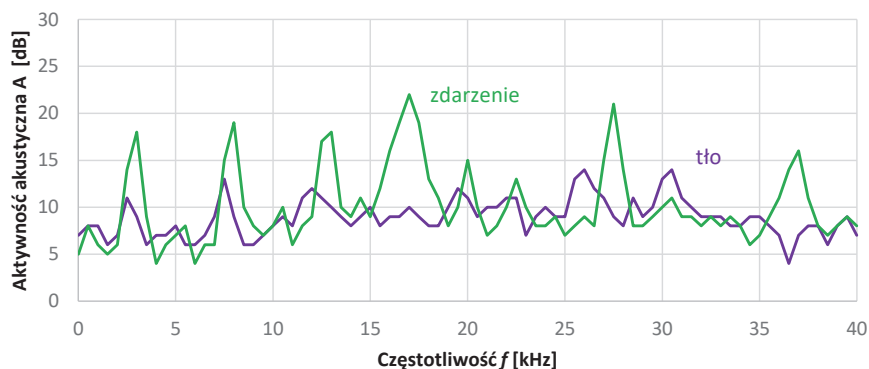
Wyznaczanie funkcji gęstości widmowej $A(\omega)$ umożliwia określenie widma mocy sygnału EA. Charakterystyki widmowe kolejnych segmentów czasowych zarejestrowanego sygnału tworzą spektrogram. W ramach przeprowadzonych badań funkcja gęstości widmowej obejmować będzie zakres częstotliwości 1–40 kHz, w 80 przedziałach co 0,5 kHz.

Na rysunku 3.8 przedstawiono przykładową charakterystykę widmową zdarzenia o niskiej energii (500 pJ), która obrazuje tło akustyczne pochodzące od drgań mikroprasy.



Rys. 3.8. Przykładowy zapis charakterystyki widmowej zdarzenia o niskiej energii poniżej 500 pJ

W związku z tym, że sensor umieszczony został na grocie maszyny, tło (szum) jest dość wyraźne. Zdarzenie zostało odczytane w czasie, kiedy urządzenie pracowało w początkowej fazie badania płyty włóknisto-cementowej. Charakterystykę taką można więc potraktować jako „naturalne” tło akustyczne. Na rysunku 3.9 pokazano natomiast charakterystykę widma akustycznego zdarzenia o średniej energii 6000 pJ oraz zdarzenia o niskiej energii (tło).



Rys. 3.9. Przykładowy zapis charakterystyki widmowej zdarzenia o średniej energii 6000 pJ oraz zdarzenia o niskiej energii (tło)

Na podstawie analizy spektralnej można przypisać charakterystyki widmowe tła oraz te, które towarzyszą pękaniu włókien i matrycy cementowej. Analiza widm akustycznych próbek poddanych oddziaływaniu temperatury 230°C przez 3 godziny posłużyła do wytypowania charakterystyki widmowej pęknięcia samej matrycy cementowej, ponieważ, jak już stwierdzono, włókna celulozowe w tych warunkach uległy destrukcji. Charakterystykę widma akustycznego pęknięcia włókna określono na podstawie sygnałów otrzymanych dla płyt włóknisto-cementowych w stanie powietrzno-suchym, rozumianą jako pęknięcie matrycy cementowej wraz z włóknami.

3.5.2. Uczenie i testowanie sztucznych sieci neuronowych

Wykorzystanie oprogramowania komputerowego opartego na sztucznych sieciach neuronowych jednokierunkowych wielowarstwowych ze wsteczną propagacją błędów, do rozpoznawania wzorców umożliwia zaklasyfikowanie zbioru zarejestrowanych zdarzeń EA do klas różniących się postacią charakterystyk widmowych. W procedurze klasyfikującej wykorzystuje się własności sieci neuronowej, które umożliwiają określenie stopnia podobieństwa analizowanych zbiorów parametrów zdarzeń EA do zbiorów, które zostały uprzednio zaimplementowane w strukturze tej sieci w procesie jej uczenia. Charakterystyki widmowe w każdym z 80 przedziałów (co 0,5 kHz) na potrzeby algorytmu klasyfikacji neuronowej są przetwarzane metodą kodowania binarnego na odpowiednie zbiory zer i jedynek liczące po 4000 elementów (normalizacja danych wejściowych do sieci neuronowych). Zbiory te są wektorami cech związanymi z klasami sygnałów EA, rozpoznawanymi przez

sieć neuronową. Informacja zawarta w wektorach cech jest przekazywana do tablic współczynników wagowych nazywanych strukturami, będących częścią sieci neuronowej. Każdy z neuronów warstwy poprzedzającej ma kontakt z neuronami warstwy następnej. Wektor cech (ciąg zer i jedynek) jest przesyłany do warstwy wejściowej, a następnie przez połączenia międzyneuronowe przekazywany do warstwy wyjściowej. Sygnał X , który jest wektorem cech próbki sygnału EA, zostaje podany na wejścia warstwy, a na zbiorze wyjść neuronów tej warstwy pojawi się sygnał Y według wzoru (3.5):

$$Y = W X, \quad (3.5)$$

gdzie:

X, Y – wektory cech, macierz współczynników wagowych,
 W – macierz odwzorowania.

Proces „uczenia sieci” to możliwość autonomicznej modyfikacji swojej organizacji, czyli zmiany macierzy współczynników. Macierze współczynników są to tablice współczynników opisujących wagi połączeń między kolejnymi warstwami. W procesie zapamiętywania zadanych wzorców zachodzi modyfikacja wartości tablic wag w taki sposób, aby przy podaniu do warstwy wejściowej wektora danych na wyjściu otrzymać wektor będący miarą podobieństwa badanego zbioru danych do ustalonego wcześniej wektora wzorcowego zapamiętanego w tablicach wag. Proces zapamiętywania wzorców odbywa się automatycznie z wykorzystaniem algorytmu iteracyjnego. Zależność między sygnałem na wejściu y_i pojedynczego neuronu a sygnałem na jego wyjściu y_i określono wzorem (3.6) ze [165]:

$$y_i(t+1) = \theta \left(\sum_j w_{ij} y_j(t) - \mu_i \right), \quad (3.6)$$

gdzie:

θ – funkcja aktywacji, najczęściej o postaci sigmoidy $1/(1 + \exp(-x))$,
 w_{ij} – waga połączenia i -tego neuronu z j -tym,
 μ_i – progowy poziom zadziałania i -tego neuronu.

Na warstwę wejściową wprowadzono do sieci 4000 zero-jedynkowych elementów danych wektorów cech sygnału. Pierwsza z tablic współczynników wagowych zawiera 200 000 współczynników odwzorowujących połączenia między jednostkami warstwy wejściowej, a 50 jednostkami kolejnej warstwy. Druga z tablic współczynników wagowych zawiera 3000 współczynników odwzorowujących połączenia między jednostkami drugiej warstwy, a sześcioma jednostkami warstwy wyjściowej. Na sześciu wyjściach sieci są

generowane sygnały zależne od postaci wektora cech podanych na wejściu sieci. Układ połączeń ze strukturą wejściową każdego z wyjść zależy od innych elementów macierzy współczynników wagowych. Powoduje to, że najwyższa wartość sygnału pojawia się na wyjściu, dla którego układ połączeń w sieci wykazuje największą zgodność badanego wektora z wzorcami zapisanymi w tablicach współczynników. W celu zapamiętania w tablicach wag wektorów cech wzorców stosowanych do klasyfikacji sygnałów EA zastosowano iteracyjny algorytm zmian wag połączeń międzyneuronowych, znany pod nazwą „propagacji wstecznej błędu”, co określono wzorem (3.7) ze [165]:

$$\Delta_{w_{ij}}^{(k)} = \eta_1 \left(\frac{d\theta(E_i)}{dE} \right) x_j \delta_i^{(k)} + \eta_2 m_{ij}^{(k+1)}, \quad (3.7)$$

gdzie:

- θ – funkcja aktywacji,
- $\Delta_{w_{ij}}^{(k)}$ – zmiana wagi między i -tym elementem warstwy k a j -tym z warstwy $(k - 1)$,
- η_1 – współczynnik uczenia,
- η_2 – dodatkowy współczynnik zwany momentum,
- E_i – suma pobudzeń równa $\sum_j w_{ij}^{(k)} x_j$,
- z_i – wymagany stan na i -tym wyjściu sieci,
- y_i – chwilowy stan na i -tym wyjściu sieci,
- m_{ij} – zmiana wagi z poprzedniego kroku iteracyjnego,
- $\delta_i^{(k)} x_j - z_i - y_i$ dla warstwy wyjściowej lub dla poprzednich warstw.

Procedura uczenia sieci polega na stosowaniu serii powtórzeń algorytmu opisanego wzorem (3.7) kolejno dla wszystkich wektorów wzorców cech sygnału, przy czym sekwencja uczenia jest zmieniana, ponieważ w trakcie uczenia kolejnego wzorca poprzednie wzorce ulegają stopniowemu „zapomnieniu”. Uczenie polega na osiągnięciu takiego rozkładu wag połączeń neuronowych, aby przy prezentacji zbioru współczynników widmowych przedziałowej gęstości mocy sygnału z jakiegoś segmentu zarejestrowanego sygnału EA neuron pamiętający (najbardziej zbliżony wektor cech) reagował maksymalnym sygnałem na wyjściu. Do uczenia sieci zostały wykorzystane cztery wejścia (A, B, C, D) przypisane wzorcom pękania włókna i matrycy oraz tła. Sekwencja uczenia sieci składa się z wielokrotnego stosowania procedury przedstawionej za pomocą wzoru (3.7). Procedurę uczenia oparto na przyjęciu 8 sekcji (sekwencji) uczenia według schematu przedstawionego w tab. 3.3. Przyjęcie 8 sekwencji uczenia jest wartością optymalną i wynika z wcześniejszych badań pilotażowych przeprowadzonych przez autora.

Tabela 3.3. Zestawienie sekwencji uczenia sztucznych sieci neuronowych

Lp.	Sekwencja	Lp.	Sekwencja
1	$16\,000 \times A, 8000 \times B, 4000 \times C, 2000 \times D$	5	$16\,000 \times A, 8000 \times B, 4000 \times C$
2	$16\,000 \times A, 8000 \times B, 4000 \times C, 2000 \times D$	6	$16\,000 \times A, 8000 \times B, 4000 \times C$
3	$16\,000 \times A, 8000 \times B, 4000 \times C, 2000 \times D$	7	$16\,000 \times A, 8000 \times B, 1000 \times C$
4	$16\,000 \times A, 8000 \times B, 4000 \times C$	8	$16\,000 \times A, 8000 \times B$

Dla wejścia A przypisano charakterystykę widmową pęknięcia włókien, dla wejścia B charakterystykę pęknięcia matrycy cementowej, dla wejścia C charakterystykę widmową tła, a na wejściu D powielono charakterystykę widmową pęknięcia włókna. Współczynnik uczenia (przyspieszający uczenie) przyjęto na poziomie 0,01 oraz momentum (zwiększający stabilność uzyskanej konfiguracji sieci) na poziomie 0,1. Po zakończeniu procedury uczenia przeprowadzono testowanie poprawności nauczania sztucznej sieci neuronowej.

3.5.3. Identyfikacja i filtracja charakterystyk widm akustycznych

Ostatni etap to zidentyfikowanie sygnałów zarejestrowanych podczas próby zginania. Odbywa się ono z wykorzystaniem „wyuczonych” sztucznych sieci neuronowych, bazujących na zapamiętanych w tablicach współczynnikach wagowych wzorcowych charakterystyk widmowych pochodzących z sygnałów towarzyszących pęknięciu włókna lub matrycy oraz tła. Wynikiem identyfikacji był zapis wyjść sztucznych sieci neuronowych rozpoznanych charakterystyk widm akustycznych, odpowiadających odpowiednio pęknięciu włókna i matrycy lub tła dla każdego z segmentów zapisu sygnału emisji akustycznej EA. Sieć klasyfikuje charakterystykę jako podobną do „wyuczonego” wzorca, jeżeli występuje zarówno odpowiednia energia w przedziale widmowym, jak i zakres tego przedziału zgodności częstotliwości. Oznacza to, że kilka czynników wpływa na określenie zgodności z wzorcem. Klasyfikator poprawności rozpoznania charakterystyk z zakresu 0–1 przyjęto na poziomie 0,9.

4. Wyniki badań i ich analiza

W niniejszym rozdziale monografii zestawiono wyniki zrealizowanych badań własnych oraz analizę uzyskanych rezultatów dla wybranych czynników eksploatacyjnych. Badano wpływ oddziaływania cyklicznego zamrażania-rozmrażania, wpływ promieniowania UV, wpływ wysokiej temperatury 230°C i pożaru. Podjęto również próbę wykrywania imperfekcji materiałowych płyt włóknisto-cementowych (delaminacji i rys) wynikających z wad produkcyjnych, a także zamieszczono wyniki badań wilgotności płyt włóknisto-cementowych w procesie produkcji.

4.1. Badania wpływu oddziaływania cyklicznego zamrażania-rozmrażania

W nawiązaniu do przedstawionego aktualnego stanu wiedzy, z którego wynikają braki w aspekcie badań wpływu cyklicznego zamrażania-rozmrażania na proces niszczenia i strukturę kompozytów włóknisto-cementowych, istnieje potrzeba wykonania takich badań. Uzyskane rezultaty mogą być bardzo istotne z punktu widzenia trwałości i bezpieczeństwa eksploatacji elewacji, w których zastosowane są okładziny z płyt włóknisto-cementowych.

4.1.1. Badania metodą emisji akustycznej

W celu wykazania wpływu cyklicznego zamrażania-rozmrażania na proces niszczenia oraz strukturę płyt włóknisto-cementowych, przeprowadzono badania z wykorzystaniem emisji akustycznej podczas trójpunktowego zginania. Badanie poprzedzało przygotowanie próbek o wymiarach 20 × 100 mm dla każdej serii od A do E, poddanych uprzednio oddziaływaniu jednego i dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania (odpowiednio serie A₂–E₂ – przypadek 2 oraz A₃–E₃ – przypadek 3). Tak przygotowane próbki umieszczono w maszynie wytrzymałościowej i przeprowadzono badanie trójpunktowego zginania, podczas którego rejestrowany był przebieg siły niszczącej F oraz sygnał emisji akustycznej EA. W analizie otrzymanych wyników badań brano pod

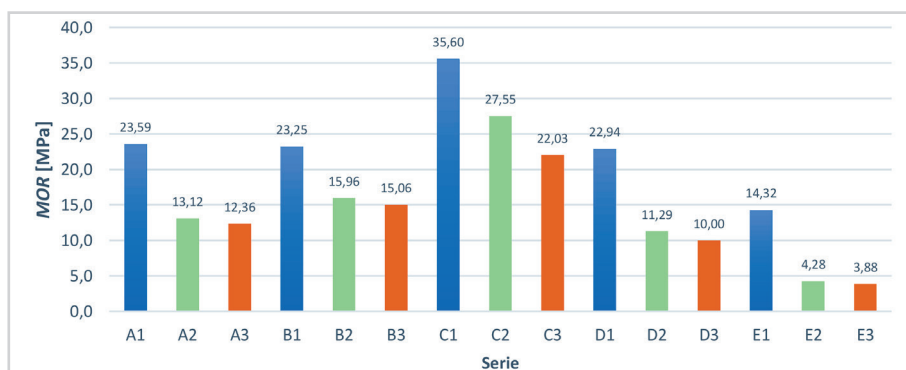
uwagę przebieg naprężeń zginających σ_m , wytrzymałość na zginanie MOR , granicę proporcjonalności LOP , odkształcenie ε , wartość modułu Younga E_D . Wytrzymałość na zginanie MOR wyznaczono ze wzoru (2.2), granicę proporcjonalności oznaczono metodą graficzną, a moduł Younga E_D przy zginaniu wyznaczono ze wzoru (3.1). Analizę sygnałów EA prowadzono na podstawie zarejestrowanych deskryptorów, takich jak suma zdarzeń ΣN_{zd} , energia zdarzeń E_{zd} , tempo zdarzeń N_{zd} oraz z wykorzystaniem rozkładu częstotliwościowego sygnału EA.

W tabeli 4.1 zestawiono uzyskane podczas badań przykładowe wartości siły niszczącej F , granicy proporcjonalności LOP , modułu Younga E_D oraz uśrednionej wytrzymałości na zginanie MOR . Na rysunku 4.1 zestawiono z kolei uśrednione wartości wytrzymałości na zginanie MOR płyty referencyjnej serii A_1 – E_1 w stanie powietrzno-suchym oraz A_2 – E_2 – jeden cykl zamrażania i rozmrażania, a także A_3 – E_3 – dziesięć cykli zamrażania i rozmrażania.

Tabela 4.1. Zbiorcze zestawienie przykładowych wartości siły niszczącej F , granicy proporcjonalności LOP , modułu Younga E_D oraz uśrednionej wytrzymałości na zginanie MOR płyt serii A_2 – E_2 poddanych działaniu 1 cyklu zamrażania i rozmrażania oraz serii A_3 – E_3 poddanych 10 cyklom zamrażania i rozmrażania

Oznaczenie serii płyty	Siła niszcząca F [N]	Granica proporcjonalności LOP [MPa]	Moduł Younga E_D [GPa]	Wytrzymałość na zginanie MOR [MPa]
Seria A_1	335,56	15,51	7,71	23,59 (4,39%)
Seria A_2	159,66	2,82	4,43	13,12 (4,88%)
Seria A_3	106,60	2,61	4,21	12,36 (4,66%)
Seria B_1	334,76	23,23	7,70	23,25 (1,59%)
Seria B_2	229,69	15,01	6,71	15,95 (2,88%)
Seria B_3	216,87	11,54	6,64	15,06 (3,10%)
Seria C_1	475,18	24,22	8,13	35,60 (5,98%)
Seria C_2	367,12	11,51	6,32	27,55 (4,10%)
Seria C_3	293,64	11,03	6,24	22,00 (5,50%)
Seria D_1	423,85	23,06	9,26	23,03 (3,11%)
Seria D_2	207,39	7,51	7,91	11,27 (4,20%)
Seria D_3	184,02	7,02	7,73	10,00 (5,613%)
Seria E_1	215,78	7,41	1,151	14,09 (5,75%)
Seria E_2	65,52	0,53	0,62	4,28 (4,21%)
Seria E_3	59,40	0,52	0,50	3,88 (6,11%)

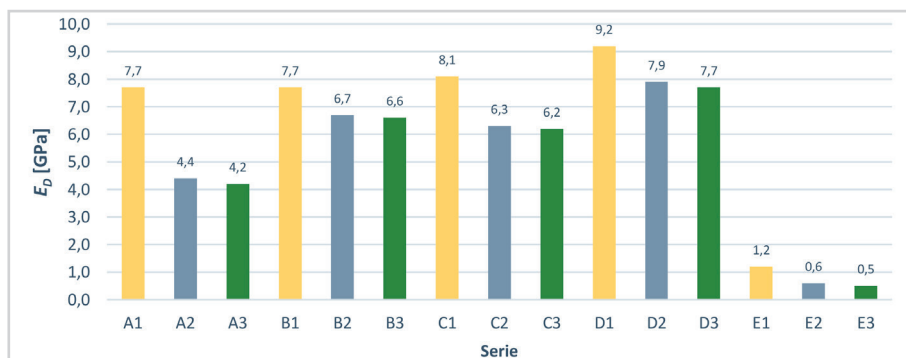
* Uwaga: w nawiasie podano wartości współczynników zmienności.



Rys. 4.1. Wartości wytrzymałości na zginanie MOR serii A_1 – E_1 w stanie powietrzno-suchym, A_2 – E_2 – jeden cykl zamrażania i rozmrażania oraz A_3 – E_3 – dziesięć cykli zamrażania i rozmrażania

Z rysunku 4.1 wynika, że wpływ cykli zamrażania i rozmrażania na wytrzymałość na zginanie MOR jest bardzo wyraźny. Płyty włóknisto-cementowe po jednym cyklu zamrażania i rozmrażania wykazały spadek wartości MOR o około 30% dla serii A_2 , B_2 , C_2 i 50–70% w przypadku serii D_2 , E_2 . Po Kolejno po dziesięciu cyklach zamrażania i rozmrażania płyty włóknisto-cementowe nie wykazały wyraźnych zmian w wytrzymałości na zginanie. Można zaobserwować jedynie tendencje spadku wartości MOR o około 5–10%.

Na rysunku 4.2 przedstawiono wartości modułu Younga E_D w stanie powietrzno-suchym oraz pod wpływem działania jednego oraz dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania.

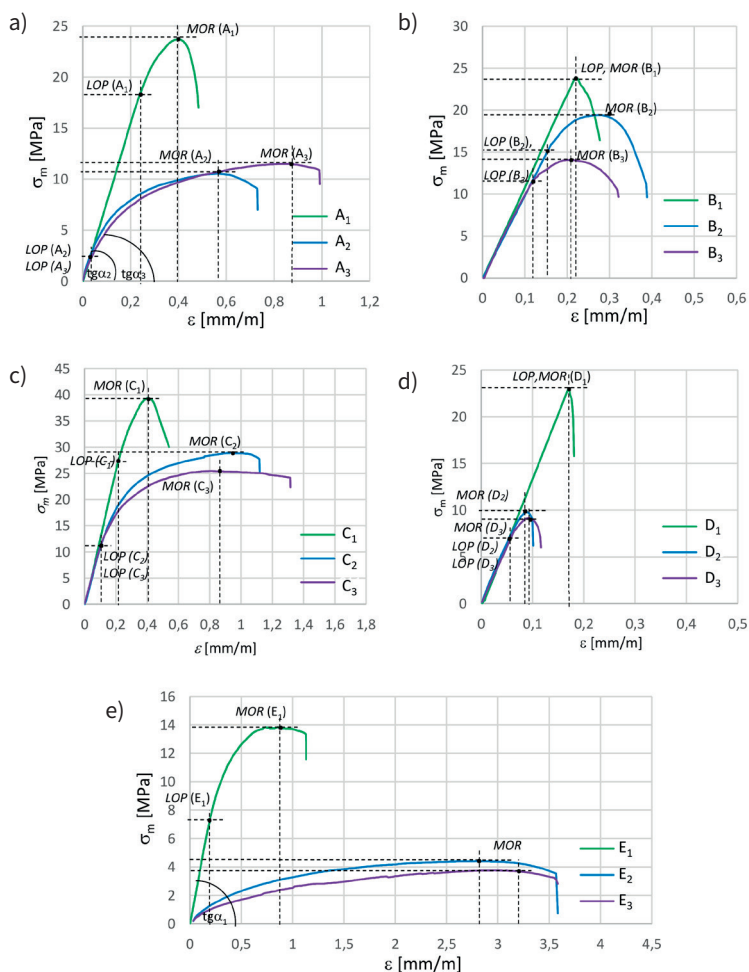


Rys. 4.2. Wartości modułu Younga E_D serii A_1 – E_1 w stanie powietrzno-suchym, A_2 – E_2 – jeden cykl zamrażania i rozmrażania oraz A_3 – E_3 – dziesięć cykli zamrażania i rozmrażania

Analiza wyników badań (rys. 4.2) wartość modułu Younga E_D spada na skutek oddziaływania zmiennych cykli zamrażania i rozmrażania. Wyraźne spadki wartości modułu Younga E_D odnotowano już po jednym cyklu dla

serii A–D wynoszące 10–30%, a dla serii E aż o 50%. Zauważono również pewną tendencję polegającą na tym, że wraz ze wzrostem liczby cykli zamrażania i rozmrażania od jednego do dziesięciu wartość modułu Younga E_D zmniejsza się nieznacznie i wynosi od 2 do 5%.

Na rysunku 4.3 przedstawiono z kolei zależność σ – ε podczas trójpunktowego zginania dla serii A₁–E₁ (płyty referencyjne), A₂–E₂ oraz A₃–E₃. Na wykresie naniesiono wartość granicy proporcjonalności LOP oraz wytrzymałości na zginanie MOR (wartość ε wyznaczono na podstawie przemieszczenia trawersy maszyny wytrzymałościowej).



Rys. 4.3. Zależność σ – ε podczas zginania płyt w stanie powietrzno-suchym oraz pod wpływem jednego i dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania:
a) seria A, b) seria B, c) seria C, d) seria D, e) seria E

Analizując wyniki przedstawione na rys. 4.3, potwierdzono wyraźny wpływ cykli zamrażania i rozmrażania dla wszystkich serii. Dla serii B i D widoczny był spadek wytrzymałości na zginanie MOR oraz rozdzielenie granicy proporcjonalności LOP od wytrzymałości na zginanie MOR , natomiast w przypadku serii A, C i E zanikał zakres sprężystych odkształceń, a nieliniowy przyrost odkształceń został znacznie wydłużony przy jednoczesnym spadku wytrzymałości na zginanie MOR . Na podstawie analizy wykresów (rys. 4.3) można wnioskować, że wpływ działania cykli zamrażania i rozmrażania charakteryzuje się nie tylko spadkiem wytrzymałości na zginanie MOR , ale również zmianą przebiegu zależności σ – ε . Oprócz spadku wytrzymałości na zginanie MOR obserwuje się także zwiększony przyrost odkształcenia ε podczas próby zginania. Analizując wyniki badań płyt włóknisto-cementowych serii A–E można stwierdzić, że parametry, takie jak wytrzymałość na zginanie MOR , granica proporcjonalności LOP , wartość modułu Younga E_D oraz zależności σ – ε umożliwiają ocenę procesu destrukcji pod wpływem cykli zamrażania i rozmrażania. Dla serii B i D natomiast wpływ cykli zamrażania i rozmrażania na proces destrukcji jest najmniejszy, podobnie jak w przypadku wpływu wysokiej temperatury, co wykazano również w pracach [207], [208], [221].

Kolejnym etapem badań procesu niszczenia pod wpływem cykli zamrażania i rozmrażania jest analiza sygnałów EA zarejestrowanych podczas przebiegu próby zginania na podstawie deskryptorów EA, takich jak tempo zdarzeń N_{zd} , suma zdarzeń $\sum N_{zd}$ i energia zdarzeń E_{zd} oraz rozkładu częstotliwościowego sygnału EA. W tabeli 4.2 zestawiono przykładowe wartości sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$ wraz z maksymalną zarejestrowaną energią zdarzeń E_{zd} badanych serii A1–E1, w stanie powietrzno-suchym oraz A2–E2, A3–E3 pod wpływem działania jednego i dziesięciu cykli zamrażania–rozmrażania. Obliczono również średnią liczbę zdarzeń $N_{\bar{s}r}$ oraz średnią energię zdarzeń $E_{\bar{s}r}$ zarejestrowanych podczas badania przykładowego zapisu sygnału EA podczas próby zginania.

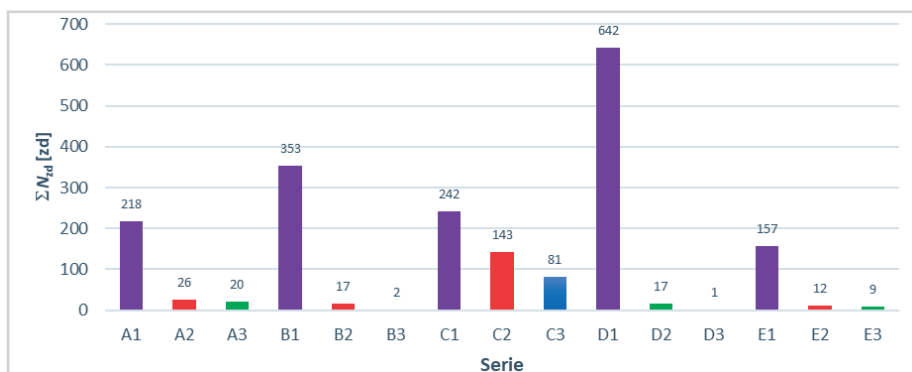
Tabela 4.2. Zbiorcze zestawienie wartości sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$, maksymalnej energii zdarzeń E_{zd} , średniej liczby zdarzeń $N_{\bar{s}r}$ oraz średniej energii zdarzeń $E_{\bar{s}r}$ serii A1–E1 w stanie powietrzno-suchym oraz pod wpływem jednego i dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania serii A2–E2, A3–E3

Oznaczenie serii płyty	Suma zdarzeń $\sum N_{zd}$ [zd]	Średnia liczba zdarzeń $N_{\bar{s}r}$ [nJ]	Maksymalna energia zdarzeń E_{zd} [nJ]	Średnia energia zdarzeń $E_{\bar{s}r}$ [nJ]
Seria A ₁	218	0,14	4214,0	18,89
Seria A ₂	26	0,04	228,0	0,44
Seria A ₃	20	0,04	131,0	0,17
Seria B ₁	353	0,28	5277,0	12,90

Tabela 4.2 cd. Zbiorcze zestawienie wartości sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$, maksymalnej energii zdarzeń E_{zd} , średniej liczby zdarzeń N_{sr} oraz średniej energii zdarzeń E_{sr} serii A₁–E₁ w stanie powietrzno-suchym oraz pod wpływem jednego i dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania serii A₂–E₂, A₃–E₃

Oznaczenie serii płyty	Suma zdarzeń $\sum N_{zd}$ [zd]	Średnia liczba zdarzeń N_{sr} [nJ]	Maksymalna energia zdarzeń E_{zd} [nJ]	Średnia energia zdarzeń E_{sr} [nJ]
Seria B ₂	17	0,1	154,0	1,97
Seria B ₃	2	0,01	10,0	0,27
Seria C ₁	242	0,15	18338,0	36,97
Seria C ₂	143	0,28	1730,0	47,72
Seria C ₃	81	0,09	1048,0	2,92
Seria D ₁	642	0,69	39013,0	100,29
Seria D ₂	17	0,15	146,0	5,3
Seria D ₃	1	0,07	12,0	0,15
Seria E ₁	157	0,03	4120,0	15,26
Seria E ₂	12	0,06	665,0	1,98
Seria E ₃	9	0,04	495,0	1,07

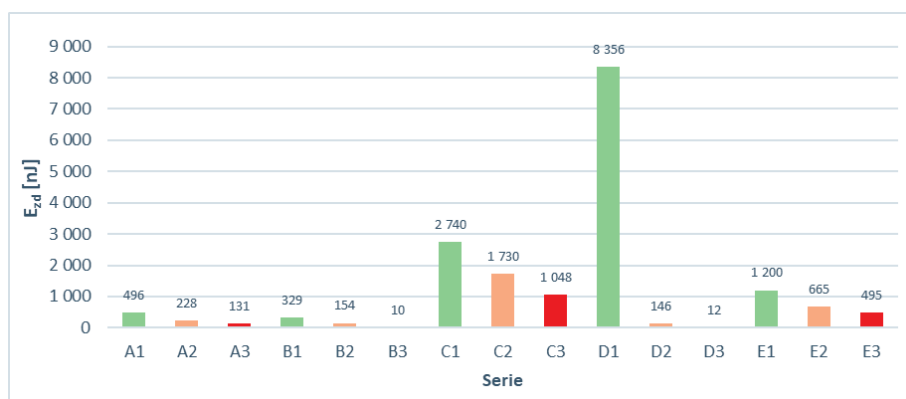
Na rysunku 4.4 przedstawiono przykładowe wartości sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$ EA zarejestrowane podczas próby zginania serii A₁–E₁ płyt włóknisto-cementowych w stanie powietrzno-suchym oraz A₂–E₂ i A₃–E₃ pod wpływem odpowiednio jednego i dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania.



Rys. 4.4. Wartości zarejestrowanej sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$ dla serii A₁–E₁ w stanie powietrzno-suchym oraz pod wpływem jednego i dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania serii A₂–E₂ i A₃–E₃

Na podstawie analizy wyników badań (rys. 4.4) potwierdzono wyraźny spadek zarejestrowanych sum zdarzeń $\sum N_{zd}$ pod wpływem jednego cyklu zamrażania i rozmrażania wszystkich badanych płyt włóknisto-cementowych

w porównaniu do płyt w stanie powietrzno-suchym. Kolejne cykle zamrażania i rozmarzania powodują dalszy stopniowy zanik zarejestrowanych zdarzeń. Na rysunku 4.5 przedstawiono z kolei przykładowy zapis maksymalnej zarejestrowanej energii zdarzeń E_{zd} dla przebiegu zginania serii od A_1 do E_1 w stanie powietrzno-suchym oraz od A_2 do E_2 i od A_3 do E_3 pod wpływem odpowiednio jednego i dziesięciu cykli zamrażania i rozmarzania.

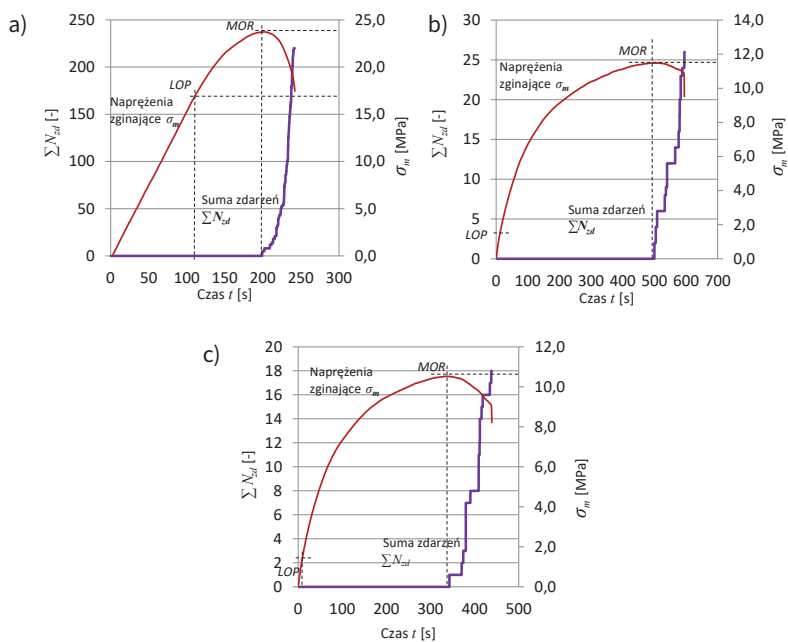
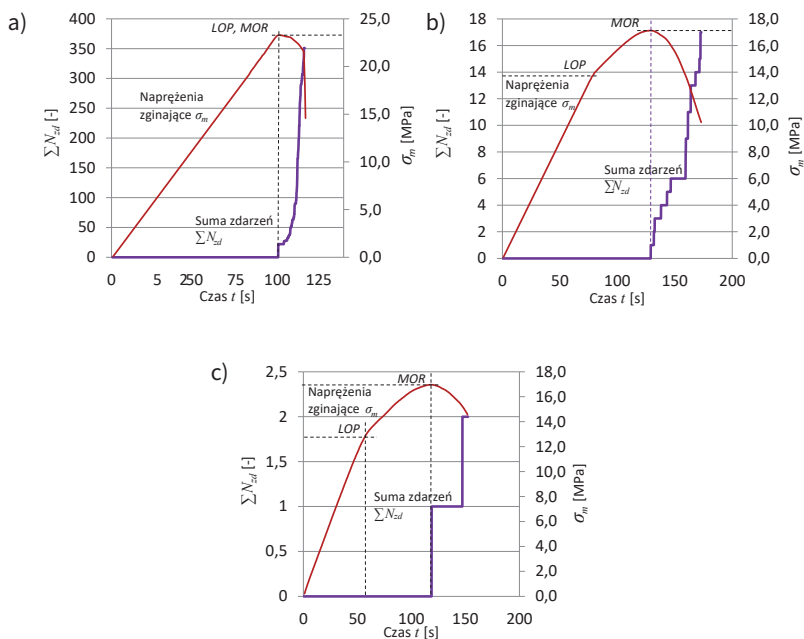


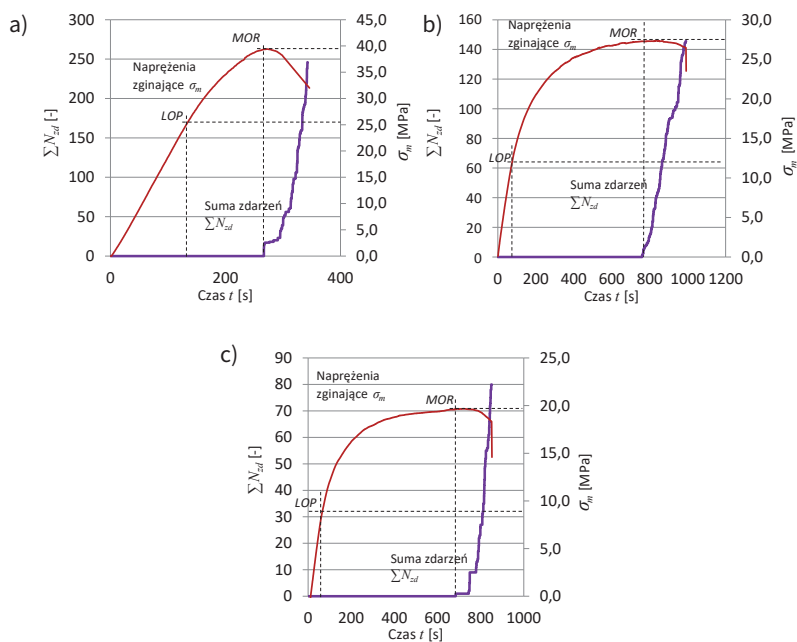
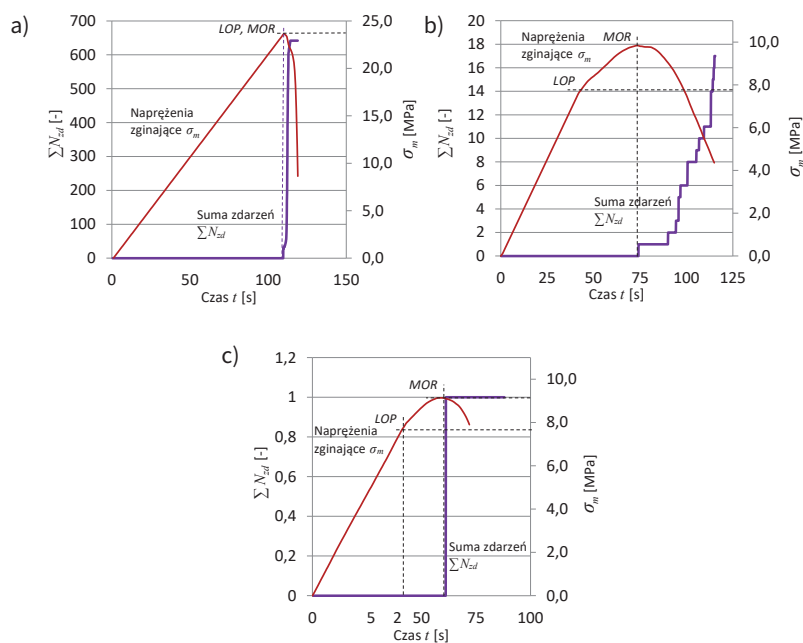
Rys. 4.5. Zarejestrowana maksymalna energia zdarzeń E_{zd} dla serii A_1 – E_1 w stanie powietrzno-suchym oraz A_2 – E_2 i A_3 – E_3 pod wpływem jednego i dziesięciu cykli zamrażania i rozmarzania

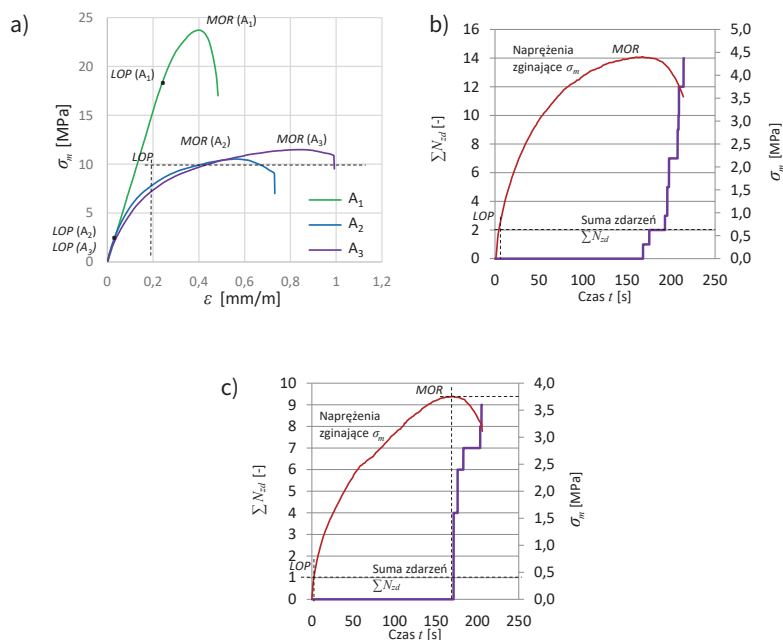
Na podstawie analizy wyników badań (rys. 4.5) należy stwierdzić, że wpływ cykli zamrażania i rozmarzania powoduje spadek energii zdarzeń E_{zd} podczas próby zginania dla wszystkich badanych serii płyt włókno-cementowych. Korelacja deskryptorów sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$ z energią zdarzeń E_{zd} pozwala wnioskować, iż zmienne cykle zamrażania i rozmarzania powodują spadek energii E_{zd} zarejestrowanych zdarzeń wraz z jednoczesnym zredukowaniem ich liczby.

Analiza przebiegu próby zginania na podstawie deskryptorów $\sum N_{zd}$ oraz E_{zd} potwierdza zmiany zachodzące w płytach włókno-cementowych wywołujące bardzo nisko energetyczne zdarzenia w znacznie ograniczonej liczbie, w porównaniu z płytami referencyjnymi. W celu dokładniejszej analizy przebiegu próby zginania i wpływu na nią czynnika destrukcyjnego przedstawiono na wykresach 4.6–4.10 zależności sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$ oraz naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu.

Na podstawie analizy wyników badań (rys. 4.6–4.10) stwierdzono zauważalny spadek zarejestrowanych zdarzeń oraz zmianę przebiegu sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$. Zdarzenia zarejestrowane zostały po przekroczeniu wytrzymałości na zginanie MOR . Należy zaznaczyć, że po poddaniu płyt oddziaływaniu zamrażania–rozmarzania zaobserwowano redukcję liczby zdarzeń oraz spadek ich

Rys. 4.6. Zależność σ_m i ΣN_{zd} w funkcji czasu t dla serii: a) A₁, b) A₂, c) A₃Rys. 4.7. Zależność σ_m i ΣN_{zd} w funkcji czasu t dla serii: a) B₁, b) B₂, c) B₃

Rys. 4.8. Zależność σ_m i ΣN_{zd} w funkcji czasu t dla serii: a) C₁, b) C₂, c) C₃Rys. 4.9. Zależność σ_m i ΣN_{zd} w funkcji czasu t dla serii: a) D₁, b) D₂, c) D₃



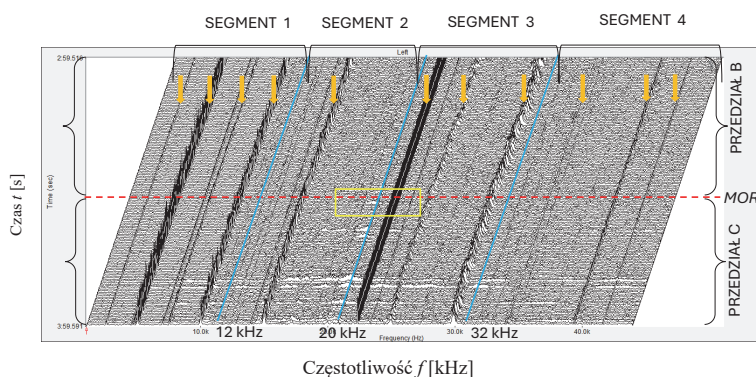
Rys. 4.10. Zależność σ_m i $\sum N_{zd}$ w funkcji czasu t dla serii: a) E₁, b) E₂, c) E₃

energii. Nie oznacza to wprost, że zdarzenia te nie występują, ale należy sądzić, że próg dyskryminacji rejestrowanych zdarzeń dla przypadków związanych z działaniem cykli zamrażania i rozmrażania jest zbyt wysoki. Wynika to bezpośrednio z możliwości pomiarowych stosowanej aparatury. Zarejestrowane zdarzenia o dużo niższej energii świadczą natomiast prawdopodobnie o odmiennym procesie destrukcji włókien, które mogą być wyrwane z wilgotnej matrycy cementowej, powodując niższą energię zdarzenia.

W celu potwierdzenia źródła pochodzenia zarejestrowanych zdarzeń EA przeprowadzono dalsze badania, a do ich identyfikacji posłużono się analizą spektralną charakterystyk widm akustycznych zdarzeń EA. Deskryptorem, na podstawie którego można rozróżnić zdarzenia jest charakterystyka spektralna widma akustycznego zdarzenia. Jest ona pochodną rozkładu częstotliwościowego sygnału EA. Wykorzystując transformację czasowo-częstotliwościową zapisu dźwiękowego przebiegu zginania przy użyciu programu „Spectra-Plus S-C”, przedstawiono charakterystykę widma akustycznego w funkcji częstotliwości i czasu w widoku 3D. Przebieg naprężeń zginających σ_m i zarejestrowanych sygnałów EA w funkcji czasu podzielono na trzy przedziały nazwane odpowiednio A, B i C. Przedział A to zakres stosowalności prawa Hooke’a zakończony granicą proporcjonalności LOP, przedział B

zawiera się między granicą proporcjonalności a wytrzymałością na zginanie MOR. Ostatni przedział, oznaczony literą C, rozpoczyna się od poziomu wytrzymałości na zginanie MOR do całkowitej destrukcji płyty włóknisto-cementowej lub spadku naprężeń zginających o 40% od wartości MOR i charakteryzuje się zarejestrowanymi sygnałami EA.

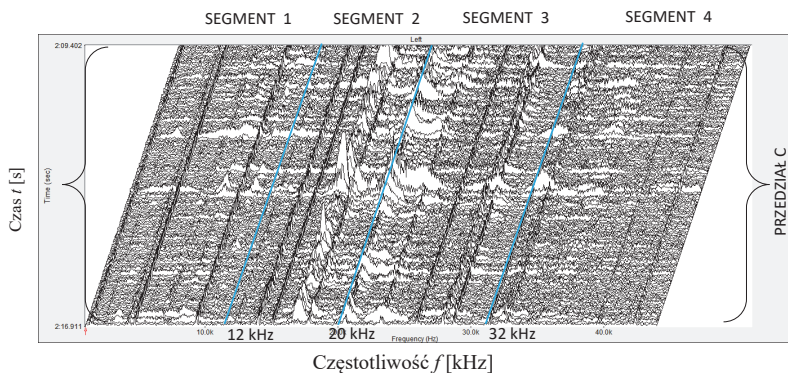
Zapis sygnału EA w funkcji częstotliwości podzielono na cztery segmenty nazwane odpowiednio 1, 2, 3, 4. Segment 1 zawiera się w zakresie częstotliwości 0–12 kHz, segment 2 obejmuje częstotliwości w zakresie 12–20 kHz, segment 3 to częstotliwości 20–32 kHz, natomiast segment 4 – 32–40 kHz. Podział na segmenty w funkcji częstotliwości wynika ze zmieniających się charakterystyk w opisanych segmentach. Z uwagi na umiejscowienie sensora na grocie maszyny wytrzymałościowej tło akustyczne jest wyraźne i zmienne w zależności od płyty włóknisto-cementowej, przez którą przekazywane są drgania urządzenia wytrzymałościowego do sensora. Na rysunku 4.11 strzałkami oznaczono prążki widmowe tła o wysokiej mocy pochodzące od maszyny wytrzymałościowej.



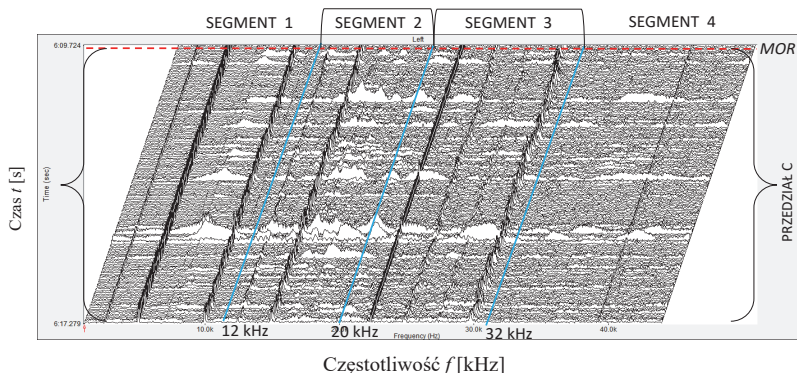
Rys. 4.11. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania płyty serii A_1 w stanie powietrzno-suchym w zakresie 1–40 kHz

Na podstawie analizy wyników (rys. 4.11) stwierdzono, że próbka płyty serii A_1 charakteryzuje się bardzo słabą aktywnością akustyczną. Kolorem żółtym oznaczono widoczne zmiany charakterystyki widma akustycznego o podwyższonej aktywności akustycznej w przedziale C po przekroczeniu wytrzymałości na zginanie MOR. Zmiany charakterystyki widma akustycznego zostały zarejestrowane po przekroczeniu wytrzymałości na zginanie MOR, co zostało również przedstawione na wykresach sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$ pokazanych na rys. 4.6–4.10. Na rysunkach 4.12–4.15 pokazano przykładowe zapisy aktywności akustycznej A w funkcji czasowo-częstotliwościowej kolejnych badanych serii B_1 – E_1 w stanie

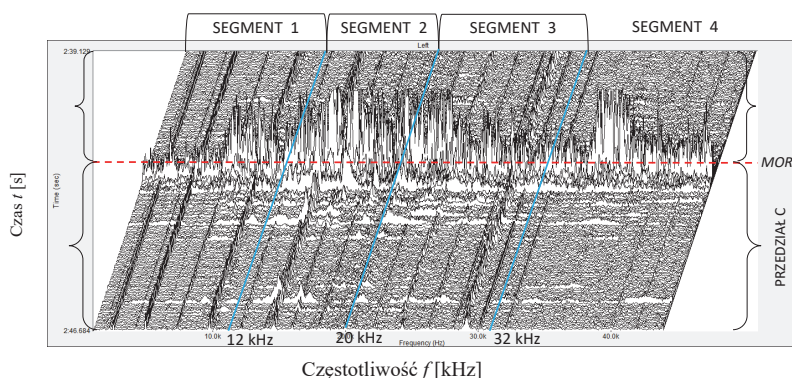
powietrzno-suchym. Z przedstawionych zależności wynika, że w płytach serii B_1 , C_1 oraz E_1 charakterystyczne jest występowanie dużej liczby zdarzeń EA po przekroczeniu progu wytrzymałości na zginanie *MOR*. Charakterystyki widma akustycznego zdarzeń po przekroczeniu *MOR* mają podobną charakterystykę wyróżniającą się jedynie poziomem aktywności akustycznej. Podobna charakterystyka widma akustycznego świadczy o tym samym źródle pochodzenia zdarzeń. Na podstawie rys. 4.14 można zauważyć, że seria D_1 charakteryzowała się mniejszą liczbą zdarzeń w porównaniu z pozostałymi seriami w stanie powietrzno-suchym. Po osiągnięciu wytrzymałości na zginanie *MOR* widoczne są zgrupowane, w krótkim czasie, charakterystyki widm akustycznych o dużej aktywności akustycznej. Jest to odmienny zapis w porównaniu do serii A_1 , B_1 , C_1 oraz E_1 , które charakteryzują się znacznie dłuższym przedziałem C, w którym rejestrowane były zdarzenia EA.



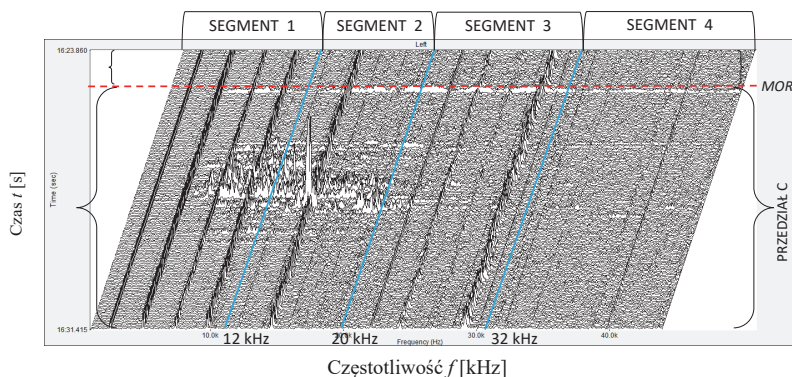
Rys. 4.12. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania płyty serii B_1 w stanie powietrzno-suchym w zakresie 10–24 kHz



Rys. 4.13. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania płyty serii C_1 w stanie powietrzno-suchym w zakresie 10–24 kHz



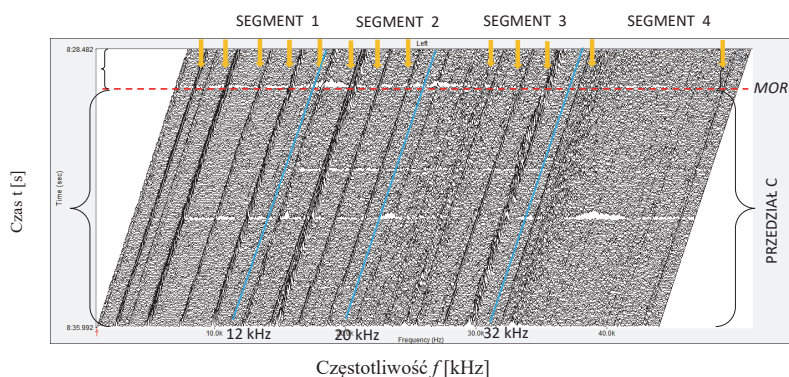
Rys. 4.14. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy EA podczas próby zginania płyty serii D_1 w stanie powietrzno-suchym w zakresie 10–24 kHz



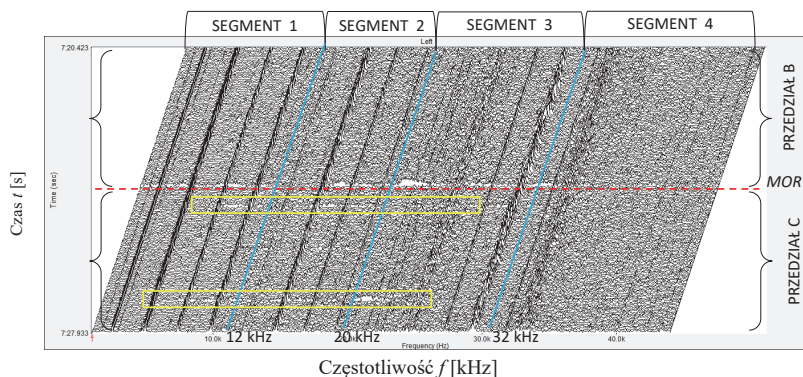
Rys. 4.15. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania płyty serii E_1 w stanie powietrzno-suchym, w zakresie 1–40 kHz

Na rysunkach 4.16–4.25 przedstawiono fragmenty zapisu aktywności akustycznej A sygnału EA próby zginania w funkcji czasu i częstotliwości dla płyt poddanych oddziaływaniu 1 i 10 cykli zamrażania-rozmrażania. Na rysunkach oznaczono przedziały w funkcji czasu A, B, C oraz segmenty 1, 2, 3, 4 w funkcji częstotliwości. Czerwoną linią oznaczono miejsce osiągnięcia wytrzymałości na zginanie MOR . Na rysunku 4.16 strzałkami oznaczono dodatkowo zwiększoną aktywność akustyczną pochodzącą od maszyny wytrzymałościowej (tło).

Jak pokazano na rys. 4.16, zarejestrowane zmiany charakterystyki widma akustycznego są nieliczne i o bardzo niskiej aktywności akustycznej. Na rysunku 4.17 przedstawiono zapis charakterystyki widma akustycznego płyty włóknisto-cementowej serii A_3 poddanej działaniu dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania. Po osiągnięciu wytrzymałości na zginanie MOR



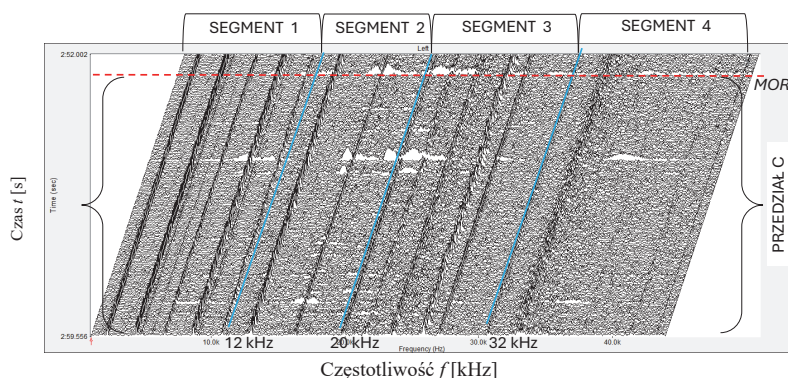
Rys. 4.16. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania serii A_2 pod wpływem jednego cyklu zamrażania i rozmrażania w zakresie 1–40 kHz



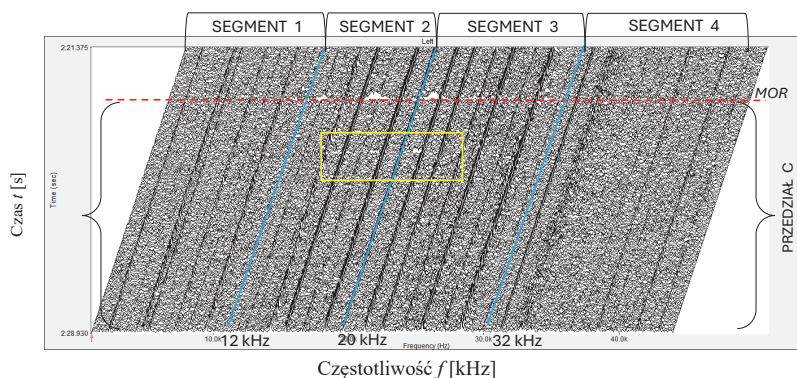
Rys. 4.17. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania serii A_3 pod wpływem dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania w zakresie 1–40 kHz

widoczna jest charakterystyka widma akustycznego, której źródłem jest pęknięcie płyty włóknisto-cementowej. W dalszej części przedziału C oznaczone zostały nieliczne zdarzenia o bardzo słabej aktywności akustycznej, niewiele wyższej od tła (rys. 4.17). Kolejny rysunek (rys. 4.18) przedstawia zapis charakterystyki widma akustycznego płyty serii B_2 poddanej działaniu jednego cyklu zamrażania i rozmrażania. Po osiągnięciu wytrzymałości na zginanie MOR widoczna jest zmiana charakterystyki widma akustycznego, podobnie jak w przypadku serii A_2 , zmiany charakterystyk są nieliczne, o słabej aktywności akustycznej.

Na rysunku 4.19 przedstawiono zapis przedziału C dla próbki B_3 . Jest tu widoczna zmiana charakterystyki widma akustycznego po przekroczeniu wytrzymałości na zginanie MOR oraz kolejna zmiana o bardzo słabej aktywności akustycznej, oznaczona na rysunku żółtym kolorem. Seria B odznaczała



Rys. 4.18. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania serii B_2 pod wpływem jednego cyklu zamrażania i rozmrażania w zakresie 1–40 kHz

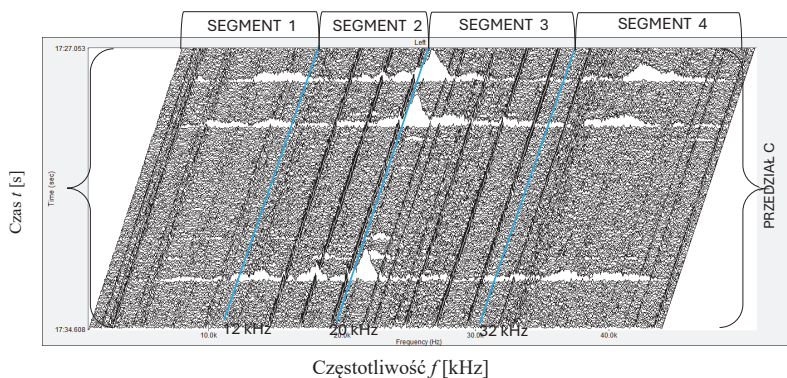


Rys. 4.19. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania serii B_3 pod wpływem dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania w zakresie 1–40 kHz

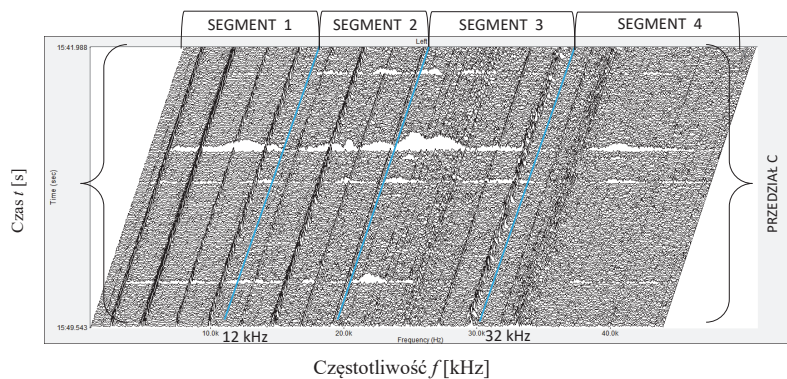
się bardzo małą liczbą zdarzeń na tle pozostałych serii. W przypadku badania cykli wpływu zamrażania i rozmrażania dla tej serii analiza rozkładu częstotliwościowego opierać się będzie na kilku zdarzeniach.

Na rysunku 4.20 przedstawiono zapis przebiegu zginania w przedziale C dla serii C_2 . Widoczne są nieliczne, lecz wyraźne, o podobnej charakterystyce widma akustyczne. Seria C_2 charakteryzuje się wyraźnymi zmianami tych charakterystyk podczas próby zginania pod wpływem cykli zamrażania i rozmrażania.

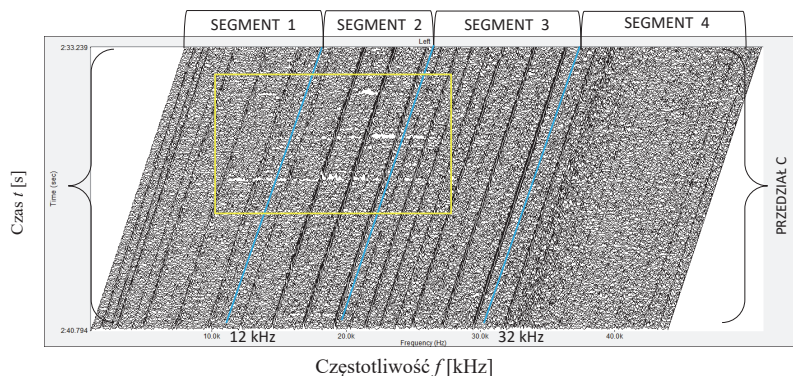
Na rysunku 4.21 przedstawiono zapis aktywności akustycznej dla próby zginania płyty serii C_3 poddanych działaniu 10 cykli zamrażania i rozmrażania, który jest podobny do serii C_2 i świadczy o słabym wpływie kolejnych cykli zamrażania i rozmrażania. Zauważalna jest niższa aktywność akustyczna zarejestrowanych charakterystyk widm akustycznych.



Rys. 4.20. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania serii C_2 pod wpływem jednego cyklu zamrażania i rozmrażania w zakresie 1–40 kHz



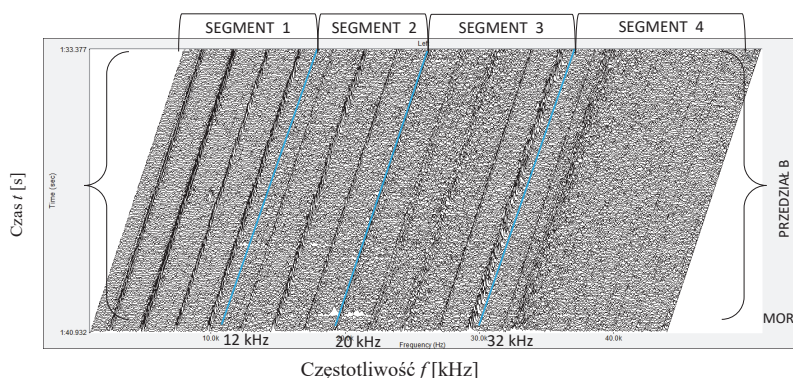
Rys. 4.21. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania serii C_{11} pod wpływem dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania w zakresie 1–40 kHz



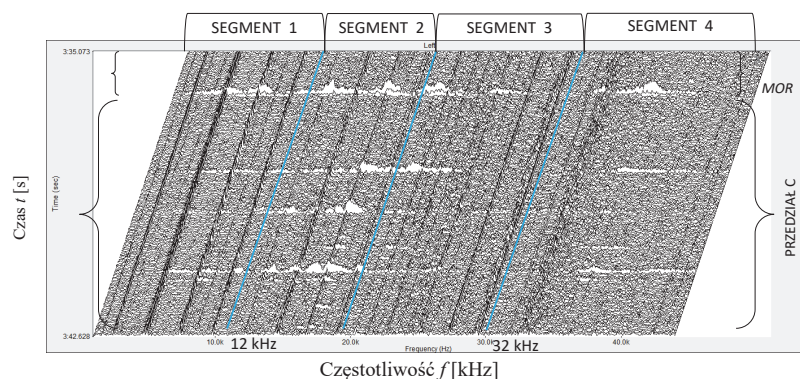
Rys. 4.22. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania serii D_{10} pod wpływem jednego cyklu zamrażania i rozmrażania w zakresie 1–40 kHz

Na kolejnej ilustracji (rys. 4.22) przedstawiono aktywność akustyczną przebiegu zginania dla serii D_2 , która charakteryzowała się mniejszą liczbą zdarzeń, podobnie jak seria B_2 . W przedziale C widoczne są nieliczne zmiany o bardzo niskim poziomie aktywności akustycznej.

Z kolei na rysunku 4.23 przedstawiono zapis aktywności akustycznej przebiegu zginania dla serii D_3 . W zapisie widoczna jest pojedyncza zmiana charakterystyki po przekroczeniu wytrzymałości na zginanie MOR. Nie ma widocznych zmian charakterystyk widmowych w przedziale C, mających wyższą aktywność od tła akustycznego.



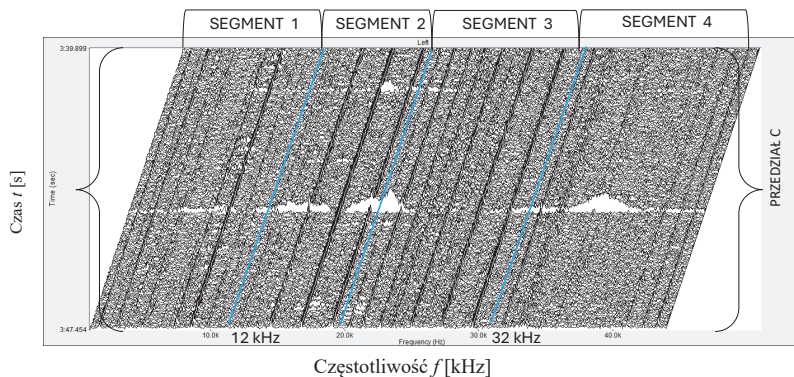
Rys. 4.23. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania serii D_3 pod wpływem dziesięciu cykli zamrażania i rozmarzania w zakresie 1–40 kHz



Rys. 4.24. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania serii E_2 pod wpływem jednego cyklu zamrażania i rozmarzania w zakresie 1–40 kHz

Na rysunku 4.24 przedstawiono zapis aktywności akustycznej przebiegu zginania dla serii E_2 . Widoczna jest charakterystyka widma akustycznego po osiągnięciu poziomu wytrzymałości na zginanie MOR oraz

kolejne zmiany charakterystyk w przedziale C. Stwierdzono, że charakterystyki widmowe wykazują najwyższą aktywność w segmencie 2, w przedziale 12–20 kHz.



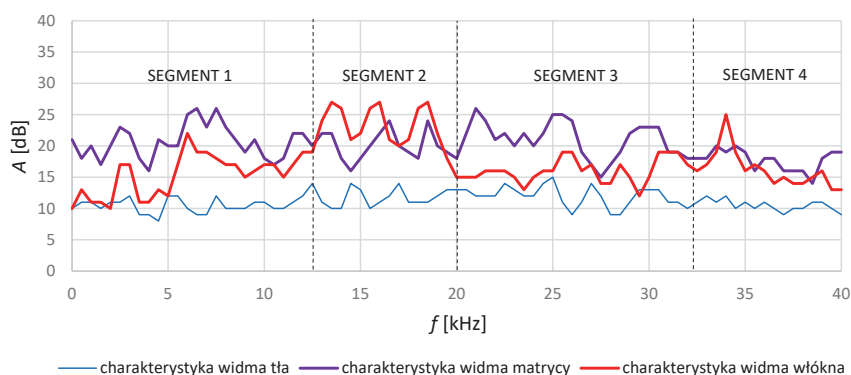
Rys. 4.25. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania serii E_3 pod wpływem 10 cykli zamrażania i rozmrażania w zakresie 1–40 kHz

Na rysunku 4.25 przedstawiono zapis aktywności akustycznej przebiegu zginania serii E_3 poddanej działaniu dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania. Na podstawie analizy wyników potwierdzono, że w zapisie widać mniej zdarzeń, ale o wyższej aktywności akustycznej charakterystyk widmowych w porównaniu z serią poddaną tylko jednemu cyklowi zamrażania i rozmrażania.

Kolejnym etapem działań było wytypowanie wzorcowych widm akustycznych. Jako wzorcowe widma akustyczne dla pęknięcia matrycy cementowej przyjęto zapisy aktywności akustycznej w układzie czasowo-częstotliwościowym podczas próby zginania płyt serii od A_1 do E_1 w stanie powietrzno-suchym, przedstawione na rys. 4.11–4.15. Wzorcową charakterystykę widma akustycznego zrywania włókna wytypowano natomiast spośród odczytanych widm dla płyt serii od A_1 do E_1 w stanie powietrzno-suchym o powtarzającej się podobnej charakterystyce w zakresie częstotliwości 10–24 kHz, wyraźnie różniącej się od charakterystyki matrycy cementowej. Charakterystykę widma akustycznego tła odczytano z przedziału A zapisu próby zginania i określano osobno dla płyt w stanie powietrzno-suchym przez uśrednienie charakterystyk widm akustycznych ze wszystkich serii A_1 do E_1 oraz pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury 230°C przez 3 godziny, bazując na pracach [59], [194], [221]. Wytypowane wzorce charakterystyk widma akustycznego zapisane zostały w 80 przedziałach co 0,5 kHz. W dalszej części pracy posłużono się nazwą wzorzec charakterystyki widmowej

włókna, rozumiany jako sygnał towarzyszący pękaniu matrycy cementowej z włóknami, oraz wzorzec charakterystyki widmowej matrycy, rozumiany jako sygnał towarzyszący pękaniu samej matrycy cementowej.

Na rysunku 4.26 przedstawiono zapis wzorcowych charakterystyk widma akustycznego sygnału towarzyszącego pękaniu matrycy cementowej, włókna oraz dla tła.

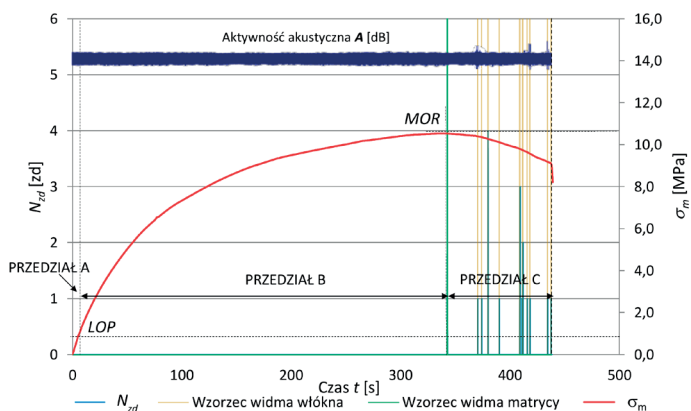


Rys. 4.26. Charakterystyka widma akustycznego tła, włókna oraz matrycy cementowej w funkcji częstotliwości

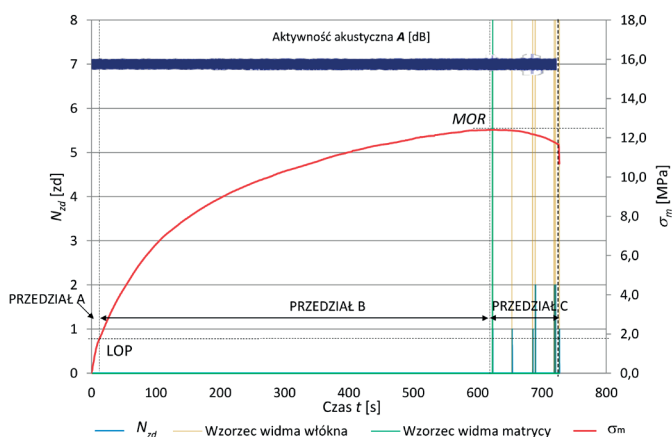
Na podstawie wyników pokazanych na rys. 4.26 potwierdzono, że aktywność akustyczna tła zawiera się na poziomie 10–15 dB. Charakterystyka widma akustycznego matrycy cementowej osiąga aktywność akustyczną na poziomie 25 dB w zakresach 5–10 kHz (segment 1) oraz 20–32 kHz (segment 3), dla włókien odczytano aktywność powyżej 25 dB w zakresie częstotliwości 12–18 dB (segment 2) oraz częstotliwości 32–38 kHz (segment 4). Wykorzystując tak określone wzorce matrycy cementowej, włókien oraz tła, zaimplementowano je do sztucznych sieci neuronowych i rozpoczęto procedurę opisaną w podrozdz. 3.5.2 w celu nauczania sieci identyfikowania i rozróżniania charakterystyki widm akustycznych pochodzących od destrukcji włókien i matrycy. Strukturę sieci neuronowych wybrano jako wielowarstwową jednokierunkową. Po nauczaniu sztucznej sieci neuronowej na danych wejściowych sprawdzono poprawność odwzorowywania sieci na danych do uczenia oraz na danych do testowania. W tym celu podane były dwie pary danych wejściowych, a mianowicie dane, na których uczyła się sieć, na podstawie których sprawdzano umiejętność odtwarzania wzorców, oraz dane do testowania, z wykorzystaniem których sprawdzana była umiejętność identyfikowania wzorcowych charakterystyk widmowych pochodzących od włókna i matrycy w trakcie próby zginania. Następnie otrzymano zapis wyjść

sieci neuronowych rozpoznanych widm akustycznych, odpowiadających odpowiednio dla charakterystyki pęknięcia włókna i matrycy lub tła.

Na rysunkach 4.27–4.36 przedstawiono wyniki rozpoznania wzorców widma akustycznego matrycy cementowej oraz włókna i oznaczono je na zapisie tempa zdarzeń N_{zd} oraz przebiegu naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu. Na wykresach naniesiono również zapis aktywności akustycznej A . Wykresy przedstawiono dla serii A_2 do E_2 poddanych działaniu jednego cyklu zamrażania i rozmrażania oraz dla serii A_3 do E_3 poddanych dziesięciu cyklom zamrażania i rozmrażania.



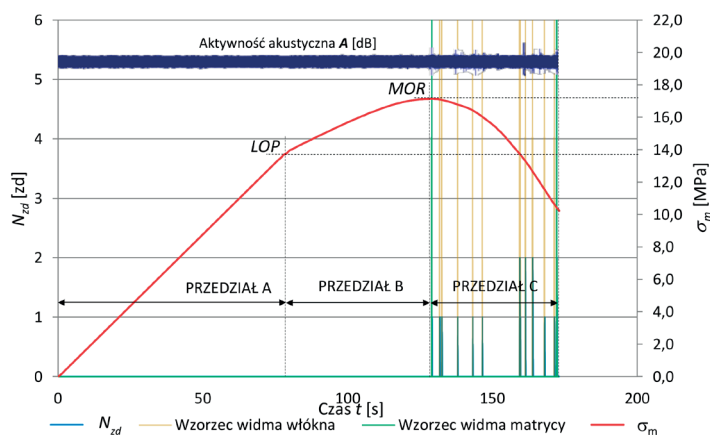
Rys. 4.27. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii A_2 poddanej działaniu jednego cyklu zamrażania i rozmrażania wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych



Rys. 4.28. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii A_3 poddanych działaniu dziesięciu cyklom zamrażania i rozmrażania wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych

Przedstawiona na rysunkach 4.27 i 4.28 dla serii A_2 i A_3 liczba zarejestrowanych zdarzeń jest mniejsza w porównaniu z liczbą zarejestrowanych zdarzeń dla płyt referencyjnych. Nieznacznie mniej zdarzeń zarejestrowano po wykonaniu dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania. Zdarzenia te mają bardzo niską energię E_{zd} w zakresie 10–100 nJ. Zdarzenie pochodzące od pęknięcia matrycy cementowej inicjuje kolejne zdarzenia pochodzące od pęknięcia lub wrywania włókien z matrycy. Pod wpływem wilgoci i cykli zamrażania płyta włóknisto-cementowa staje się bardziej plastyczna, co objawia się zanikiem przedziału A, w którym odkształcenia były proporcjonalne do naprężeń. Pęknięcie matrycy następuje po osiągnięciu wytrzymałości na zginanie *MOR*. Dziesięć cykli zamrażania i rozmrażania istotnie ograniczyło liczbę zarejestrowanych zdarzeń pochodzących od pęknięcia włókien po przekroczeniu wytrzymałości na zginanie *MOR*.

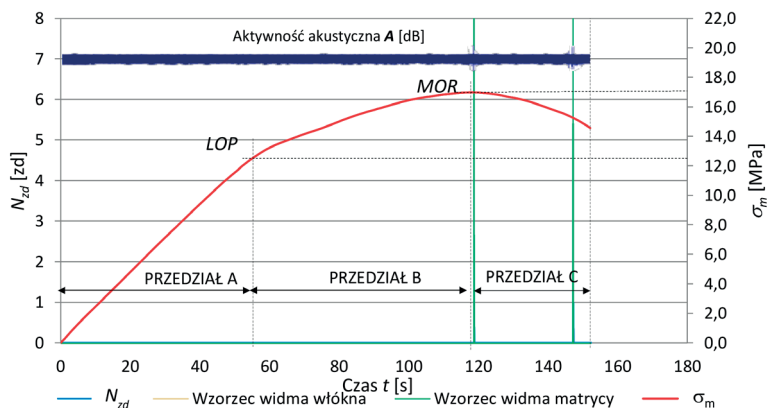
Na rysunkach 4.29 i 4.30 przedstawiono serię B_2 i B_3 . Wpływ cykli zamrażania i rozmrażania dla serii B powoduje wyraźne rozgraniczenie granicy proporcjonalności *LOP* oraz wytrzymałości na zginanie *MOR*. Również przedział C, w którym następowała destrukcja w trakcji zginania, był dłuższy w porównaniu do tego przedziału dla płyt referencyjnych. Zauważalny był duży spadek energii i tempa zarejestrowanych zdarzeń.



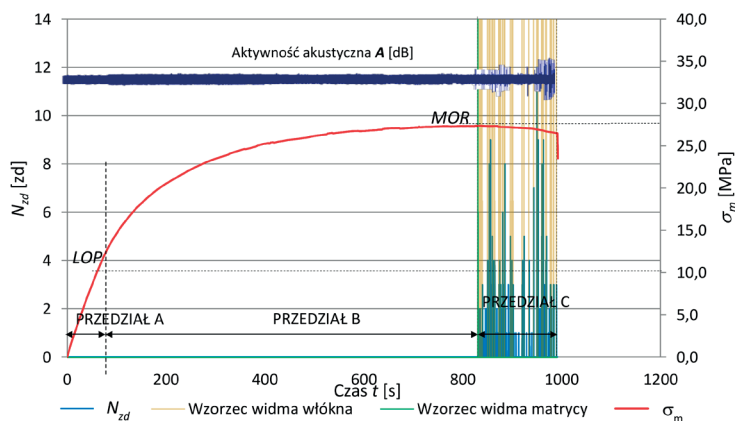
Rys. 4.29. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii B_2 poddanej działaniu jednego cyklu zamrażania i rozmrażania wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych

Z analizy rysunku 4.30 wynika, że brak zdarzeń pochodzących od pęknięcia włókien. Wzrost odkształceń oznacza, iż włókna nie uległy destrukcji, lecz przez wpływ zawilgocenia były bardziej odkształcalne. Należy również wziąć pod uwagę rodzaj destrukcji włókien, który nie emituje sygnałów EA

lub wpływ wilgoci na spadek energii zdarzeń pochodzących od pęknięcia lub wyrwania włókien.



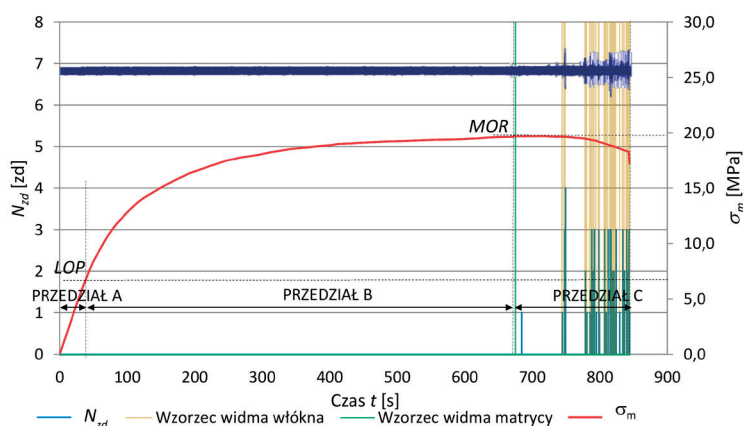
Rys. 4.30. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii B_3 poddanych działaniu dziesięciu cyklom zamrażania i rozmrażania wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych



Rys. 4.31. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii C_2 poddanej działaniu jednego cyklu zamrażania i rozmrażania wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych

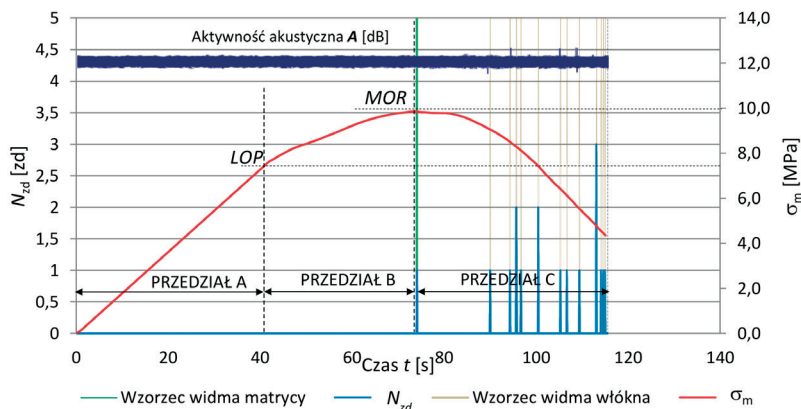
Na podstawie analizy rys. 4.31 stwierdzono z kolei, że zarejestrowane sygnały EA były zbliżone do sygnałów serii C_1 , natomiast przebieg naprężeń zginających σ_m przedstawia się odmiennie. Zauważalny jest wyraźny spadek granicy proporcjonalności oraz wydłużenie przedziału B, w którym przyrost naprężeń do odkształceń jest nieliniowy. Zmiany te można utożsamiać z uplastycznieniem się matrycy cementowej, a liczne i posiadające wysoką

energię powyżej 1000 nJ zarejestrowane zdarzenia pochodzące od pęknięcia włókien świadczą o destrukcji włókien w podobny sposób jak w płytach referencyjnych. Można sądzić, że zastosowane włókna w płytach serii C nie zmieniają własności pod wpływem wilgoci oraz cykli zamrażania i rozmrażania. Potwierdza to również określona wysoka wartość wytrzymałości na zginanie *MOR* wynosząca około 27 MPa. Z kolei na rysunku 4.32 przedstawiono rezultaty dla płyty serii C_3 poddanej działaniu dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania. Widoczny jest niewielki spadek wytrzymałości na zginanie *MOR* rzędu 20% w stosunku do serii C_2 oraz spadek liczby zdarzeń pochodzących od pęknięcia włókien. Długotrwałe zawilgocenie wraz ze zmiennymi cyklami zamrażania i rozmrażania wpływa destrukcyjnie na płytę serii C_3 , obniżając jej wytrzymałość oraz zwiększając odkształcalność. Spadek sumy zarejestrowanych zdarzeń, w porównaniu z płytami referencyjnymi, może wynikać z niższej aktywności akustycznej towarzyszącej pękaniu włókien emitowanych poniżej progu dyskryminacji rejestrowanych zdarzeń.



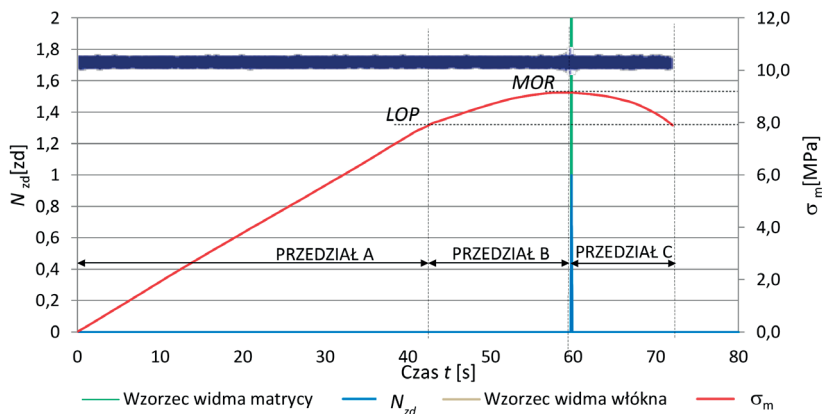
Rys. 4.32. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii C_3 poddanych działaniu dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych

Na rysunku 4.33 przedstawiono przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii D_2 . Zauważa się podobny wpływ zamrażania i rozmrażania jak dla płyt serii B_2 . W płytach referencyjnych tych serii nie wykazano liniowego przyrostu naprężeń do odkształceń. Pod wpływem zamrażania i rozmrażania przebieg naprężeń uległ zmianie. Płyta charakteryzowała się również nieliniowym przyrostem naprężeń do odkształceń przed osiągnięciem wytrzymałości na zginanie *MOR*.



Rys. 4.33. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii D_2 poddanej działaniu jednego cyklu zamrażania i rozmrażania wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych

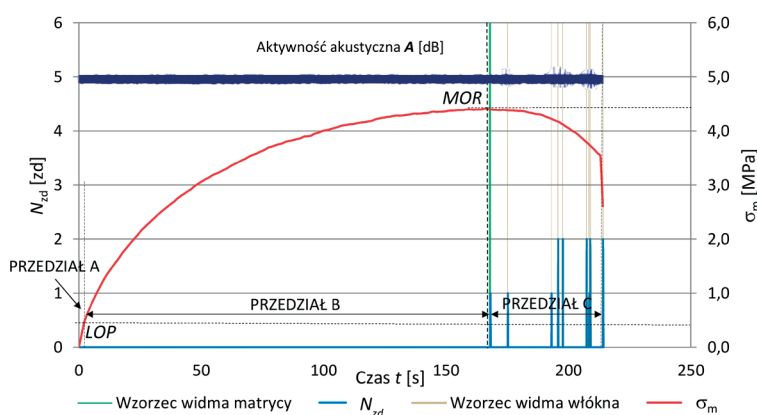
Na rysunku 4.34 przedstawiono przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii D_3 . Działanie dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania spowodowało obniżenie wytrzymałości na zginanie MOR o 60% oraz energię zdarzeń poniżej progu, jaki był możliwy do zarejestrowania podczas badania. Odczytano jedno zdarzenie pochodzące od pęknięcia matrycy cementowej po osiągnięciu wytrzymałości na zginanie MOR .



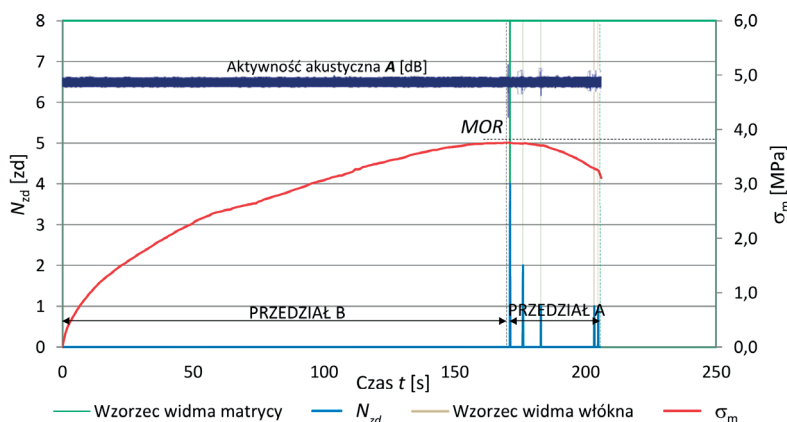
Rys. 4.34. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii D_3 poddanych działaniu dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych

Na rysunku 4.35 przedstawiono przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla płyty serii E_2 . Płyta włókniasto-cementowa pod wpływem zamrażania i rozmrażania utraciła

wytrzymałość na zginanie MOR rzędu 70%. Odształcenie przy uzyskaniu wartości wytrzymałości MOR wyniosło 3,7 mm. W przypadku tej serii wpływ tego czynnika był wyraźne destrukcyjny. Płyty serii E są płytami wewnętrznymi, nieodpornymi na wilgoć oraz zmienne cykle zarażania i rozmrażania. Podobnie jak dla serii A–D, widoczny jest spadek energii oraz liczby zdarzeń EA. Na rysunku 4.36 przedstawiono z kolei przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii E_3 . Poddanie działaniu kolejnych cykli zamrażania i rozmrażania obniżyło jeszcze o 5% wytrzymałość na zginanie MOR oraz tempo zdarzeń N_{zd} .



Rys. 4.35. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii E_{10} poddanej działaniu jednego cyklu zamrażania i rozmrażania wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych



Rys. 4.36. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla serii E_{11} poddanych działaniu dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych

W tabeli 4.3 przedstawiono zestawienie zdarzeń rozpoznanych jako towarzyszących pękaniu włókien oraz pękaniu matrycy cementowej dla płyt poddanych oddziaływaniu 1 i 10 cykli zamrażania–rozmrażania serii A_3 – E_3 i A_2 – E_2 oraz płyt referencyjnych serii A_1 – E_1 .

Tabela. 4.3. Przykładowe zestawienie zdarzeń rozpoznanych jako towarzyszących pękaniu włókien oraz pękaniu matrycy cementowej dla płyt poddanych oddziaływaniu 1 i 10 cykli zamrażania–rozmrażania serii A_2 – E_2 i A_3 – E_3 oraz płyt referencyjnych serii A_1 – E_1

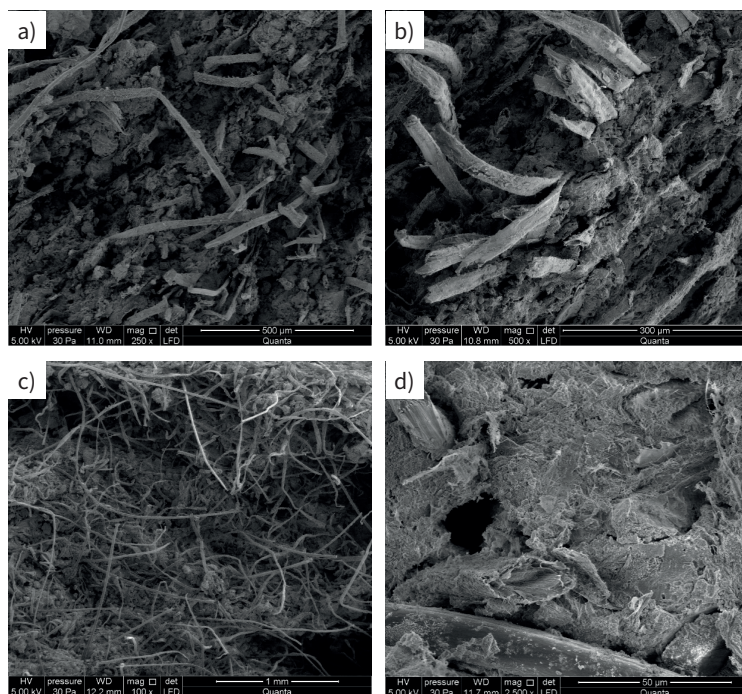
Oznaczenie serii	Suma zdarzeń $\sum N_{zd}$	Zdarzenia rozpoznane $\sum N_{zd,r}$	Liczba zdarzeń przypisanych do pękania włókien $\sum N_{zd,wl}$	Liczba zdarzeń przypisanych do pękania matrycy $\sum N_{zd,m}$
A_1	218	205	197	8
A_2	26	25	19	6
A_3	20	18	0	18
B_1	353	349	294	55
B_2	17	17	14	3
B_3	2	2	0	2
C_1	242	227	205	22
C_2	143	140	110	30
C_3	81	80	25	55
D_1	642	618	514	104
D_2	17	16	10	6
D_3	1	0	0	1
E_1	157	155	145	10
E_2	12	11	7	4
E_3	9	9	3	6

Na podstawie tych rezultatów badań można stwierdzić, że wpływ zmiennych cykli zamrażania i rozmrażania objawia się przede wszystkim spadkiem wytrzymałości na zginanie MOR wszystkich badanych serii płyt. Z analizy wykresów przedstawionych na rys. 4.27–4.36 wynika, że w chwili osiągnięcia wytrzymałości na zginanie MOR następuje pęknięcie matrycy cementowej. Zarysowanie matrycy cementowej inicjuje następne zdarzenia – pęknięcie włókien w płytach włóknisto-cementowych. We wszystkich seriach zaobserwowano powstanie (seria B i D) oraz wyraźne zwiększenie (serie A, C, E) nieliniowego przyrostu naprężeń do odkształceń. Działanie cykli zamrażania i rozmrażania obniża aktywność akustyczną zdarzeń zachodzących podczas próby zginania. W przypadku serii B i D nie odczytano żadnych zdarzeń pochodzących od pęknięcia włókien. Wpływ na spadek energii zdarzeń pęknięcia włókien może mieć odmienny sposób ich destrukcji pod wpływem działania zmiennych cykli zamrażania i rozmrażania. Może to wynikać z faktu zawilgocenia i spęcznienia włókien, natomiast włókna PVA,

które są odporne na działanie wilgoci, mogą nie ulegać przerwaniu, a zostać wyrwane z wilgotnej matrycy cementowej, co również nie będzie emitowało wysokoenergetycznego zdarzenia. Stąd też należy przypuszczać, że wykorzystanie metody optycznej i analiza obrazu przełomu, może dać informacje o sposobie destrukcji włókien, ponieważ zjawiska zostaną zobrazowane.

4.1.2. Analiza metodą optyczną w wykorzystaniu skaningowego mikroskopu elektronowego

Badania metodą optyczną z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego były wykonane we współpracy z Wydziałem Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej. Badania z wykorzystaniem metody optycznej wykonano dla serii A₂–E₂ płyt włóknisto-cementowych, poddanych działaniu jednego cyklu zamrażania i rozmrażania oraz dla serii A₃–E₃, poddanych działaniu dziesięciu cykli zamrażania i rozmrażania. Na rysunku 4.37 przedstawiono przykładowe obrazy dla serii C₂ i C₃ oraz E₂ i E₃, które opisano w tab. 4.4.



Rys. 4.37. Obrazy uzyskane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego serii:
a) C₂, b) C₃, c) E₂, d) E₃

Tabela 4.4. Opis struktury płyt włóknisto-cementowych serii A₂–E₂ oraz A₃–E₃ poddanych działaniu cykli zamrażania i rozmrażania

Seria	Opis struktury płyt włóknisto-cementowych
A ₂ A ₃	– widoczne liczne kawerny najczęściej po wyrwanych włóknach – widoczne wyżłobienia po wyrwanych włóknach – włókna rozmieszczone nieregularnie
B ₂ B ₃	– struktura matrycy bardziej ziarnista z licznymi rozwarstwieniami – liczne kawerny i wyżłobienia po wyrwanych włóknach – niewielka ilość włókien PVA
C ₂ C ₃	– na badanych przełomach więcej włókien PVA – występują skupiska włókien celulozowych – liczne kawerny i wyżłobienia po wyrwanych włóknach – liczne wyżłobienia po wyrwanych ziarnach cementu
D ₂ D ₃	– widoczne liczne kawerny najczęściej po wyrwanych włóknach – widoczne wyżłobienia po wyrwanych włóknach – włókna rozmieszczone nieregularnie
E ₂ E ₃	– wyraźnie długie włókna – widoczne kawerny po wyrwanych włóknach – widoczne wyżłobienia po wyrwanych włóknach – duże zagęszczenie włókien na badanym przełomie – włókna rozmieszczone nieregularnie

Na podstawie analizy rys. 4.37 można stwierdzić, że makrostruktura płyt włóknisto-cementowych poddanych działaniu cykli zamrażania i rozmrażania była zwarta. Podczas obserwacji mikroskopowych strukturę określono jako drobnoporowatą, o wielkości porów do 50 µm. Widoczne były liczne kawerny oraz wyżłobienia w miejscu przełomu po wyrwanych włóknach o szerokości do 500 µm. Powierzchnię włókien pokrywała cienka warstwa matrycy cementowej (film cementowy) i produktów hydratacji. Nieliczne miejsca z przestrzenią pomiędzy włóknami a matrycą świadczą o wytworzonym silnym wiązaniu między nimi. Brak wyraźnych zaobserwowanych różnic na obrazach pomiędzy płytami włóknisto-cementowymi poddanymi jednemu i dziesięciu cyklom zamrażania i rozmrażania (tab. 4.4). Warto nadmienić, że w procesie zamrażania i rozmrażania oraz zawilgocenia i suszenia tworzy się etryngit zwiększający objętość [107].

W trakcie analizy płyt włóknisto-cementowych serii A₂–E₂ oraz A₃–E₃ poddanych działaniu cykli zamrażania i rozmrażania zaobserwowano, że wyraźnie widać mechaniczne uszkodzenia włókien celulozowych oraz PVA, które zostały przerwane lub wyrwane z matrycy cementowej podczas próby trójpunktowego zginania. W przypadku serii E zaobserwowano liczniejsze kawerny i wyżłobienia po wyrwanych włóknach, co przedstawiono na powiększonym obrazie matrycy cementowej na rys. 4.37d. Analizując obrazy wykonane z wykorzystaniem SEM oraz rezultaty badań metodą emisji

akustycznej, zaobserwowano, że na płyty włóknisto-cementowe działanie cykli zamrażania i rozmrażania działa destrukcyjnie, powodując osłabienie przyczepności włókien do matrycy cementowej oraz obniżenie wytrzymałości na rozciąganie włókien celulozowych.

4.2. Badania wpływu promieniowania UV (badania starzeniowe)

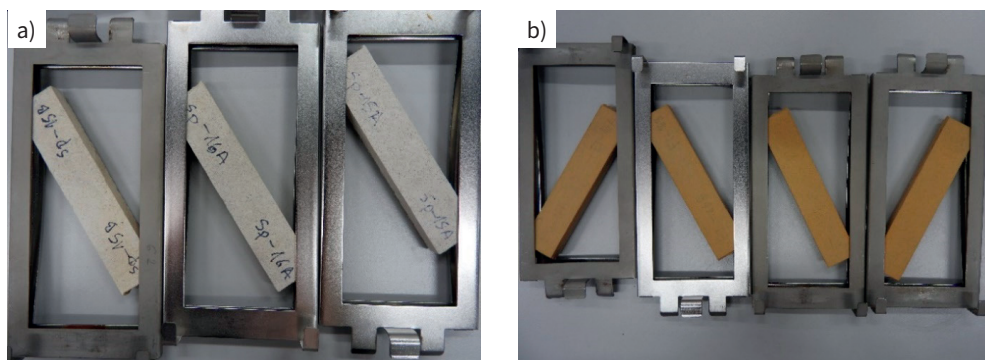
Jak pokazuje praktyka budowlana, promieniowanie UV jest oddziaływaniem destrukcyjnym dla materiałów budowlanych. Należy przypuszczać, że również w przypadku kompozytów włóknisto-cementowych promieniowanie UV będzie istotnie wpływać na ich proces niszczenia oraz strukturę, ponieważ na podstawie dokonanego przeglądu stanu wiedzy wyraźnie widać lukę w tej kwestii. Należy zaznaczyć, że rezultaty takich badań z pewnością są bardzo istotne widzenia aspektu trwałości i bezpieczeństwa eksploatacji elewacji, w których zastosowane są okładziny z płyt włóknisto-cementowych.

Badania zostały przeprowadzone w ramach interdyscyplinarnego projektu naukowo-badawczego nr 01/02/2017 pn. „Nieniszcząca diagnostyka obiektów budowlanych i technicznych w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności ich eksploatacji”, realizowanego w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej przy współpracy pracowników Politechniki Wrocławskiej, Politechniki Śląskiej i Akademii Górniczo-Hutniczej wraz z Doosan Babcock Energy Polska S.A. i Instytutem Badań i Rozwoju Motoryzacji BOS-MAL. Zespół kierowali prof. Krzysztof Schabowicz oraz prof. Janusz Juraszek. Efektem tej współpracy jest między innymi opracowanie metody badania struktury płyt włóknisto-cementowych i oceny wpływu promieniowania UV na ich powierzchnię i strukturę z wykorzystaniem komory starzeniowej.

4.2.1. Badania metodą emisji akustycznej

W celu wykazania wpływu promieniowania UV na proces niszczenia oraz strukturę płyt włóknisto-cementowych przeprowadzono badania z wykorzystaniem emisji akustycznej podczas trójpunktowego zginania. Wcześniej próbki umieszczono w komorze do badań starzeniowych. Urządzenie przeznaczone było do wykonywania przyspieszonych starzeń materiałów i wyrobów pod wpływem oddziaływania światła i warunków klimatycznych,

takich, jak temperatura, wilgotność względna oraz deszcz. Więcej informacji na temat urządzenia zamieszczono w podrozdz. 3.2 oraz w pracach [56], [81], [202]. W komorze umieszczono po 10 próbek o wymiarach 20×100 mm z serii A_4 i B_4 (przypadek 4). Na rysunku 4.38 pokazano przykładowo fotografie próbek serii A_4 i B_4 po badaniach w komorze starzeniowej.

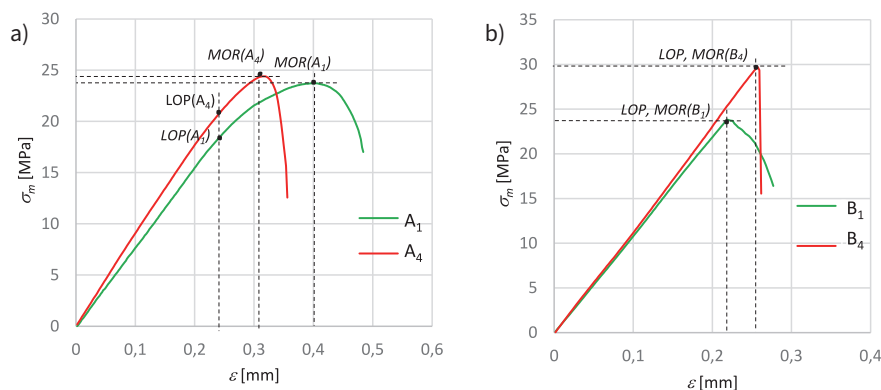


Rys. 4.38. Próbkę płyt włóknisto-cementowych po badaniach w komorze starzeniowej odpowiednio dla serii: a) A_4 , b) B_4

W tabeli 4.5 zestawiono uzyskane podczas badań przykładowe wartości siły niszczącej F , granicy proporcjonalności LOP , modułu Younga E_D oraz uśrednionej wytrzymałości na zginanie MOR . Na rysunku 4.39 przedstawiono z kolei zależność σ - ε podczas trójpunktowego zginania dla serii A_1 i B_1 (płyty referencyjne), A_4 i B_4 . Na wykresie naniesiono wartość granicy proporcjonalności LOP oraz wytrzymałości na zginanie MOR .

Tabela 4.5. Zbiorcze zestawienie przykładowych wartości siły niszczącej F , granicy proporcjonalności LOP , modułu Younga E_D oraz uśrednionej wytrzymałości na zginanie MOR dla płyt serii A_4 i B_4 poddanych działaniu promieniowania UV. W nawiasach podano wartości współczynników zmienności

Oznaczenie serii płyty	Siła niszcząca F [N]	Granica proporcjonalności LOP [MPa]	Moduł Younga E_D [GPa]	Wytrzymałość na zginanie MOR [MPa]
SERIA A_4	347,31	21,17	6,90	24,42 (3,92%)
SERIA B_4	436,18	30,25	7,60	30,27 (1,68%)

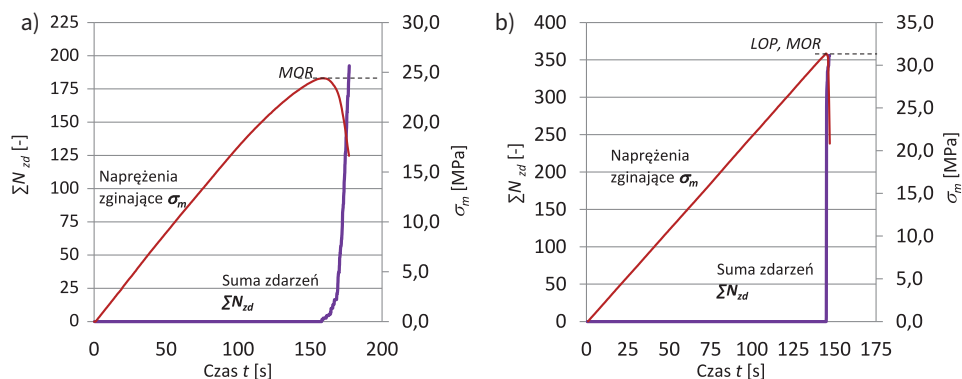


Rys. 4.39. Zależność σ - ε podczas zginania płyt w stanie powietrzno-suchym oraz poddanych promieniowaniu UV (badaniom starzeniowym): a) seria A, b) seria B

Na podstawie analizy wyników badań (rys. 4.39, tab. 4.5) zauważono, że pod wpływem oddziaływania promieniowania UV nieznacznie wzrasta wytrzymałość na zginanie MOR. Szczególnie jest to widoczne w przypadku płyt serii B. Analogiczne spostrzeżenia dotyczą wyznaczonego modułu Younga E_D oraz granicy proporcjonalności LOP. Kolejnym etapem badań wpływu promieniowania UV na proces niszczenia i strukturę płyt włókno-cementowych była analiza sygnałów EA zarejestrowanych podczas przebiegu próby zginania na podstawie deskryptorów EA, takich jak tempo zdarzeń N_{zd} , suma zdarzeń $\sum N_{zd}$, energia zdarzeń E_{zd} oraz rozkładu częstotliwościowego sygnału EA. W tabeli 4.6 zestawiono przykładowe wartości sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$ wraz z maksymalną zarejestrowaną energią zdarzeń E_{zd} dla badanych płyt serii A₄ i B₄. Obliczono również średnią liczbę zdarzeń N_{sr} oraz średnią energię zdarzeń E_{sr} zarejestrowanych podczas badania dla wybranego przykładowego zapisu sygnału EA podczas próby zginania. Na rysunku 4.40 z kolei pokazano zależność σ_m i $\sum N_{zd}$ w funkcji czasu t dla badanych płyt.

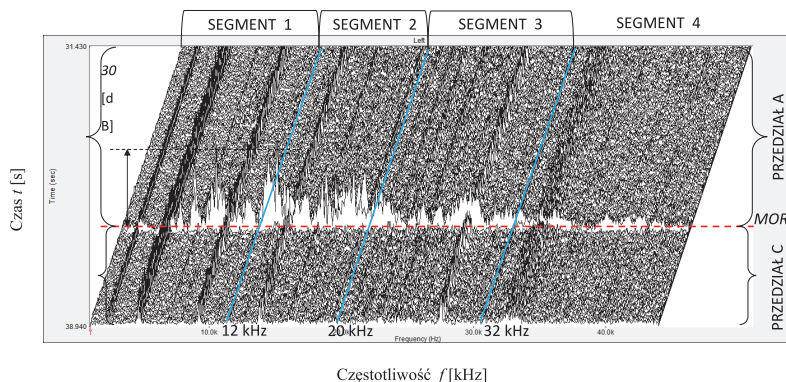
Tabela 4.6. Zbiorcze zestawienie wartości sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$, maksymalnej energii zdarzeń E_{zd} , średniej liczby zdarzeń N_{sr} oraz średniej energii zdarzeń E_{sr} dla płyt poddanych działaniu promieniowania UV serii A₄ i B₄

Oznaczenie serii płyty	Suma zdarzeń $\sum N_{zd}$ [zd]	Średnia liczba zdarzeń N_{sr} [nJ]	Maksymalna energia zdarzeń E_{zd} [nJ]	Średnia energia zdarzeń E_{sr} [nJ]
Seria A ₄	192	0,128	6026,0	41,55
Seria B ₄	342	0,320	41320,0	95,42

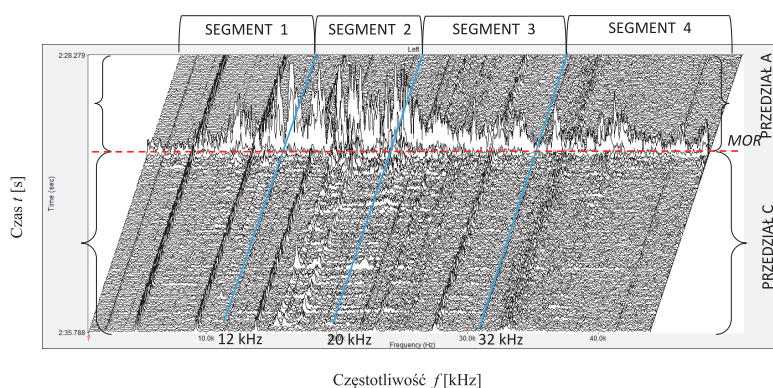


Rys. 4.40. Zależność σ_m i ΣN_{zd} w funkcji czasu t dla płyt: a) serii A_4 , b) serii B_4

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań (rys. 4.40, tab. 4.6) stwierdzono zauważalny spadek zarejestrowanych zdarzeń oraz zmianę przebiegu sumy zdarzeń ΣN_{zd} . Oprócz spadku samej wartości sumy zdarzeń ΣN_{zd} pod wpływem oddziaływania promieniowania UV zauważono, że w zasadzie wszystkie zarejestrowane zdarzenia znajdują się w bardzo krótkim segmencie czasowym. Szczególnie jest to widoczne w przypadku płyty serii B. Na tej podstawie można wnioskować, że zdarzenia te pochodzą od pojedynczego pęknięcia matrycy cementowej, co może świadczyć o destrukcyjnym działaniu promieniowania UV. W celu potwierdzenia źródła pochodzenia zarejestrowanych zdarzeń EA posłużono się analizą spektralną charakterystyk widm akustycznych zdarzeń EA. Na rysunkach 4.41 i 4.42 pokazano przykładowe zapisy aktywności akustycznej A w funkcji czasowo-częstotliwościowej kolejno dla płyt serii A_4 i B_4 .

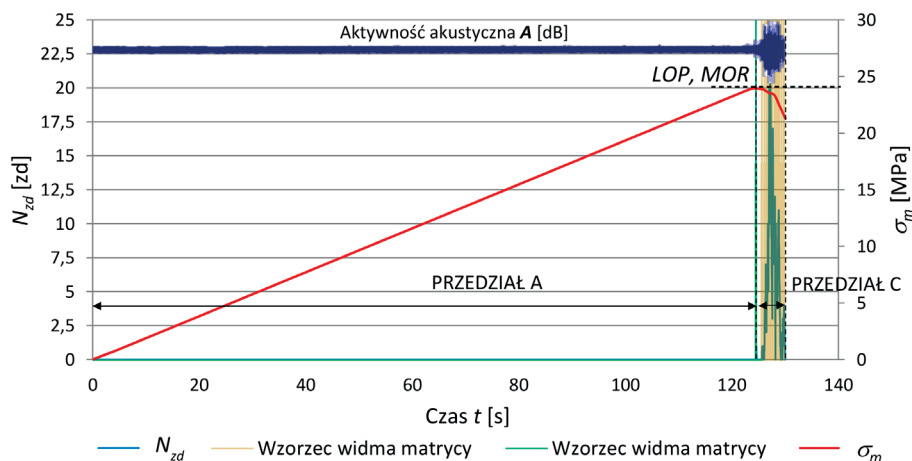


Rys. 4.41. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania płyty serii A_4 pod wpływem oddziaływania promieniowania UV w zakresie 1–40 kHz

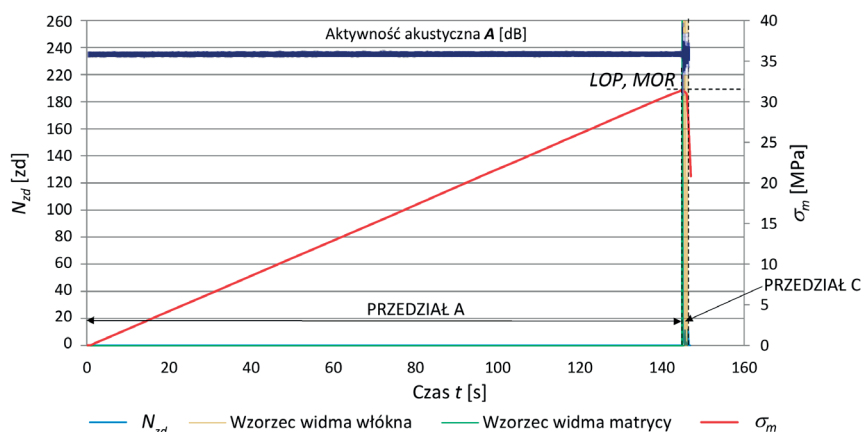


Rys. 4.42. Przykładowy zapis czasowo-częstotliwościowy aktywności akustycznej A podczas próby zginania płyty serii B_4 pod wpływem oddziaływania promieniowania UV w zakresie 1–40 kHz

Na podstawie analizy rys. 4.41 i 4.42 potwierdzono, że dla płyt poddanych oddziaływaniu promieniowania UV oprócz wyraźnego pęknięcia matrycy przy osiągnięciu poziomu wytrzymałości na zginanie MOR widoczne były zmiany charakterystyk widm akustycznych w przedziale C, które odpowiadały pękaniu włókien. Można więc przypuszczać, że część włókien została uszkodzona podczas oddziaływania promieniowania UV. Do wyjaśnienia tego posłużono się sztucznymi sieciami neuronowymi i wykonano procedurę rozpoznania wzorców widma akustycznego matrycy cementowej i włókien. Uczenie oraz testowanie sztucznych sieci neuronowych wykonano według opisu podanego w podrozdziale 3.5.2.



Rys. 4.43. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla płyty serii A_4 pod wpływem oddziaływania promieniowania UV wraz z naniesioną identyfikacją wzorców charakterystyk widmowych



Rys. 4.44. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla płyty serii B_4 pod wpływem oddziaływania promieniowania UV wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych

Na rysunkach 4.43 i 4.44 przedstawiono wyniki rozpoznania wzorców widma akustycznego matrycy cementowej i włókna oraz naniesiono je na zapisie tempa zdarzeń N_{zd} oraz przebiegu naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu. Na wykresach naniesiono również zapis aktywności akustycznej A . Wykresy przedstawiono dla płyt serii A_4 i B_4 .

W tabeli 4.7 przedstawiono zestawienie zdarzeń rozpoznanych, jako towarzyszących pękaniu włókien oraz pękaniu matrycy cementowej płyt poddanych oddziaływaniu promieniowania UV (badań starzeniowych) serii A_4 oraz B_4 oraz w celach porównawczych płyt referencyjnych serii A_1 i B_1 .

Tabela. 4.7. Przykładowe zestawienie zdarzeń rozpoznanych jako towarzyszących pękaniu włókien oraz pękaniu matrycy cementowej płyt poddanych oddziaływaniu promieniowania UV serii A_4 i B_4 oraz płyt referencyjnych serii A_1 i B_1

Oznaczenie serii	Suma zdarzeń $\sum N_{zd}$	Zdarzenia rozpoznane $\sum N_{zd,r}$	Liczba zdarzeń przypisanych do pękania włókien $\sum N_{zd,wł}$	Liczba zdarzeń przypisanych do pękania matrycy $\sum N_{zd,m}$
A_1	218	205	197	8
A_4	135	132	45	87
B_1	353	349	294	55
B_4	305	300	124	176

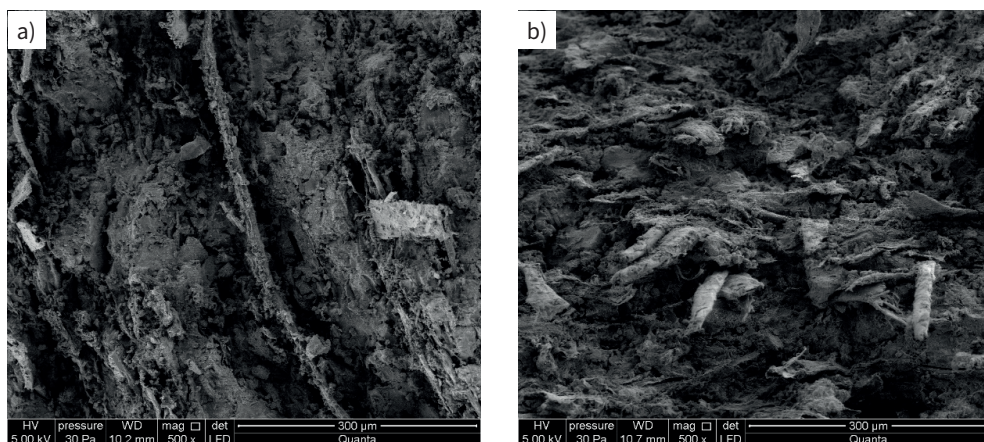
Na podstawie analizy wyników badań (tab. 4.7, rys. 4.43) wyraźnie widoczny był zmniejszony przedział C poprzez spadek liczby zdarzeń pochodzących od włókien pod wpływem oddziaływania promieniowania UV. Można sądzić, że pęknięcie matrycy cementowej inicjuje pękanie włókien. Na wykresie naprężeń zginających σ_m stwierdzono brak przedziału B charakteryzującego się nieliniowym przyrostem naprężeń do odkształceń. Granica proporcjonalności pokrywała się z wytrzymałością na zginanie MOR. Analizując wyniki badań (tab. 4.7, rys. 4.44), zauważono, że w przypadku płyty serii B₄ również widoczny był spadek liczby zdarzeń rozpoznanych dla pękania włókien oraz wyraźne skrócenie przedziału C, w którym rejestrowane były zdarzenia.

Podsumowując przedstawione rezultaty, należy stwierdzić, że rozkład częstotliwościowy zapisu EA podczas próby zginania wraz z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych do rozpoznawania wzorców umożliwił ocenę destrukcyjnego wpływu oddziaływania promieniowania UV (badań starzeniowych). Badania wykazały, że oddziaływanie promieniowania UV wpłynęło destrukcyjnie na włókna, na co wskazywał spadek liczby zdarzeń rozpoznanych jako pękanie włókien. Ponadto, analizując wyniki przedstawione w tab. 4.7, potwierdzono, że po poddaniu płyt badaniom starzeniowym wyraźnie zmieniły się proporcje liczby zdarzeń przypisanych do pękania włókien w stosunku do liczby zdarzeń przypisanych do pękania matrycy. Starzenie powodowało, że rosła liczba zdarzeń przypisanych do pękania matrycy, co jednoznacznie może świadczyć o destrukcji włókien zawartych w strukturze płyt. W celu potwierdzenia tego stwierdzenia w dalszej części pracy zastosowano metodę optyczną SEM do analizy obrazu przełomu próbek. Metoda SEM może dać informacje o strukturze badanych płyt i sposobie destrukcji włókien.

4.2.2. Analiza metodą optyczną w wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM)

Badania metodą optyczną z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego wykonane było we współpracy z Wydziałem Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej, o której autor pisał w podrozdz. 3.4.

Badaniom z wykorzystaniem metody optycznej poddano płyty włóknisto-cementowe serii A₄ i B₄ poddane oddziaływaniu promieniowania UV (badań starzeniowych). Na rysunku 4.45 przedstawiono przykładowe obrazy dla serii A₄ i B₄, które opisano w tab. 4.8.



Rys. 4.45. Obrazy uzyskane z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego dla serii: a) A₄, b) B₄

Tabela 4.8. Opis struktury płyt włóknisto-cementowych dla serii A₄ i B₄ poddanych działaniu promieniowania UV (badaniom starzeniowym)

Seria	Opis struktury płyt włóknisto-cementowych
A ₄	– występują silnie zwarte struktury o nieregularnym kształcie – nie stwierdzono obecności kryształów ettringitu – włókna celulozowe charakteryzują się silnie zdegradowaną strukturą – włókna rozmieszczone nieregularnie – część włókien wypalona lub wtopiona w matrycę
B ₄	– występują silnie zwarte struktury o nieregularnym kształcie – silnie wiązanie pomiędzy włóknami a matrycą (nieliczne miejsca z wolną przestrzenią) – nie zaobserwowano kryształów ettringitu – struktura niektórych włókien zdegradowana – większość włókien rozmieszczona regularnie – część włókien wypalona lub wtopiona w matrycę

Na podstawie analizy wyników badań (rys. 4.45, tab. 4.8) należy stwierdzić, że mikrostrukturę płyt włóknisto-cementowych serii A₄ i B₄ określić można jako zwartą, nie stwierdzono bowiem widocznego wyraźnego destrukcyjnego wpływu działania promieniowania UV. Podczas obserwacji mikroskopowych strukturę określono jako drobnoporowatą o wielkości porów do 50 μm. Widoczne były kawerny oraz wyżłobienia w miejscu przełomu po wyrwanych włóknach o szerokości do 500 μm. Na obrazach widoczne są wyraźnie włókna celulozowe i włókna PVA. Występują różne formy uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H, przeważa faza „bezpostaciowa” oraz zbudowana z silnie przylegających cząstek. Analizując skład włókna, stwierdzono występowanie pierwiastków wchodzących w skład włókien lub częściowo wchodzących w skład cementu. Analiza składu chemicznego

wykonana przy użyciu analizatora EDS dla matrycy odpowiada pierwiastkom wchodzącym w skład cementu. Powierzchnię włókien pokrywa cienka warstwa matrycy cementowej produktów hydratacji.

4.2.3. Badania z wykorzystaniem spektrofotometru

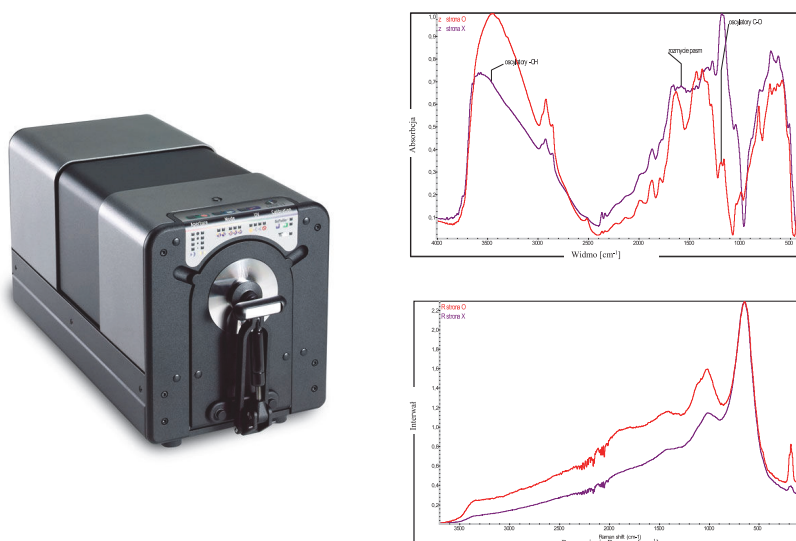
Badania przeprowadzono z wykorzystaniem spektrofotometru Color i5 firmy X-Rite [85], który pokazano na rys. 4.46, a badaniom poddano próbki referencyjne serii A_1 i B_1 oraz próbki po naświetlaniu w komorze starzeniowej serii A_4 i B_4 . Celem tych badań było określenie różnicy barwy powierzchni między płytą referencyjną a płytą poddaną naświetlaniu promieniami UV w komorze starzeniowej. Używany spektrofotometr wyposażony jest w błyskową lampę ksenonową i sferę fotometryczną, która umożliwia oświetlenie badanej próbki światłem rozproszonym. Detektorem światła w urządzeniu jest spektrometr, który rejestruje promieniowanie w zakresie widzialnym (400 do 700 nm). Detektor umieszczony jest tak, że kąt między normalną do powierzchni próbki i kierunkiem obserwacji wynosi 8 stopni. Powyższe ustawienie źródła światła i detektora jest jedną z wielu standardowych geometrii pomiaru barwy i oznaczane jest symbolem $d:8^\circ$. Do przedstawienia barwy w postaci numerycznej potrzebny jest widmowy współczynnik odbicia (zmierzony spektrofotometrem), wartości iluminantu normalnego CIE oraz układu kolorymetrycznego (tzw. obserwator kolorymetryczny). Obliczenia wykonywane są z użyciem specjalistycznego oprogramowania. Po pomiarze próbki referencyjnej i próbki poddanej naświetlaniu promieniowaniem UV wykonano obliczenia zmiany barwy według wzoru (4.1):

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (4.1)$$

gdzie:

$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$ – różnica barwy wyrażona we współrzędnych w przestrzeni barw CIELAB.

Po przeprowadzeniu badań w komorze starzeniowej płyty włóknisto-cementowe poddano badaniom spektrofotometrycznym. W tabeli 4.9 zestawiono wyniki zmiany barwy dla wybranych dwóch płyt włóknisto-cementowych po przebywaniu w komorze starzeniowej w odniesieniu do próbek referencyjnych. Wyniki zmiany barwy przedstawiono za pomocą różnicy współrzędnych w przestrzeni barw CIELAB. Na rysunku 4.47 z kolei zamieszczono zmierzony współczynnik odbicia dla badanych płyt.

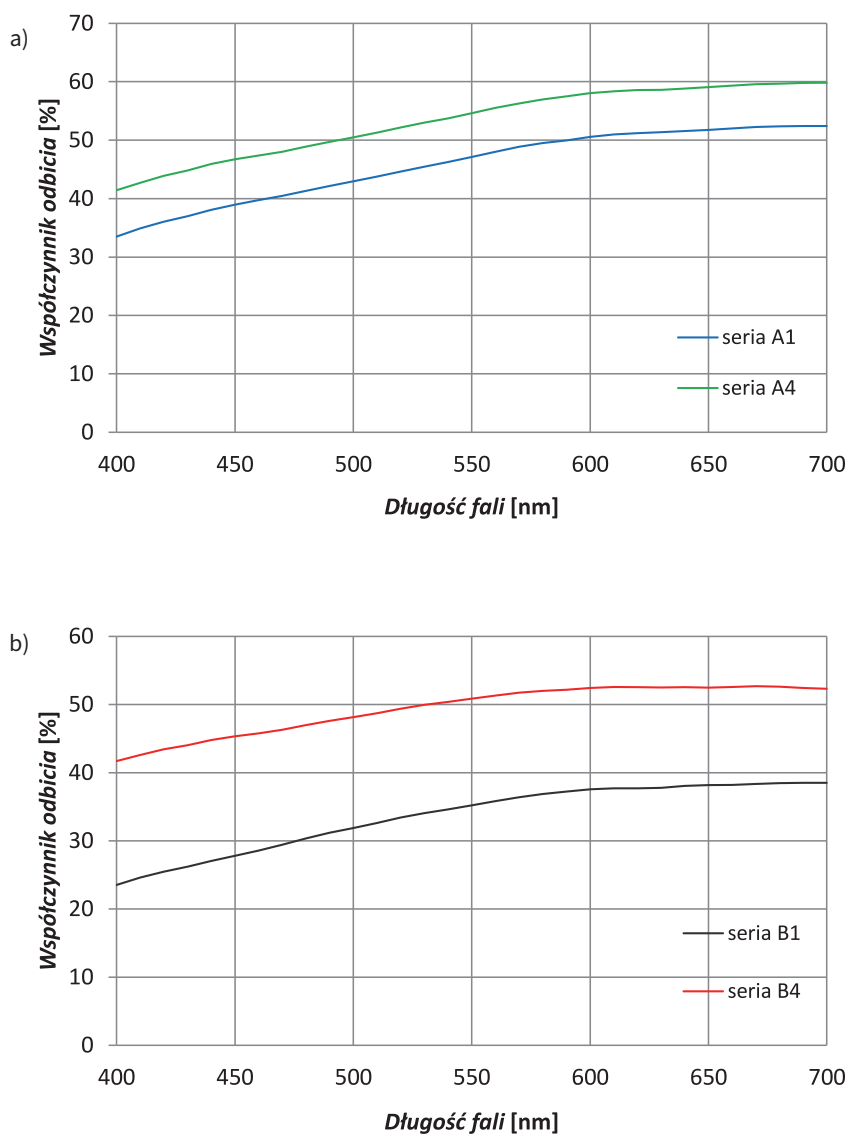


Rys. 4.46. Spektrofotometr [85] oraz przykładowe wyniki badań [202]

Tabela 4.9. Wyniki zmiany barwy badanych płyt włóknisto-cementowych (D65/10°)

Oznaczenie serii badanej próbki	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE_{ab}^*	Stopień szarej skali wg PN-EN ISO 105-A05:2000
A ₄	4,57	-0,16	-1,19	$4,73 \pm 0,16$	1,5
B ₄	10,72	-0,37	-4,33	$11,57 \pm 0,85$	1,5

Na podstawie zamieszczonych rezultatów badań z wykorzystaniem spektrofotometru jednoznacznie stwierdzono, że przebywanie płyt włóknisto-cementowych w komorze starzeniowej wpływa na zmianę ich barwy. Biorąc pod uwagę rezultaty zamieszczone w tab. 4.9 oraz na rys. 4.47, można stwierdzić, że dla obu próbek zaobserwowano wybielenie. Szczególnie jest to widoczne dla próbki płyty barwionej w masie serii B. Ogólna zmiana barwy ΔE_{ab}^* wynosi 10,72. Jest to bardzo duża zmiana barwy. W przypadku płyt serii A zmiana barwy ΔE_{ab}^* jest mniejsza i wynosi 4,57. W obu płytach wystąpiła również zmiana w kierunku barwy niebieskiej (parametr $-\Delta b^*$), stąd też nasuwa się wniosek, że próbki przebywające w komorze starzeniowej mają inną barwę i w związku z tym nie mogą być akceptowane w zastosowaniach, w których barwa powierzchni jest istotna. Jest to szczególnie ważne w przypadku elewacji, w których okładziny wykonane są z płyt włóknisto-cementowych barwionych w masie (seria B), gdyż w ich przypadku, jak wynika z badań, zmiana barwy jest największa.



Rys. 4.47. Współczynnik odbicia dla badanych płyt włóknisto-cementowych poddanych badaniom w komorze starzeniowej w odniesieniu do płyt referencyjnych, seria: a) A₁ i A₄, b) B₁ i B₄

Przedstawione rezultaty z przeprowadzonych badań własnych autora jednoznacznie wskazują na destrukcyjny wpływ oddziaływania promieniowania UV (badania starzeniowych) zarówno na proces niszczenia, jak i na strukturę płyt włóknisto-cementowych. Wyraźnie pokazały to rezultaty badań wykonanych z użyciem emisji akustycznej w próbie trójpunktowego zginania. Wykonane badania i analiza ich rezultatów umożliwiły ponadto zaobserwowanie

zmian zachodzących w mikrostrukturze badanych materiałów pod wpływem przyspieszonego starzenia. Analiza obrazów przekrojów płyt uzyskanych zarówno bezpośrednio po produkcji (płyt referencyjnych), jak i w eksploatacji pozwala na określenie stanu zarówno płyt nowych, jak i eksploatowanych, ich składu oraz degradacji.

4.3. Badania wpływu wysokiej temperatury (230°C, pożar)

4.3.1. Wieloskalowe ujęcie wpływu wysokiej temperatury 230°C na strukturę płyt z wykorzystaniem metody SEM oraz nanoindentacji

W niniejszym rozdziale monografii przedstawiono wieloskalowe podejście do identyfikacji wewnętrznych zmian strukturalnych płyt włóknisto-cementowych poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury 230°C przez 3 godziny w piecu elektrycznym. Zastosowano dwie zaawansowane techniki laboratoryjne, tj. obrazowanie z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) oraz testy nanoindentacji. Pierwsza z tych technik umożliwia uzyskanie mikrofotografii zastosowanych włókien wraz ze składem pierwiastkowym badanych próbek. W metodzie nanoindentacji natomiast ujawniono mechaniczną morfologię materiału pod względem twardości i modułów sprężystości. Wszystkie badania przeprowadzono na dwóch seriach płyt włóknisto-cementowych, tj. płytach referencyjnych oraz poddanych obróbce w wysokiej temperaturze. Na potrzeby przeprowadzenia tych badań powstał zespół naukowy⁴, którego autor niniejszej monografii był członkiem. Ideą nanoindentacji jest określenie właściwości mechanicznych elementów kompozytowych na podstawie obserwacji ich reakcji na obciążenie punktowe, po którym następuje ciągle odciążanie powierzchni. Początkowo, ze względu na ograniczenia sprzętowe, technika nanoindentacji była stosowana głównie w stosunkowo jednorodnych ośrodkach, czyli materiałach warstwowych o znanej grubości poszczególnych warstw. Obecnie lepsze możliwości sprzętowe umożliwiły zastosowanie tej techniki do materiałów mikroheterogenicznych, wykazujących różną morfologię mechaniczną w zależności od skali obserwacji.

4 Badania zrealizowano w Katedrze Geotechniki, Hydrotechniki, Budownictwa Podziemnego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej. Rezultatem istotnej aktywności naukowej autora w ramach współpracy z tą Katedrą są między innymi wspólne publikacje [55], [57].

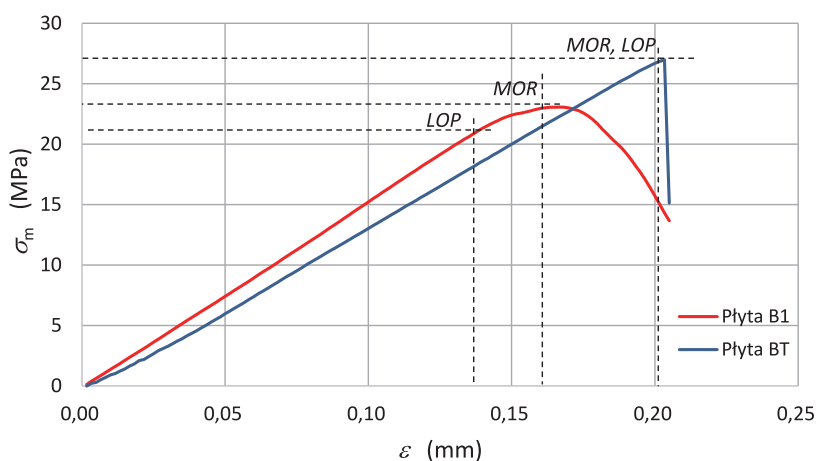
Badaniom poddano płyty włóknisto-cementowe do zastosowań zewnętrznych, barwione w masie, oznaczone w tab. 3.2 jako seria B. Do badań przygotowano dwa zestawy próbek. Były one oznaczone odpowiednio jako B_1 oraz B_T . Próbkę referencyjną (niepoddaną obróbce w wysokiej temperaturze) oznaczono jako B_1 , a te, które poddano obróbce wysokotemperaturowej w piecu elektrycznym przez 3 godziny w temperaturze 230°C, oznaczono jako B_T . Parametry procedury nagrzewania dobrano doświadczalnie po przeprowadzeniu wstępnych testów, aby wywołać istotne zmiany w mikrostrukturze badanych materiałów, związane z pirolizą włókien celulozowych. Zestawienie podstawowych parametrów technicznych badanych płyt włóknisto-cementowych zamieszczono w tab. 4.10.

Na rysunku 4.48 przedstawiono zależność σ - ε podczas trójpunktowego zginania dla badanych płyt. Na wykresie naniesiono wartość granicy proporcjonalności LOP oraz wytrzymałości na zginanie MOR .

Tabela 4.10. Zestawienie podstawowych parametrów technicznych badanych płyt włóknisto-cementowych

Oznaczenie serii płyty	Wytrzymałość na zginanie MOR [MPa]	Gęstość [g/cm ³]
Seria B_1	23,25 (1,59%)	1,60
Seria B_T	26,86 (2,45%)	1,50

W nawiasie podano wartości współczynników zmienności



Rys. 4.48. Zależność σ - ε podczas zginania płyt serii B_1 i B_T

W przypadku badań w mikroskali w pierwszej kolejności analizę wykonano za pomocą obrazowania SEM wraz z badaniem składu pierwiastkowego. W tym celu wykorzystano wysokorozdzielczy środowiskowy skaningowy mikroskop elektronowy Quanta FEG-250, FEI opisany w podrozdz. 3.4. Badania te wykonano we współpracy z Wydziałem Budownictwa i Architektury Politechniki Świętokrzyskiej. Następnie omawiane płyty włóknisto-cementowe zostały poddane testom nanoindentacji. W tym celu należało odpowiednio przygotować próbki do badań, tak aby uzyskać zadowalającą jakość, na którą składają się: równoległość i chropowatość powierzchni, czystość próbki oraz pochylenie próbki.

Testy nanoindentacji przeprowadzono z użyciem Nanoindenter CSM TTX-NHT (rys. 4.49), wyposażonego w diamentową końcówkę Berkovicha (współczynnik Poissona $\nu_i = 0,07$, moduł sprężystości $E_i = 1,000$ GPa, $\beta = 1,034$).



Rys. 4.49. Stanowisko do testów nanoindentacji (po lewej) oraz próbka przygotowana do testów (po prawej); fot. T. Gorzelańczyk

Ocenę parametrów mechanicznych płyt włóknisto-cementowych przeprowadzono metodą opracowaną dla materiałów niejednorodnych na podstawie cementowej z wykorzystaniem techniki Grid Indentation Technique (GIT). Dla każdej próbki zastosowano regularną siatkę 220 testów (rys. 4.50). Istotne parametry sieci, takie jak odległość między lokalizacjami wgłębników, liczba testów i maksymalne obciążenie pojedynczego testu, zostały określone za pomocą próbnych testów nanoindentacji.

W każdym punkcie siatki wykonano pojedynczy standardowy test nanoindentacji przy maksymalnym obciążeniu 500 mN. Test przebiega w następujący sposób: ciągły wzrost siły do ustalonej wartości $F_{\max}$, następnie w krótkim czasie utrzymywana jest ustalona maksymalna wartość siły, po czym następuje odciążenie, które również odbywa się w sposób ciągły (rys. 4.51a). Podczas badania rejestrowana jest zależność między siłą F i wartością zagłębienia końcówki wgłębnika h . Przykładowy wykres zależności $F-h$ uzyskany dla



Rys. 4.50. Siatka pomiarowa do testów nanoindentacji

pojedynczego badania przedstawiono na rys. 4.51b. Po teście w badanej powierzchni pozostaje odcisk o wielkości zależnej m.in. od twardości materiału.

Twardość ośrodka H_{IT} definiowana jest jako stosunek maksymalnej siły zagłębienia F_{max} do powierzchni kontaktu wgłębnika i próbki A przy największym zagłębieniu i sile (4.2):

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A}. \quad (4.2)$$

Moduł indentacji M_{IT} natomiast określa się z zależności (4.3):

$$M_{IT} = \frac{S}{2\beta} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}, \quad (4.3)$$

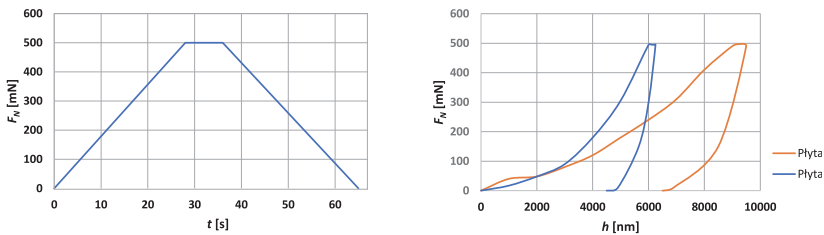
w której:

A – rzut powierzchni kontaktu wgłębnika na powierzchnię próbki,

S – nachylenie krzywej obciążenia,

β – współczynnik uwzględniający poprawkę wynikającą z geometrii wgłębnika.

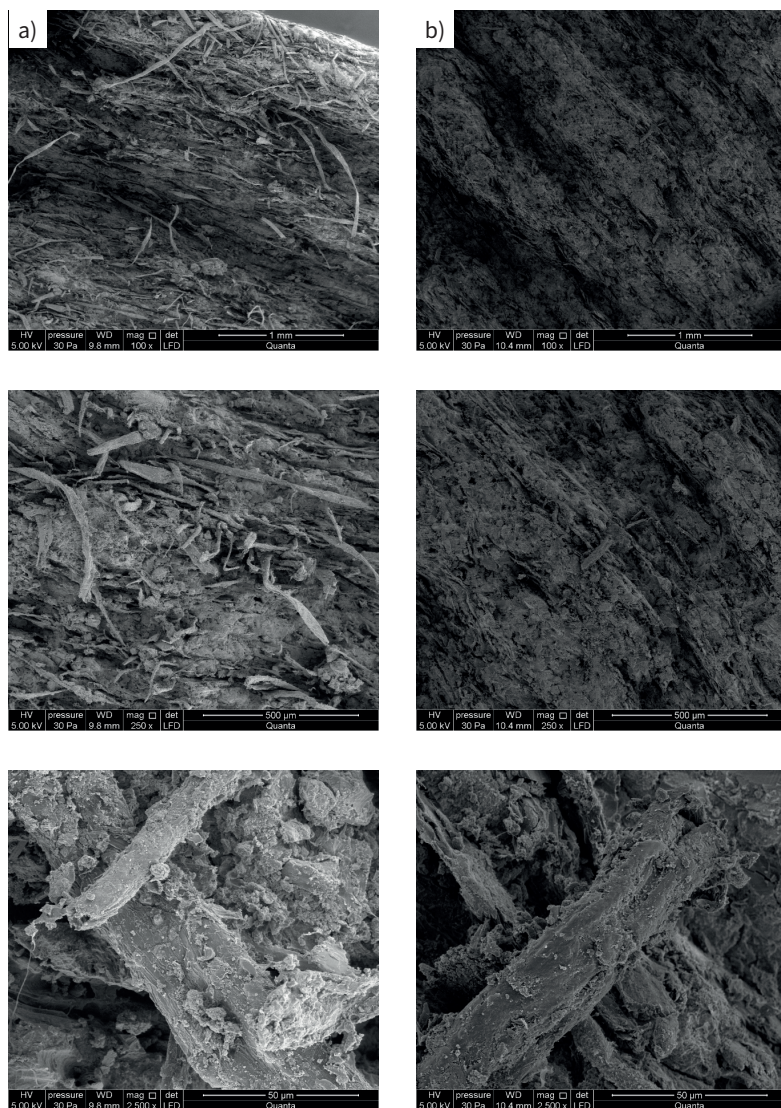
W przypadku stosowanej w badaniach końcówki Berkovicha wartość tego współczynnika wynosi 1,034.



Rys. 4.51. Wykres zależności: a) $F-t$ dla pojedynczego badania, b) $F-h$ uzyskany dla pojedynczego badania nanoindentacji; oprac. T. Gorzelańczyk na podst.: [55]

Wyniki badań metodą SEM

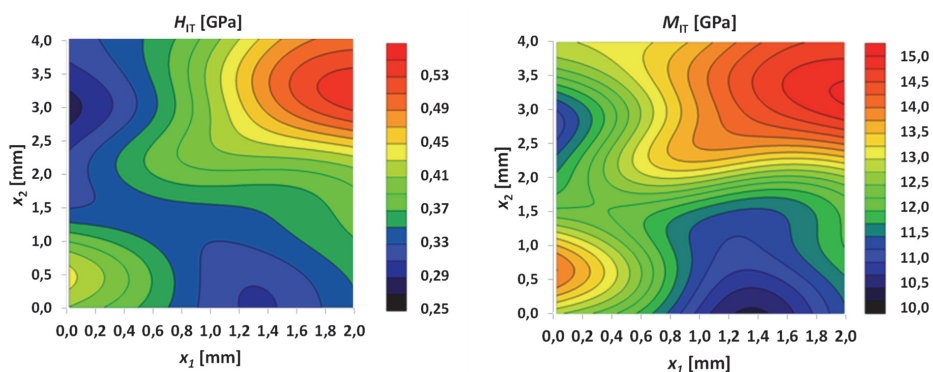
Na rysunku 4.52 pokazano przykładowe obrazy uzyskane z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego dla badanych płyt, odpowiednio po lewej stronie próbki referencyjne (seria B_I), a po prawej próbki poddane działaniu wysokiej temperatury 230°C (seria B_T).



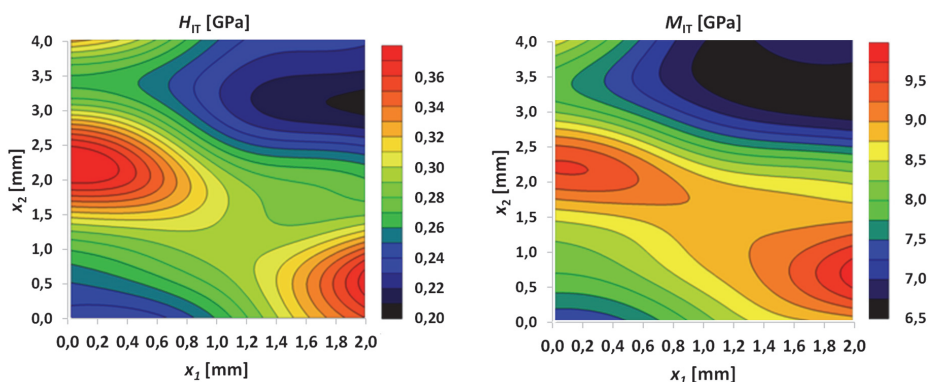
Rys. 4.52. Obrazy mikroskopowe zastosowanych włókien uzyskane w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) ze skalą w kolejności 1 mm, 500 μm i 50 μm: a) płyta referencyjna (seria B_I), b) płyta poddana oddziaływaniu temperatury 230°C (seria B_T)

Wyniki badań metodą nanoindentacji

Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano rozkład parametrów mechanicznych na powierzchni próbek. Na rysunkach 4.53 i 4.54 pokazano przykładowe mapy konturowe rozkładu twardości H_{IT} i rozkładu modułu indentacji M_{IT} odpowiednio dla płyty B_1 i B_T .



Rys. 4.53. Przykładowe wyniki rozkładu twardości H_{IT} (po lewej) i rozkładu modułu indentacji M_{IT} (po prawej) dla płyty B_1 ; oprac. T. Gorzelańczyk na podst.: [55]



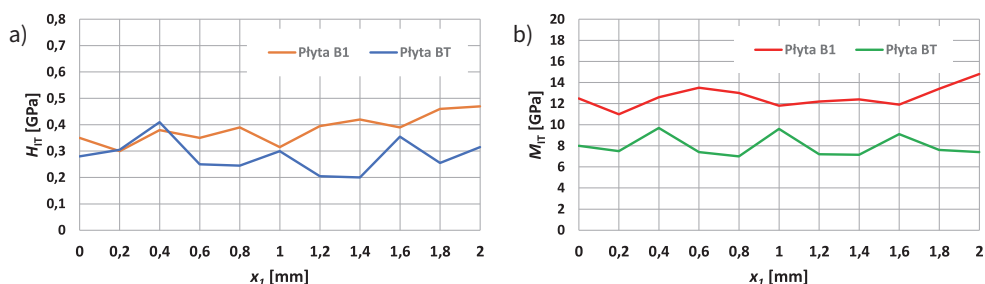
Rys. 4.54. Przykładowe wyniki rozkładu twardości H_{IT} (po lewej) i rozkładu modułu indentacji M_{IT} (po prawej) dla płyty B_T ; oprac. T. Gorzelańczyk na podst.: [55]

W tabeli 4.11 zestawiono uzyskane rezultaty dla badanych płyt metodą nanoindentacji [55], a na rys. 4.55 i 4.56 z kolei przedstawiono zmienność wartości średnich twardości H_{IT} i modułu nanoindentacji M_{IT} w dwóch niezależnych kierunkach, odpowiednio dla x_1 i x_2 (układ współrzędnych pokazano na rys. 4.48).

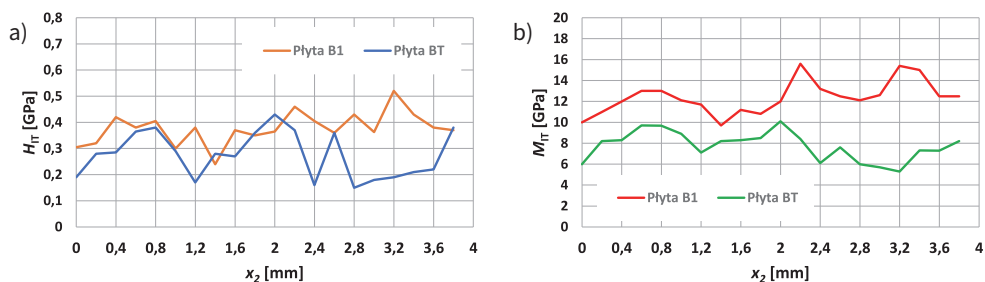
Tabela 4.11. Zestawienie uzyskanych wyników nanoindentacji [55]

		Płyta referencyjna (seria B ₁)	Płyta po oddziaływaniu temperatury 230°C (seria B _T)
Średnia wartość twardości	$\mu^{H_{IT}}$ [GPa]	0,382	0,285
Odchylenie standardowe twardości	$\sigma^{H_{IT}}$ [GPa]	0,226	0,201
Współczynnik zmienności* twardości	c.o.v. ^{H_{IT}} [-]	0,592	0,705
Średnia wartość modułu indentacji	$\mu^{M_{IT}}$ [GPa]	12,686	8,147
Odchylenie standardowe modułu indentacji	$\sigma^{M_{IT}}$ [GPa]	4,093	3,138
Współczynnik zmienności* modułu indentacji	c.o.v. ^{M_{IT}} [-]	0,318	0,385

* Współczynnik zmienności wyznaczono jako stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej.



Rys. 4.55. Uśrednione wartości w kierunku x_1 : a) twardości H_{IT} , b) modułu indentacji M_{IT} ; oprac. T. Gorzelańczyk na podst.: [55]



Rys. 4.56. Uśrednione wartości w kierunku x_2 : a) twardości H_{IT} , b) modułu indentacji M_{IT} ; oprac. T. Gorzelańczyk na podst.: [55]

Analiza uzyskanych wyników

Na podstawie wyników badań przedstawionych w tab. 4.10 i na rys. 4.48 potwierdzono, że w wysokiej temperaturze wzrasta wytrzymałość na zginanie *MOR* – obserwuje się wzrost (w sensie średnim) z 23,54 do 26,86 MPa, czyli o około 14%. W przypadku płyty serii B_T zaobserwowano również, że pod wpływem temperatury 230°C struktura płyty staje się bardziej krucha – po szczytowej wartości naprężenia obserwuje się nagły spadek wytrzymałości (rys. 4.48). Analiza wyników uzyskanych w klasycznej makroskali wykazała, że w przypadku płyty włóknisto-cementowej B_T zakres nieliniowego wzrostu naprężeń zginających jest zmniejszany aż do momentu, gdy wytrzymałość na zginanie *MOR* zrówna się z granicą proporcjonalności *LOP*. W przypadku płyty referencyjnej B_1 wartości *MOR* i *LOP* zostały wyraźnie rozdzielone. Należy zauważyć, że próbki referencyjne znajdowały się w stanie powietrzno-suchym, a ich wilgotność masowa wynosiła 6–8%.

Na podstawie wyników w skali makro (w aspekcie wytrzymałości na zginanie) stwierdzono, że po wystawieniu na oddziaływanie temperatury 230°C przez 3 godziny nie dochodzi do degradacji płyty, a nawet uzyskuje się „efekt wzmacniający”. Niemniej jednak zaawansowane techniki laboratoryjne w mikroskali ujawniły szkodliwe i nieodwracalne zmiany strukturalne zarówno w geometrycznej, jak i mechanicznej morfologii mikrostruktury.

Na podstawie analizy obrazów uzyskanych ze skaningowego mikroskopu elektronowego oraz analizatora EDS stwierdzono, że makrostrukturę płyty włóknisto-cementowej B_1 można określić jako zwartą. Podczas obserwacji mikroskopowych strukturę określono jako drobnoporowatą, o wielkości porów do 50 μm . Widoczne były kawerny oraz wyżłobienia w miejscu przełomu po wyrwanych włóknach o szerokości do 500 μm . Na obrazach widoczne są wyraźnie włókna celulozowe i włókna PVA, występują różne formy uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H, przeważa faza „bezpostaciowa” oraz zbudowana z silnie przylegających cząstek. Analizując skład włókna, stwierdzono występowanie pierwiastków wchodzących w skład włókien lub częściowo w skład cementu. Analiza składu chemicznego matrycy odpowiada pierwiastkom wchodzącym w skład cementu. Powierzchnię włókien pokrywa cienka warstwa matrycy cementowej i produktów hydratacji. Nieliczne miejsca z przestrzenią pomiędzy włóknami i matrycą świadczą o wytworzonym silnym wiązaniu między nimi.

Z kolei analiza płyty włóknisto-cementowej B_T poddanej oddziaływaniu temperatury 230°C przez 3 godziny ujawniła wyraźnie widoczną zmianę koloru próbek w skali makroskopowej. Stwierdzono, że większość włókien jest

wypalona lub wtopiona w matrycę, pozostawiając kawerny i wyżłobienia, co widoczne jest w przypadku wszystkich badanych płyt. Struktura nielicznych pozostałych włókien została silnie zdegradowana. Obserwując ziarna cementu na kolejnych przełomach również stwierdzono, że wypalanie powoduje niszczenie ich struktury. Strukturę matrycy określono jako bardziej ziarnistą z licznymi rozwarstwieniami. Zaobserwowano liczniejsze kawerny i wyżłobienia po wyrwanych włóknach, a także wyżłobienia po wyrwanych ziarnach cementu.

W podejściu nanoindentacji obserwuje się zauważalne zmiany morfologii mechanicznej analizowanych płyt pod wpływem wysokiej temperatury. Na podstawie rezultatów przedstawionych w tab. 4.11 średnia wartość modułu indentacji po oddziaływaniu temperatury 230°C zmniejszyła się z 12,686 GPa do 8,147 GPa, co odpowiada prawie 50% spadkowi wartości modułu sprężystości badanego materiału. Ponadto, jak pokazano na rys. 4.55b i 4.56b, średnia wartość modułu indentacji jest znacznie mniejsza dla płyty B_T w porównaniu z wartościami uzyskanymi dla płyty B_1 w całym zakresie wartości x_1 i x_2 . Obserwacje te bardzo dobrze korespondują z analizą uzyskaną z obrazowania SEM. Spadek odpowiedzi sprężystej mikrostruktury materiału, w rzeczywistości jego sztywności, jest spowodowany głównie zmianami geometrii mikrostruktury obserwowanymi w SEM. Obecność wgłębień i rowków w płycie B_T może być bezpośrednią przyczyną spadku wartości modułu indentacji M_{IT} .

Warto zauważyć, że zmiany morfologii geometrycznej (analiza SEM) i mechanicznej (nanoindentacja) płyty B_T są bezpośrednią przyczyną zachowania w skali makro. Analizując wyniki badań (rys. 4.48), potwierdzono, że sztywność płyty B_T jest zmniejszona w porównaniu ze sztywnością płyty B_1 (kąt nachylenia krzywej σ - ϵ zmniejszył się po wystawieniu płyt na działanie temperatury 230°C).

Nieco inne wnioski można wysunąć, biorąc pod uwagę twardość materiału. Ogólnie rzecz biorąc, średnia wartość twardości H_{IT} , w wyniku ekspozycji na temperaturę 230°C, zmniejszyła się z 0,382 GPa do 0,285 GPa (tab. 4.11). Jednak analizując wyniki badań (rys. 4.55a, 4.56a), należy stwierdzić, że „lokalnie”, tj. dla danych zakresów wartości x_1 lub x_2 spadek twardości H_{IT} nie jest obserwowany. Warto dodać, że to właśnie twardość H_{IT} jest parametrem określającym wytrzymałość mikrostruktury. Wynika to z faktu, że wytrzymałość jest proporcjonalna do twardości poszczególnych składników mikrostruktury – im wyższa twardość, tym wyższa wytrzymałość mikrostruktury. Dlatego zjawisko zauważone np. na rys. 4.55a (w zakresie x_1 od 0 do 0,5 mm) i rys. 4.56a (w zakresie x_2 od 0,5 do 2,0 mm), gdzie nie obserwuje się spadku twardości H_{IT} , uzasadnia uzyskane wyniki wytrzymałości na zginanie MOR

w skali makro. Jak pokazano w tab. 4.10, wytrzymałość na zginanie *MOR* płyty serii B_T jest nieco wyższa niż płyty serii B_1 . Należy jednocześnie pamiętać, że wartości w tej tabeli reprezentują wartości średnie. Jednak podczas poszczególnych testów trójpunktowego zginania zaobserwowano również przypadki, w których wytrzymałość na zginanie *MOR* nie wzrosła, a czasem nawet nieznacznie spadła. Wynika to prawdopodobnie z faktu, że „lokalnie” twardość nie zmienia się pod wpływem temperatury, co może powodować takie makroskopowe właściwości płyt. Należy również wspomnieć, że odchylenia standardowe zarówno dla modułu wgłębienia, jak i twardości próbki poddanej oddziaływaniu temperatury 230°C nieznacznie spadły. Fakt, że średnie wartości obu właściwości zmniejszyły się w bardziej widoczny sposób, świadczy, że morfologia mechaniczna płyty B_T może mieć bardziej niejednorodny charakter. Jest to widoczne na wykresach (rys. 4.55, 4.56), a także na wartościach współczynników zmienności twardości $c.o.v.^{H_{IT}}$ i modułu indentacji $c.o.v.^{M_{IT}}$ podanych w tab. 4.11, z której wynika, że dla płyty B_T wartości tych współczynników wzrosły.

Uzyskane wyniki badań przeprowadzonych z wykorzystaniem metody obrazowania SEM oraz metody nanoindentacji są, zdaniem autora, niezmiernie ważne i stanowią istotne osiągnięcie celu naukowego. Jednoznacznie pokazano, że, opierając się jedynie na wynikach w skali makro (tj. wytrzymałości na zginanie *MOR*), można wyciągnąć błędny wniosek, iż po ekspozycji w wysokiej temperaturze (230°C przez 3 h) nie następuje degradacja płyty. Ponadto biorąc pod uwagę wyznaczone średnie wartości wytrzymałości na zginanie *MOR* stwierdzono pewien efekt wzmocnienia. Jednakże metody wykorzystujące SEM i nanoindentację w mikroskali ujawniają jednoznacznie szkodliwe i nieodwracalne zmiany mikrostrukturalne płyt spowodowane oddziaływaniem wysokiej temperatury. Zdaniem autora uzyskane rezultaty są istotne w praktyce budowlanej, ponieważ można stwierdzić jednoznacznie, że przy ocenianiu destrukcyjnego wpływu wysokiej temperatury na strukturę płyt włóknisto-cementowych niewystarczające jest bazowanie tylko na wartościach wytrzymałości na zginanie *MOR*.

4.3.2. Badania wpływu oddziaływania pożaru na strukturę płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem metody emisji akustycznej i SEM

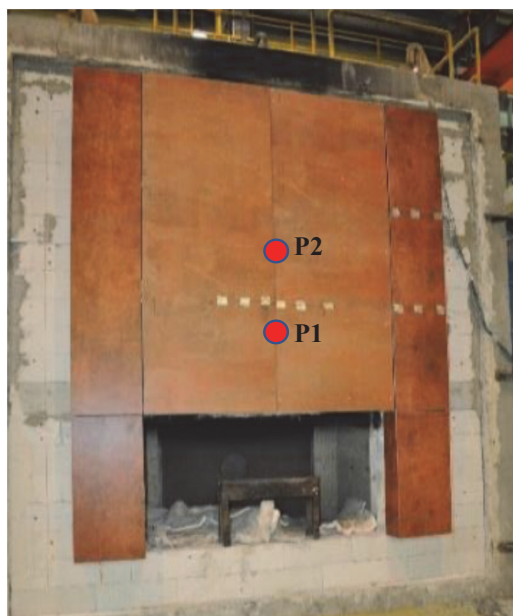
Wpływ wysokiej temperatury wynikającej z działania ognia na elewację budynku, w tym na materiał okładzinowy, jakim często są płyty włóknisto-cementowe, jest niezmiernie istotny w dalszej eksploatacji obiektu po

pożarze. W związku z tym określenie wpływu tego czynnika na parametry wytrzymałościowe, a przede wszystkim strukturę płyt włóknisto-cementowych, jest istotnym zagadnieniem zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i praktycznego. W niniejszym rozdziale monografii przedstawiono wyniki badań płyt włóknisto-cementowych poddanych oddziaływaniu ognia (pożaru). Wykorzystano dwie metody, tj. metodę emisji akustycznej oraz obrazowania z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM).

Badaniom poddano próbki płyt włóknisto-cementowych wyciętych z modelu rzeczywistego elewacji⁵. Model rzeczywisty stanowiła elewacja wentylowana przymocowana do platformy badawczej, będąca jednocześnie podłożem, na którym wykonywane były badania oddziaływania i rozwoju pożaru. Modele wielkoskalowe stanowiły bardzo dobry sposób badania rozwoju pożaru oraz oceny poszczególnych elementów elewacji w zakresie jej palności, zachowania się poszczególnych materiałów w warunkach pożaru, bądź też bezpieczeństwa pożarowego całego systemu. Badania wielkoskalowe mogą charakteryzować się innymi wynikami i przedstawiać inne obszary krytyczne niż badania na małych próbkach.

Analizowaną w monografii okładzinę elewacyjną stanowiły płyty włóknisto-cementowych o grubości 8 mm, barwione w masie (seria C), które były zamontowane na modelu rzeczywistym za pomocą połączeń mechanicznych do podkonstrukcji aluminiowej. W skład podkonstrukcji wchodziły metalowe profile pionowe montowane w sposób mechaniczny poprzez konsole do podłoża. Z komory spalania wydobywał się ogień, który oddziaływał wysokimi temperaturami na elewację. Scenariusz pożaru był realizowany w pomieszczeniu, z którego wydobywał się ogień przez otwór okienny na elewację. W komorze spalania na tylnej ścianie umieszczono nadmuch, który umożliwiał odwzorowanie rzeczywistych warunków panujących w trakcie pożaru. Podział elewacji na płyty elewacyjne oraz miejsca pobrania próbek przedstawiono na rys. 4.57 [240]. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań zrealizowanych przez autora z wykorzystaniem metody emisji akustycznej i obrazowania SEM dla próbek pozyskanych z płyt po oddziaływaniu pożaru.

5 Badania oddziaływania pożarem stanowiły przedmiot pracy doktorskiej Zawislaka [240], które zostały wykonane przy współpracy z Instytutem Techniki Budowlanej w Warszawie. Autor był także członkiem zespołu badawczego i wykazał istotną aktywność naukową, czego rezultatem są między innymi wspólne publikacje [209], [210].



Rys. 4.57. Model rzeczywisty elewacji z zaznaczonymi miejscami pobrania próbek

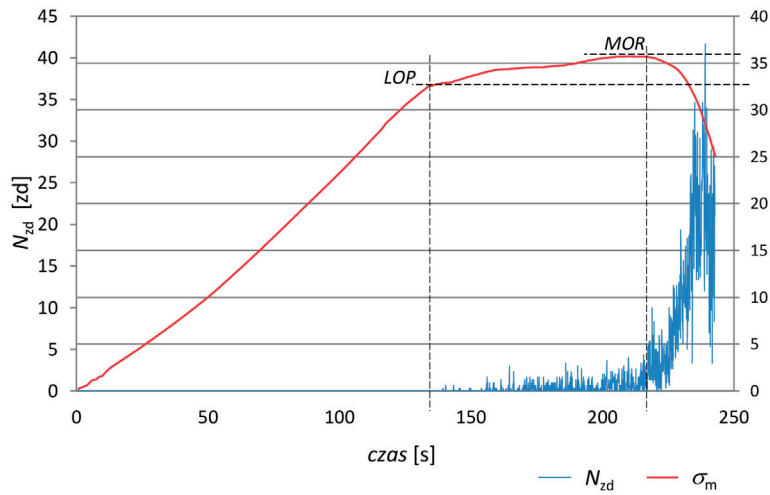
Z poddanego oddziaływaniu pożarem modelu wielkoskalowego zostały pobrane próbki z komory spalania P1 i P2, które odpadały odpowiednio w 17. i 34. minucie pożaru. Próbki pobrane z punktu P1 oznaczono serią C_6 , a próbki z punktu P2 serią C_5 . Przebieg temperatur rejestrowały zamocowane na płytach termopary. W przypadku próbek serii C_6 wartości temperatury mieściły się w przedziale 400–500°C, a w przypadku próbek serii C_5 300–400°C.

W celu zidentyfikowania wpływu oddziaływania wysokiej temperatury na degradację płyty włóknisto-cementowej przeprowadzono badania z wykorzystaniem metody emisji akustycznej podczas próby trójpunktowego zginania.

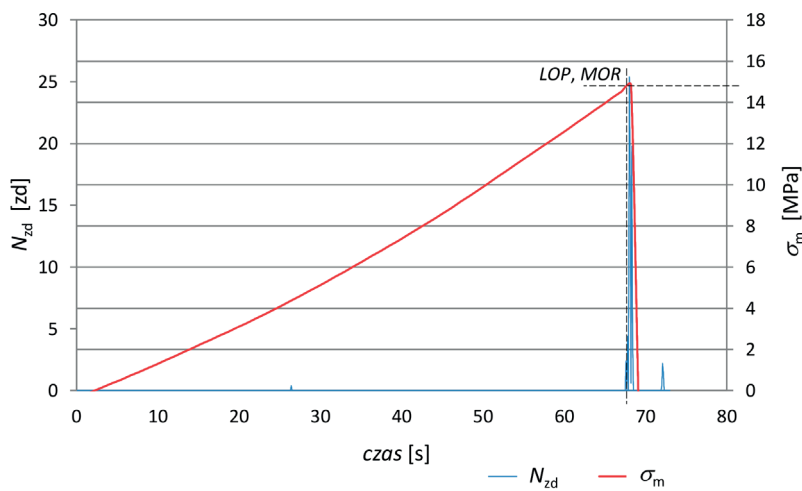
Ocena destrukcji struktury płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania ognia (pożaru) dokonano, analizując sygnały EA zarejestrowane podczas przebiegu trójpunktowego zginania płyt ostudzonych do temperatury pokojowej. Na rysunkach 4.56–4.58 przedstawiono zapis tempa zdarzeń N_{zd} i naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu dla wybranych próbek oznaczonych C_5 i C_6 oraz w celu porównawczym płytę referencyjną C_1 niepoddaną oddziaływaniu ognia. W tabeli 4.12 zestawiono uzyskane wartości wytrzymałości na zginanie MOR oraz wartości sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$ emisji akustycznej dla badanych próbek.

Tabela 4.12. Zestawienie uśrednionej wartości wytrzymałości na zginanie MOR oraz sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$

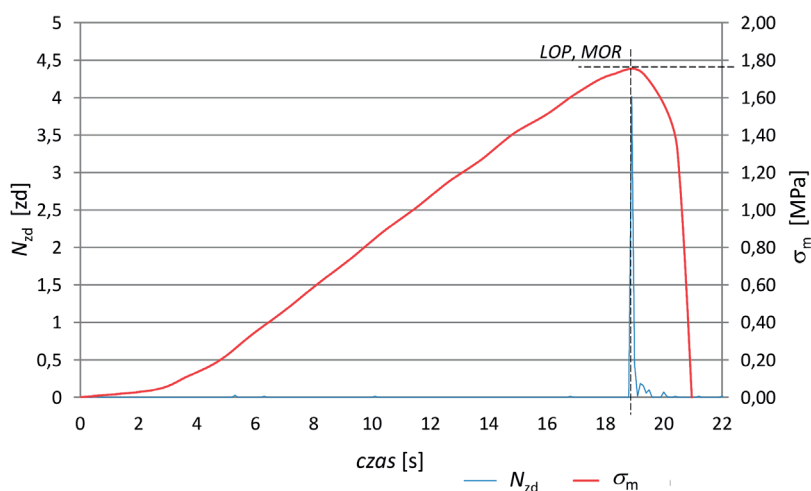
Oznaczenie serii próbeki	Wytrzymałość na zginanie MOR [MPa]	Suma zdarzeń $\sum N_{zd}$ [-]
C_1	35,60	434
C_5	14,85	78
C_6	1,72	16



Rys. 4.58. Zapis tempa zdarzeń N_{zd} i naprężeń zginających s_m w funkcji czasu dla płyty serii C_1



Rys. 4.59. Zapis tempa zdarzeń N_{zd} i naprężeń zginających s_m w funkcji czasu dla płyty serii C_5



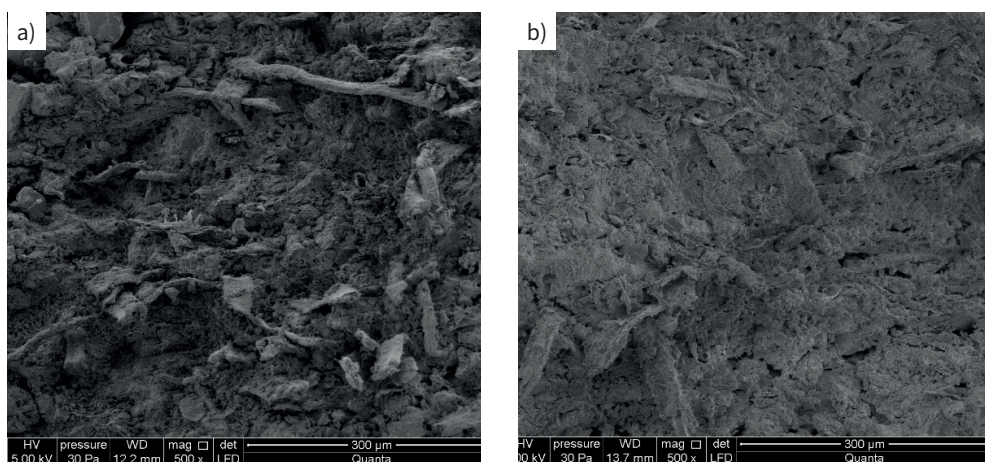
Rys. 4.60. Zapis tempa zdarzeń N_{zd} i naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu dla płyty serii C_6

Analizując wyniki badań (rys. 4.58–4.60), należy stwierdzić, że oddziaływanie ognia (pożaru) ma istotny wpływ na wartości deskryptorów EA zarejestrowanych w próbie trójpunktowego zginania przedmiotowych płyt włóknisto-cementowych. Zapis tempa zdarzeń N_{zd} w funkcji czasu dla płyty referencyjnej (rys. 4.58) znacząco różni się od zapisu uzyskanego dla płyt poddanych działaniu ognia. W przypadku płyty referencyjnej stwierdzono, że od około 140 sekundy badania tempo zdarzeń N_{zd} zaczyna stabilnie wzrastać do momentu osiągnięcia maksymalnej wartości wytrzymałości na zginanie MOR, kiedy to następuje wyraźny skokowy wzrost tego deskryptora. W przypadku próbek serii C_5 i C_6 (odpowiednio rys. 4.59 i 4.60) widać zupełnie inny przebieg niszczenia badanych płyt. W okolicach osiągnięcia przez badane próbki wytrzymałości na zginanie MOR następuje gwałtowny skok (pik) zarejestrowanych wartości tempa zdarzeń EA. Analizując rezultaty zawarte w tab. 4.12, zauważono, że w przypadku próbki referencyjnej zarejestrowano wyraźnie większą sumę zdarzeń EA, natomiast w przypadku próbek serii C_5 i C_6 odnotowano wyraźny spadek wartości zarejestrowanej sumy zdarzeń EA. Ponadto zaobserwowano tendencję, że wraz ze wzrostem i czasem oddziaływania temperatury, której poddane były badane próbki, maleje wartość sumy zdarzeń EA. Analizując z kolei wartości uzyskanej wytrzymałości na zginanie MOR, zauważono podobną tendencję. Najwyższą wytrzymałością na zginanie MOR charakteryzowała się płyta referencyjna serii C_1 (35,60 MPa). Wraz ze wzrostem temperatury, której poddane były płyty w trakcie pożaru, widać wyraźny

spadek wytrzymałości na zginanie *MOR* od wartości 14,85 MPa dla płyty serii C_5 do 1,72 MPa dla płyty serii C_6 .

Na podstawie uzyskanych rezultatów potwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury i czasu jej oddziaływania na badane płyty w trakcie pożaru znacząco zmienia się charakter przebiegu niszczenia próbek podczas próby trójpunktowego zginania, co wynika z zarejestrowanych deskryptorów emisji akustycznej oraz uzyskanych wartości wytrzymałości na zginanie *MOR*. Jednoznacznie wykazano, że wysoka temperatura ma destrukcyjny wpływ na strukturę płyt włóknisto-cementowych. Analizując rezultaty uzyskane z użyciem metody emisji akustycznej (rys. 4.58–4.60), zauważono, że płyty poddane działaniu ognia charakteryzują się tym, iż w momencie osiągnięcia wytrzymałości na zginanie *MOR* ulegają zniszczeniu podczas kruchego pęknięcia. Świadczy o tym zapis tempa zdarzeń EA, który jest w zasadzie jednostkowym pikiem w porównaniu do wyników dotyczących płyty referencyjnej. Na tej podstawie należy wnioskować, że wysoka temperatura powoduje uszkodzenie włókien celulozowych (pirolizę) zawartych w strukturze płyty. Kruche pękanie zarejestrowane podczas badań świadczy o całkowitej pirolizie tych włókien i tym samym o uzyskaniu, w wyniku tego procesu, struktury płyty składającej się tylko z matrycy cementowej. Jest to szczególnie widoczne w przypadku próbek serii C_6 .

Badaniom z wykorzystaniem metody optycznej poddano płyty włóknisto-cementowe serii C_5 i C_6 . Na rysunku 4.61 przedstawiono przykładowe obrazy dla tych serii, które opisano w tab. 4.13.



Rys. 4.61. Obrazy uzyskane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego dla serii:
a) C_5 , b) C_6

Tabela 4.13. Opis struktury płyt włóknisto-cementowych dla serii C₅ i C₆ poddanych oddziaływaniu pożaru

Seria	Opis struktury płyt włóknisto-cementowych
C ₅	– w skali makroskopowej struktura zwarta – mikrostruktura drobno porowata o wielkości porów do 50 µm – struktura matrycy silnie zwarta – występują silnie zwarte struktury o nieregularnym kształcie – niewielka ilość kryształów ettringitu – część włókien wypalona lub wtopiona w matrycę – struktura niektórych włókien zdegradowana
C ₆	– w skali makroskopowej struktura zwarta – mikrostruktura drobno porowata o wielkości porów do 50 µm – struktura matrycy silnie zwarta – nie stwierdzono występowania kryształów wodorotlenku wapnia – występują silnie zwarte struktury o nieregularnym kształcie – nie stwierdzono obecności kryształów ettringitu – widoczne relikty nie uwodnionego klinkieru portlandzkiego występującego w postaci większych ziaren o nieregularnym kształcie – większość włókien wypalona lub wtopiona w matrycę – struktura pozostałych włókien zdegradowana

Na podstawie analizy wyników badań otrzymanych z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego płyt serii C₅ i C₆ pod wpływem oddziaływania pożaru zaobserwowano w skali makroskopowej wyraźnie widoczne ślady nadpalenia w postaci czarnej sadzy. Wyniki obserwacji struktury serii C₅ i C₆ płyt włóknisto-cementowych poddanych oddziaływaniu pożaru były zbliżone. W płytach zaobserwowano, że większość włókien była wypalona lub wtopiona w matrycę (rys. 4.61). Struktura nielicznych pozostałych włókien została silnie zdegradowana, co jest szczególnie widoczne w przypadku płyt serii C₆ (rys. 4.59b) poddanych oddziaływaniu temperatury 400–500°C. Obserwując ziarna cementu, na kolejnych przełomach również stwierdzono, że wypalanie powoduje niszczenie ich struktury. Strukturę matrycy określono jako bardziej ziarnistą, z licznymi rozwarstwieniami. Zaobserwowano liczniejsze kawerny i wyżłobienia po wyrwanych włóknach, a także wyżłobienia po wyrwanych ziarnach cementu. W przypadku płyty serii C₆ wyraźna była zmiana koloru matrycy cementowej pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury w wyniku oddziaływania pożaru.

Podsumowując przeprowadzone badania zarówno z wykorzystaniem metody emisji akustycznej, jak i metody optycznej, jednoznacznie stwierdzono, że oddziaływanie pożaru miało destrukcyjny wpływ na strukturę płyt włóknisto-cementowych. Na podstawie rezultatów uzyskanych z użyciem metody emisji akustycznej pokazano, że płyty poddane działaniu ognia charakteryzowały się

zniszczeniem w postaci kruchego pęknięcia w chwili osiągnięcia wytrzymałości na zginanie *MOR*. Świadczy o tym zapis tempa zdarzeń EA, który jest w zasadzie jednostkowym pikiem w porównaniu do zapisu dotyczącego płyty referencyjnej. Badania metodą optyczną SEM w skali makroskopowej wykazały z kolei, że oddziaływanie ognia powoduje wyraźnie widoczne ślady nadpalenia w postaci czarnej sadzy. Ponadto w badanych płytach zaobserwowano, że większość włókien była wypalona lub wtopiona w matrycę, a struktura nielicznych pozostałych włókien była silnie zdegradowana.

4.4. Badania imperfekcji materiałowych płyt włóknisto-cementowych (wad produkcyjnych)

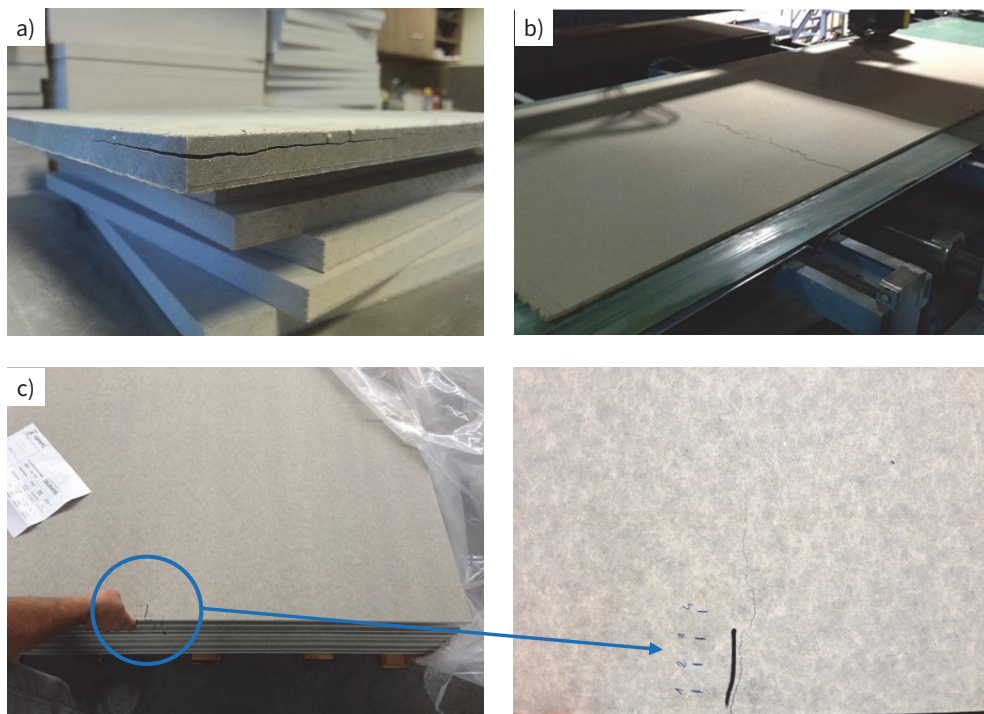
Jak wspomniano już w podrozdz. 2.1.4, w trakcie procesu produkcyjnego płyt włóknisto-cementowych pojawiają się w nich czasem imperfekcje materiałowe, takie jak delaminacja, rysy, niejednorodność materiału czy obszary o lokalnej zbyt wysokiej wilgotności, które dyskwalifikują je jako pełnowartościowy element okładzinowy (rys. 4.62). Imperfekcje mają istotny wpływ m.in. na trwałość, bezpieczeństwo użytkowania oraz dalszą bezpieczną eksploatację okładzin wykonanych z płyt. Z tego powodu płyty wymagają kontroli jakości. Dotychczasowe metody kontroli oparte były przede wszystkim na badaniach wizualnych w trakcie produkcji oraz wybiórczej kontroli wybrakowanych pojedynczych płyt, które musiały być usuwane z linii produkcyjnej. Taki sposób jest bardzo kłopotliwy, powoduje przestoje produkcyjne i, co najważniejsze, umożliwia kontrolę wybiórczą tylko niewielkiej populacji produkowanych płyt. Szukając rozwiązania tego problemu, zaproponowano zautomatyzowany proces badania płyt za pomocą specjalnie do tego celu zbudowanego bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego, wykorzystującego fale Lamba.

4.4.1. Wykrywanie delaminacji i rys z wykorzystaniem bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego

W poniższym podrozdziale przedstawiono wybrane rezultaty badań wykonanych z wykorzystaniem bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego wykorzystującego fale Lamba⁶, który omówiono w podrozdz. 2.3.1 (rys. 2.44).

⁶ Badania zostały przeprowadzone w ramach współpracy z Wydziałem Mechatroniki Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy. W ramach tej współpracy skonstruowano

Pierwszym etapem badań było przeprowadzenie testów mających na celu identyfikację imperfekcji materiałowych, jakie mogą powstawać w procesie produkcji płyt. Procedura polegała na wyznaczeniu dla przebadanych materiałów charakterystyk amplitudowych fali Lamba w funkcji miejsca rejestracji sygnału, a następnie na ich podstawie przeprowadzono analizę.



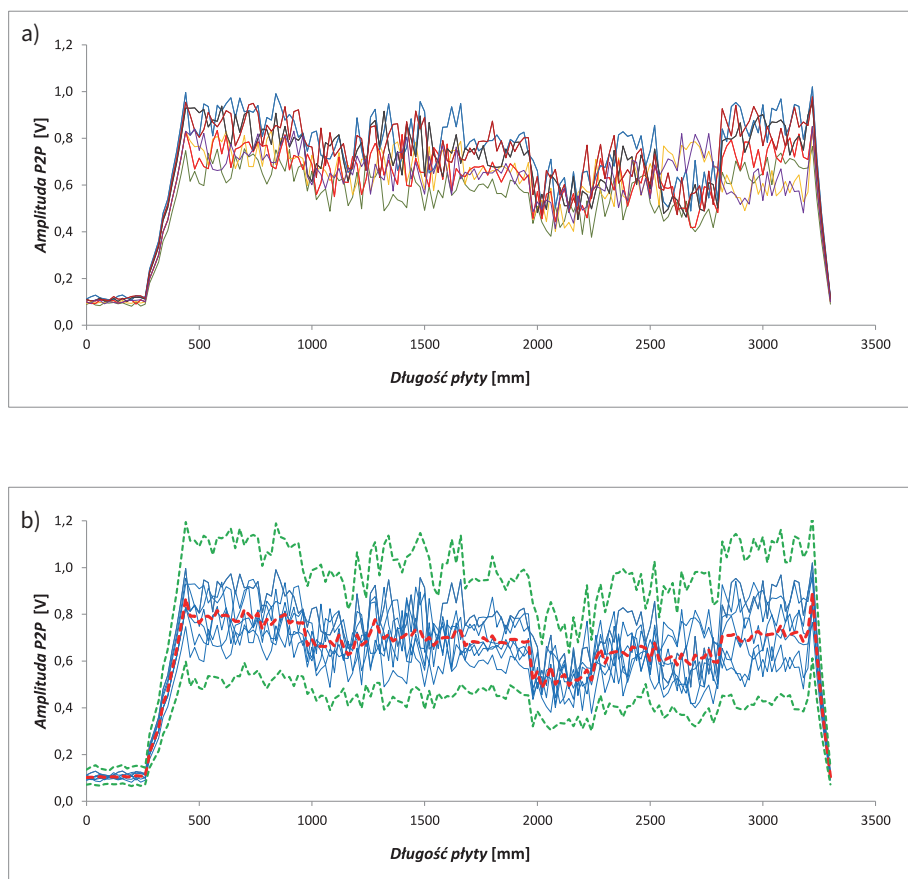
Rys. 4.62. Płyty włóknisto-cementowe z imperfekcjami materiałowymi:
 a) delaminacja – rozwarstwienie na styku warstw, b) rysy w poprzek płyty,
 c) rysy przy krawędziach płyty

Na rysunku 4.63a zaprezentowano przykładowe wykresy maksymalnych amplitud fali Lamba zarejestrowanych w procesie skanowania zbioru przykładowych płyt włóknisto-cementowych należących do jednej partii wyprodukowanego materiału, dla których nie stwierdzono żadnych imperfekcji

przedmiotowy skaner, który został zainstalowany w zakładzie produkującym płyty włóknisto-cementowe. Zarówno urządzenie, jak i sposób badania płyt jest także przedmiotem uzyskanych patentów [139], [141], [142]. Autor wykazał się istotną aktywnością w tej współpracy, czego efektem są wspomniane wyżej patenty, a także wspólne publikacje zawierające wyniki badań przeprowadzonych w zautomatyzowanym procesie badania (kontroli jakości) płyt włóknisto-cementowych w trakcie ich produkcji w zakładzie produkcyjnym [32], [33], [194].

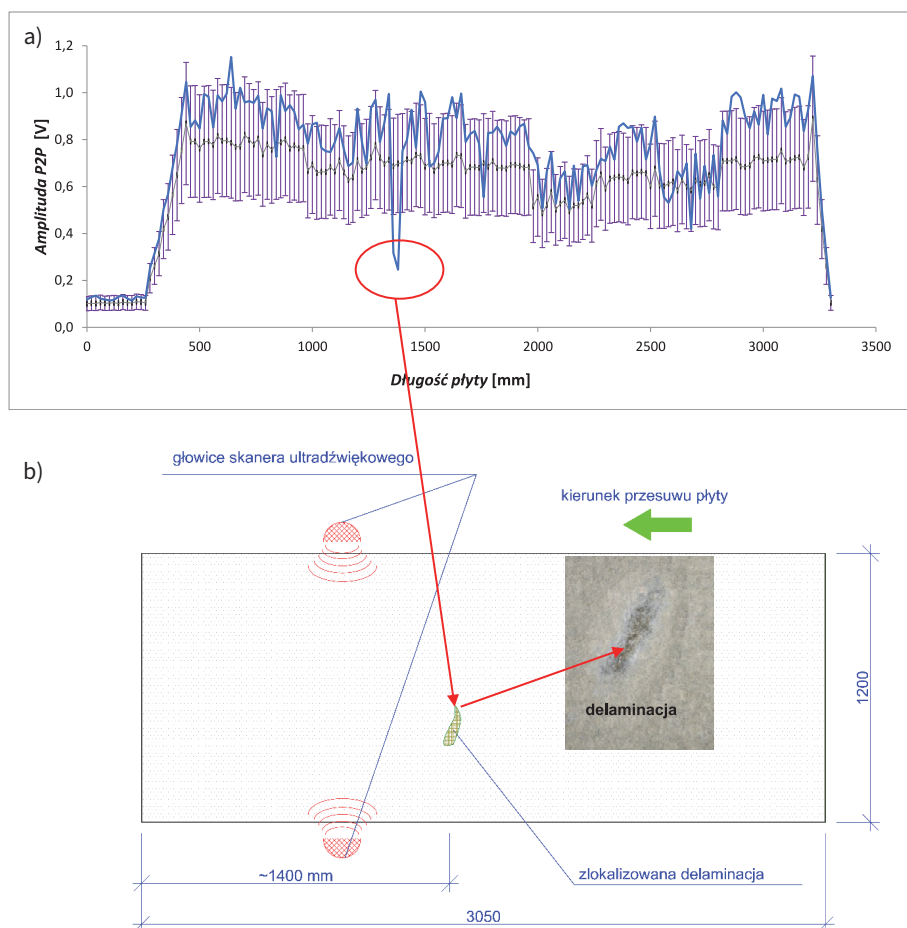
materiałowych. Wnioskowanie o braku imperfekcji w rozważanym zbiorze płyt polegało na wyznaczeniu średniej arytmetycznej wartości amplitudy fali Lamba oraz odchylenia standardowego średniej arytmetycznej w funkcji miejsca. Przedstawione na rys. 4.63b rezultaty pokazują, że dla danego zbioru płyt zarejestrowane amplitudy fali Lamba mieszczą się w granicach odchylenia standardowego. Ponadto, zaobserwowano w ramach danej płyty oscylacje amplitudy, których natura nie jest do końca rozpoznana, natomiast prawdopodobną przyczyną są lokalne niejednorodności materiału płyty prawdopodobnie wynikające ze złożoności procesu produkcyjnego oraz warunków brzegowych, geometrii płyty i drgań własnych płyty.

Na rysunku 4.64 z kolei przedstawiono wyniki pomiarów dla zbioru 10 płyt, w którym w jednej z płyt za pomocą ultradźwiękowej metody bezkontaktowej



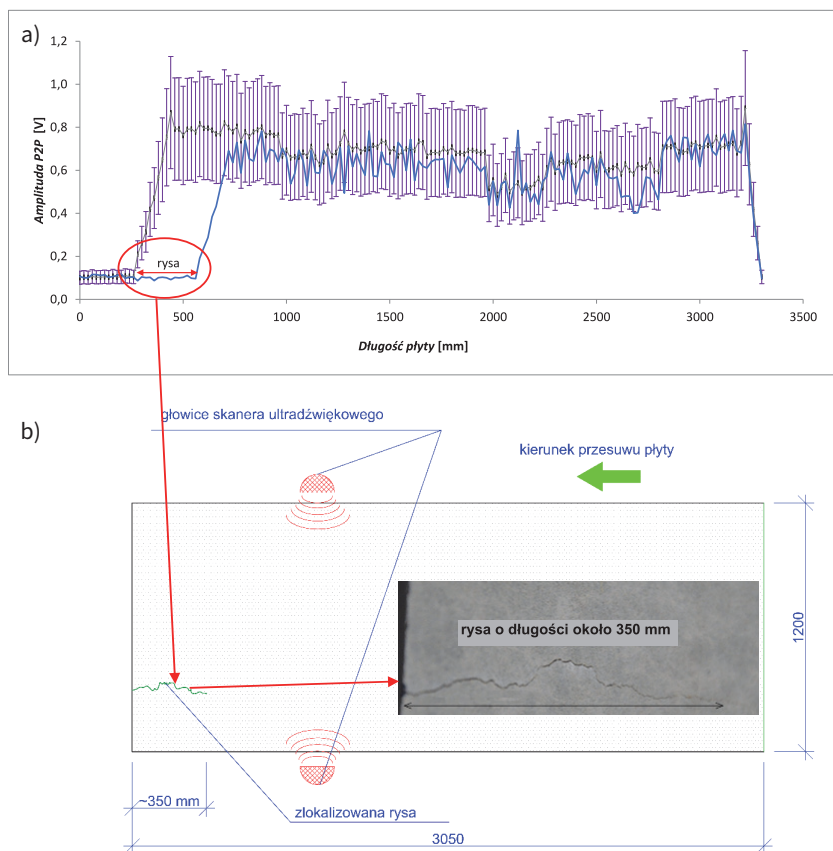
Rys. 4.63. Amplitudy P2P fal Lamba jako funkcja pozycji dla zestawu badanych płyt włóknisto-cementowych (a) i porównanie średnich wartości amplitud (czerwona linia przerywana) z wartościami progowymi błędu (zielona linia przerywana) z amplitudami P2P każdej płyty (b)

zidentyfikowano imperfekcję materiałową w postaci delaminacji. Na rysunku 4.64a wykreślono średnie wartości amplitudy fali Lamba oraz odchylenie standardowe średniej arytmetycznej w funkcji miejsca dla rozważanego zbioru płyt (10 sztuk) oraz naniesiono rozkład amplitudowy dla płyty, w której wykryto tę imperfekcję. Analizując niniejszy przypadek, można zaobserwować nagły lokalny spadek amplitudy fali w płycie w odległości ok. 1400 mm wzdłuż jej długości od brzegu płyty. Spadek ten istotnie odbiega od wartości średniej amplitudy w zbiorze płyt. Fotografia miejsca w płycie, dla którego zidentyfikowano wadę, przedstawiona na rys. 4.64b, pozwala stwierdzić wizualnie silny wzrost wilgotności w danym miejscu płyty, co prawdopodobnie związane jest z delaminacją w danym miejscu płyty.



Rys. 4.64. Amplitudy P2P fal Lamba jako funkcja pozycji dla zestawu 10 badanych płyt włóknisto-cementowych (a), średnie wartości amplitud dla całości (z marginesami błędów) i dla jednej płyty z imperfekcją – delaminacją (niebieska linia) pokazaną na fotografii (b)

Kolejną imperfekcją, która pojawia się w materiałach płytowych, są rysy. Najbardziej narażone na występowanie tego typu wad są okolice brzegów płyt. Powstawanie rys związanych jest z transportowaniem płyt na rolkach w czasie procesu produkcyjnego. Na rysunku 4.65 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów dla zbioru kilkunastu płyt, w którym pojawiła się jedna, dla której otrzymany przebieg amplitudy fali Lamba (zaznaczony kolorem niebieskim na rys. 4.65a) sugeruje pojawienie się nieprawidłowości tego typu.

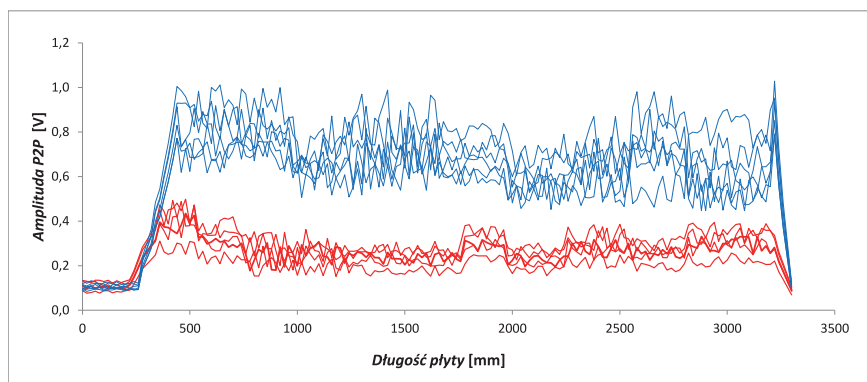


Rys. 4.65. Amplitudy P2P fal Lamba jako funkcja pozycji dla zestawu 10 badanych płyt włókno-cementowych (a), średnie wartości amplitud dla całości (z marginesami błęd) i dla jednej płyty z imperfekcją w postaci rysy (niebieska linia) pokazanej na fotografii (b)

Analizując rezultaty pokazane na rys. 4.65a, widoczne jest przesunięcie ok. 350 mm narastania sygnału fali Lamba w porównaniu z amplitudą rejestrowaną dla innych płyt. Fotografia fragmentu płyty przedstawiona na rys. 4.65b, dla której zidentyfikowano rysę, potwierdziła wyniki uzyskane bezkontaktową metodą ultradźwiękową.

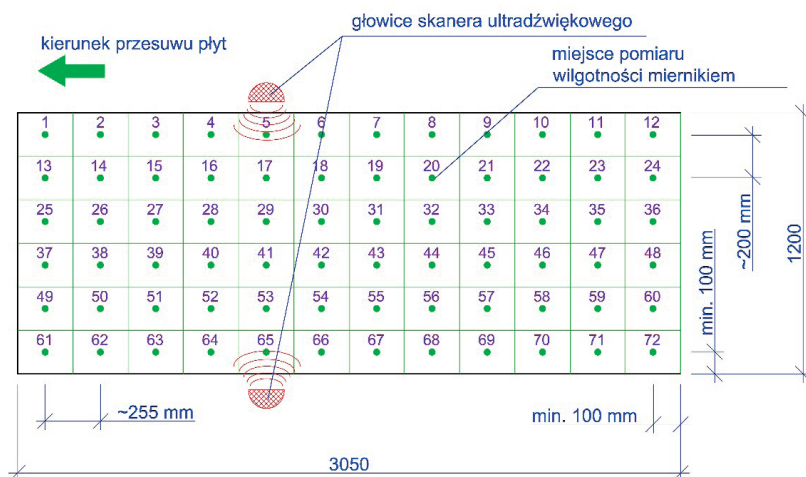
4.4.2. Badania wilgotności płyt włóknisto-cementowych w procesie produkcji

Przeprowadzone na linii produkcyjnej eksperymentalne badania ultradźwiękowe z wykorzystaniem metody bezkontaktowej pokazały również, że wartość amplitudy fali Lamba silnie zależy od wilgotności płyt. Na rysunku 4.66 przedstawiono przykładowe rezultaty dla dwóch zbiorów płyt, w przypadku których stosunek amplitudy do szumu fali Lamba umożliwia jej detekcję (linie niebieskie) oraz dla zbioru płyt, w których amplituda fali Lamba (czerwone linie) była zbyt mała, aby można było prowadzić dalszą analizę pod kątem poszukiwania imperfekcji w materiale płyty typu delaminacja lub rysy. Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzono, że opisywana metoda badań może być także przydatna w określaniu zawilgocenia płyt włóknisto-cementowych.

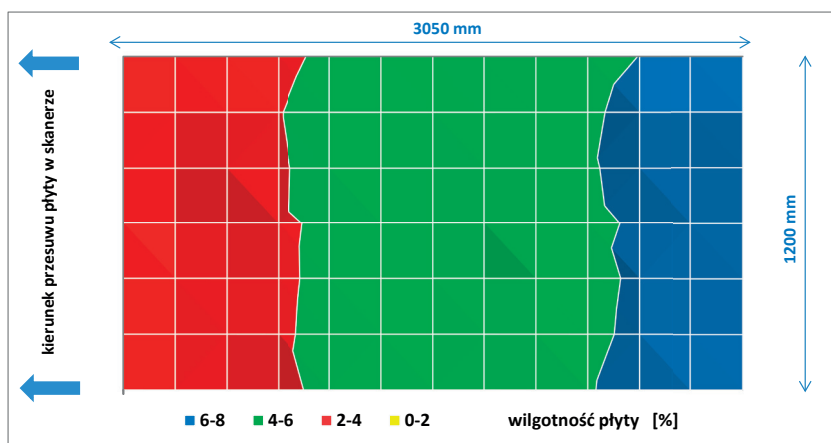


Rys. 4.66. Amplitudy P2P fal Lamba w funkcji długości płyty włóknisto-cementowe: a) dla płyt niezawilgoconych (niebieska linia), b) dla płyt o podwyższonej wilgotności (czerwona linia)

W celu wykazania wpływu wilgotności wykonano badania porównawcze płyt o znanej wilgotności oraz płyt suchych. Badania te wykonano z wykorzystaniem niszczącej metody suszarkowo-wagowej i nieniszczącej metody dielektrycznej z użyciem miernika Trotec T650. Pomiarzy nieniszczące wykonywano na powierzchni górnej płyt o wymiarach 1200 × 3050 mm. Punkty pomiarowe wybierano tak, aby były oddalone co najmniej o 100 mm od krawędzi płyty i o ok. 200–255 mm od siebie (rys. 4.67). Na każdej płycie umieszczono 72 punkty pomiarowe. Z kolei na rysunku 4.68 pokazano przykładową mapę rozkładu średnich wartości wilgotności w badanej płycie włóknisto-cementowej do zastosowań zewnętrznych (elewacyjnej).

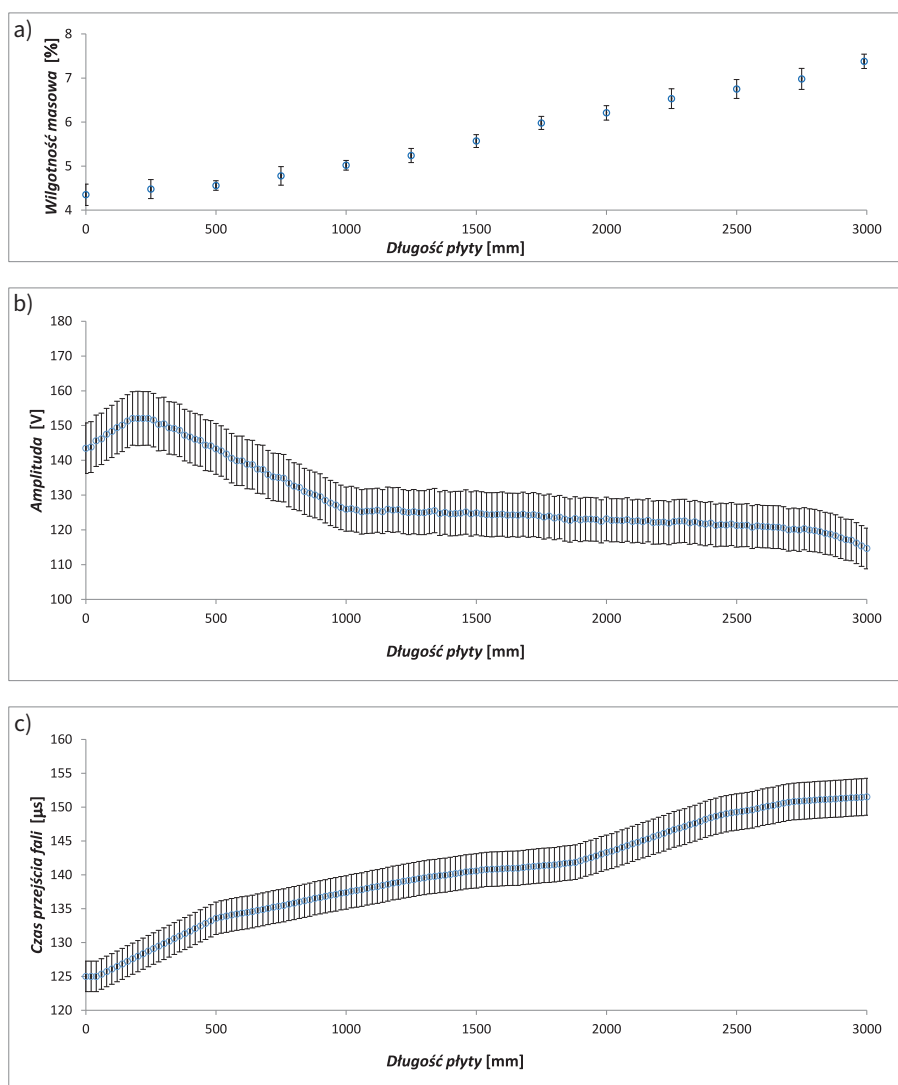


Rys. 4.67. Lokalizacja punktów pomiarowych do badania wilgotności na płycie włóknisto-cementowej



Rys. 4.68. Mapa rozkładu średnich wartości wilgotności w płycie włóknisto-cementowej zewnętrznej (elewacyjnej)

Na rysunku 4.69 przedstawiono porównanie wyników badań ultradźwiękowych (rys. 4.69b i 4.69c), z wynikami badań wilgotnościowych (rys. 4.68). Z kolei wartości średnie przedstawiono na rys. 4.69a. Analizując wyniki zawarte na rys. 4.68 i 4.69 stwierdzono, że zauważalny jest wzrost wilgotności płyty od wartości $4,35 \pm 0,2\%$ do $7,42 \pm 0,2\%$. Analizując badania ultradźwiękowe dla tej samej płyty, potwierdzono spadek amplitudy fali Lamba od wartości 152 ± 16 V do 114 ± 11 V oraz wzrost czasu przejścia fali przez płytę od wartości 126 ± 7 ms do 152 ± 5 ms, który jest konsekwencją mniejszej prędkości fali Lamba w materiale o wyższej wilgotności.



Rys. 4.69. Wyniki badań wilgotności płyty włóknisto-cementowej bezkontaktowym skanerem ultradźwiękowym: a) uśrednione wartości wilgotności wzdłuż płyty, b) amplituda fali Lamba, c) czas przejścia fali Lamba

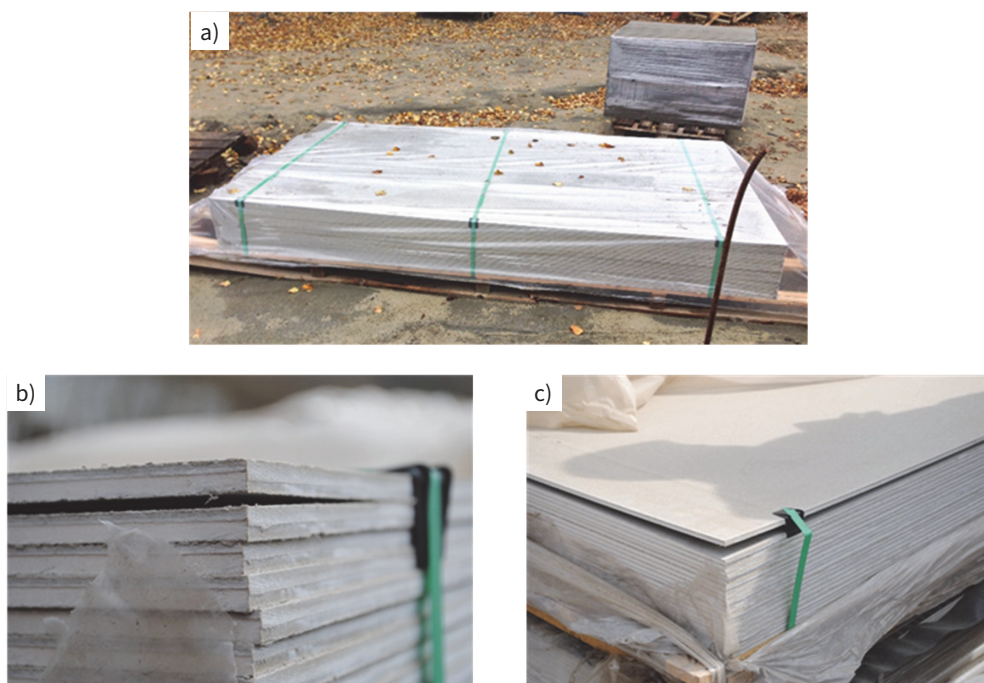
Porównanie wyników badań ultradźwiękowych z wynikami badań wilgotnościowych, przedstawionych na rys. 4.69, potwierdza jednoznacznie, że obserwowane zmiany amplitudy związane były z nierównomierną wilgotnością płyty na jej brzegach oraz w części środkowej. Prawdopodobną przyczyną była niewłaściwa procedura składowania płyt, które po wyprodukowaniu przechowywane były w nieodpowiednich warunkach.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że rozkład wilgotności masowej płyt jest nierównomierny. Zdaniem autora wynika to z konstrukcji pieca końcowego suszenia. Trzeba zaznaczyć, że wilgotność płyt włóknisto-cementowych jest bardzo istotnym parametrem widzenia aspektu jej przydatności do użytkowania i trwałości. Jej nierównomierny rozkład ma nie tylko wpływ na parametry wytrzymałościowe płyty, ale, co bardzo istotne, ma negatywny wpływ na dalszą obróbkę płyty, w szczególności na proces impregnowania, pokrywania lakierem czy inną strukturą ozdobną. W płytach takich obserwuje się wówczas złą przyczepność na powierzchni, co powoduje w konsekwencji znaczne obniżenie trwałości płyty, szczególnie pod wpływem zmiennych warunków atmosferycznych.

Zaobserwowany podczas badań ultradźwiękowych silny wpływ wilgotności masowej płyt na amplitudę fali Lamba był powodem do zainicjowania w zakładzie produkcyjnym wdrożenia procedury kontroli zawartości wilgoci w płytach włóknisto-cementowych w trakcie procesu produkcyjnego.

5. Praktyczna aplikacja metody emisji akustycznej i obrazowania SEM do oceny zmian zachodzących w procesie niszczenia i strukturze płyt włóknisto-cementowych

Wpływ czynników destrukcyjnych może pojawić się jeszcze przed montażem płyt włóknisto-cementowych. Przykładem może być składowanie płyt w niedozwolony sposób. Płyty włóknisto-cementowe wewnętrzne składowane były w sposób przedstawiony na rys. 5.1 na placu budowy przez okres kilku miesięcy, w tym zimowych. Narażone były tym samym na niekorzystne czynniki eksploatacyjne i warunki atmosferyczne.



Rys. 5.1. Płyty włóknisto-cementowe: a) składowanie na placu budowy, b) po zdjęciu folii ochronnej, c) po całkowitym rozpakowaniu

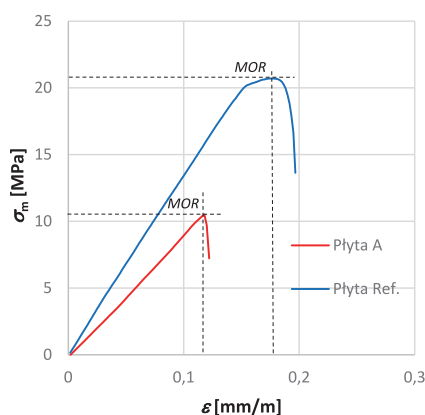
Jak przedstawiono na rys. 5.1b i 5.1c, po rozpakowaniu pierwsza płyta od góry uległa trwałej deplanacji. W celu zweryfikowania przyczyn destrukcyjnego działania czynników środowiskowych działających na wewnętrzne

plyty włóknisto-cementowe składowane na placu budowy przeprowadzono przykładowe badania. Ze względu na możliwość pobrania próbek z arkuszy badanie przeprowadzono z wykorzystaniem metody emisji akustycznej w próbie trójpunktowego zginania, zgodnie z opisaną metodyką w rozdz. 3. W celu wykazania praktycznej przydatności tej metody do oceny procesu destrukcji dla wypaczonej płyty przedstawiono rezultaty badań jednej z pobranych próbek. W celu porównania jako płytę odniesienia do badań wykorzystano płytę tego samego typu, z tej samej serii produkcyjnej znajdującej się w magazynie producenta, z której również pobrano i przebadano próbkę. W tabeli 5.1 przedstawiono wyniki badań uszkodzonej płyty A oraz nieuszkodzonej płyty referencyjnej.

Tabela 5.1. Zestawienie wyników badań gęstości objętościowej ρ , modułu Younga E_D , wytrzymałości na zginanie MOR , sumy zdarzeń $\sum N_{zd}$ oraz maksymalnej energii zdarzeń E_{zd} .

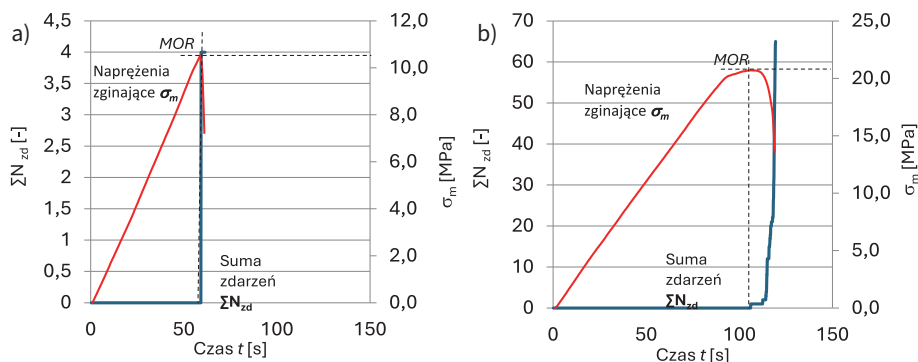
Oznaczenie płyty	Grubość płyty e [mm]	Gęstość objętościowa ρ [g/m ³]	Moduł Younga E_D [GPa]	Wytrzymałość na zginanie MOR [MPa]	Suma zdarzeń $\sum N_{zd}$ [-]
Płyta A	8,25	1660,0	6,5	10,5	4
Płyta ref.	8,25	1650,0	8,5	20,7	58

Następnym krokiem badań było określenie zależności σ – ϵ dla obu płyt i ich porównanie. Na rysunku 5.2, na którym przedstawiono zależność σ – ϵ , odnotowano istotną różnicę między badanymi płytami. Różnica w wytrzymałości na zginanie MOR między płytami wyniosła około 50%. Należy jednak zaznaczyć, że otrzymane wyniki mieszczą się jeszcze w dopuszczalnych wymaganiach normowych [154].



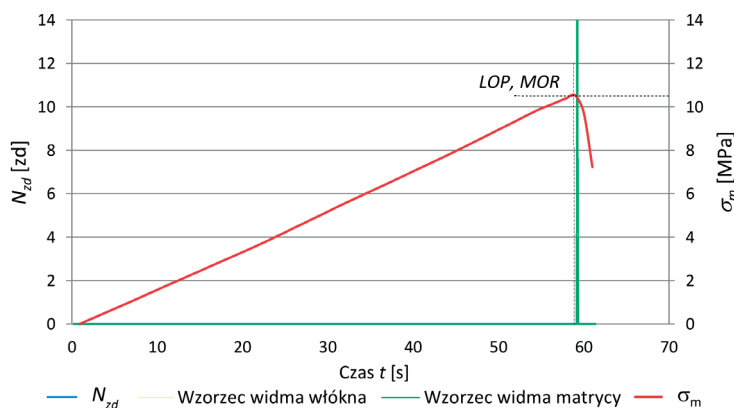
Rys. 5.2. Zależność σ – ϵ przy zginaniu dla badanej płyty A i płyty referencyjnej

Na rysunku 5.3 pokazano z kolei rozkład sumy zdarzeń dla płyty A, który jest wyraźnie inny niż dla płyty referencyjnej. Suma zarejestrowanych zdarzeń EA wynosi zaledwie ok. 7% w porównaniu do wyników dotyczących płyty referencyjnej. Świadczy to o coraz większych różnicach w badanych płytach. Ostatecznym etapem badania jest rozpoznanie zarejestrowanych zdarzeń dotyczących sygnałów towarzyszących pękaniu włókien oraz matrycy cementowej.

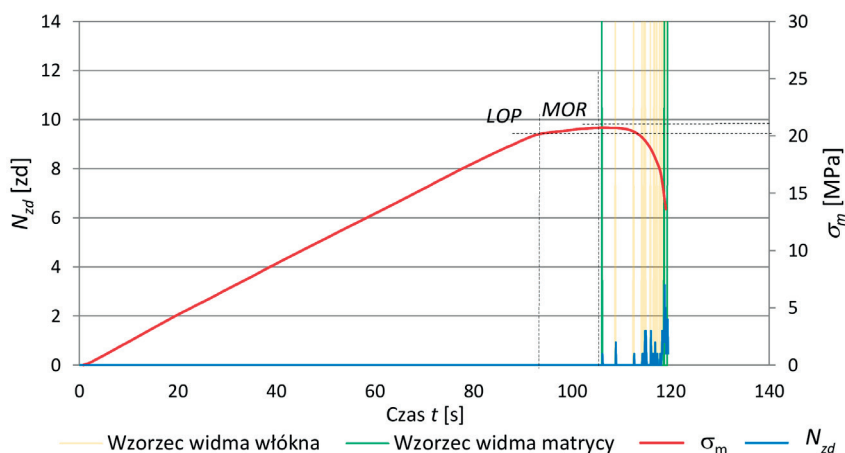


Rys. 5.3. Zależność σ_m i ΣN_{zd} w funkcji czasu t dla: a) płyty A, b) płyty referencyjnej

Na rysunkach 5.4 i 5.5 przedstawiono rezultaty badań z rozpoznania zarejestrowanych zdarzeń emisji akustycznej. Procedurę rozpoznania charakterystyk widma akustycznego wykonano zgodnie z opisem przedstawionym w podrozdz. 3.5.1, wykorzystując do tego algorytm sztucznych sieci neuronowych opisanych w podrozdz. 3.5.2.



Rys. 5.4. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla płyty A wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych

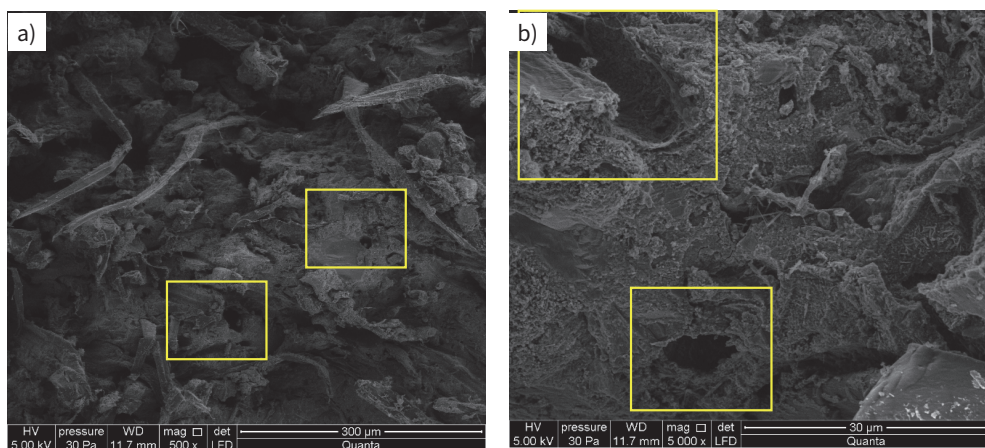


Rys. 5.5. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m oraz aktywności akustycznej A w funkcji czasu dla płyty referencyjnej wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych

Jak wykazały rezultaty badań dla płyty A, podczas próby zginania nie zarejestrowano zdarzeń towarzyszących pękaniu włókien w porównaniu z płytą referencyjną. W płycie A granica proporcjonalności LOP zrównana została z wytrzymałością na zginanie MOR. Zmiany te jednoznacznie świadczą o zaistniałym procesie destrukcji płyty włókno-cementowej. W celu potwierdzenia tego faktu wykonano badania obrazowania z wykorzystaniem SEM. Na rysunku 5.6 pokazano przykładowo uzyskane obrazy dla płyty A.

Na obrazach przedstawionych na rys. 5.6 widoczne są liczne kawerny i wyżłobienia po wyrwanych włóknach podczas próby zginania. W płycie A włókna utraciły przyczepność do matrycy cementowej i nie były zdolne do przeniesienia naprężeń rozciągających. Na podstawie analizy wyników (rys. 5.4) stwierdzono, że pojedyncze zdarzenia zarejestrowane podczas próby zginania pochodzą od pękania matrycy cementowej. Woda zawarta w porach struktury płyty podczas cykli zamrażania powiększa objętość, zwiększając tym samym objętość porów. Następstwem tego zjawiska była utrata przyczepności włókien do matrycy przez zwiększenie pustej przestrzeni pomiędzy włóknem a matrycą.

Podsumowując wykonane badania, należy stwierdzić, że badana płyta A została poddana destrukcyjnemu działaniu czynników środowiskowych, jakimi są wilgoć oraz zmienne cykle zamrażania i rozmrażania. W przypadku badanych płyt wewnętrznych czynniki te są destrukcyjne, a płyty narażone na długotrwałe działanie tych czynników nie nadają się do użytku.



Rys. 5.6. Obrazy uzyskane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego dla płyty A: a) powiększenie 500×, b) powiększenie 5000×

Zdaniem autora opisana w niniejszej pracy metoda badawcza oceny procesu destrukcji płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem metody emisji akustycznej i obrazowania SEM znajduje praktyczne i aktualne zastosowanie w budownictwie. Stała się więc inspiracją do opracowania autorskiej metody kompleksowej oceny wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i strukturę płyt włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym, która została opisana w rozdz. 6 monografii.

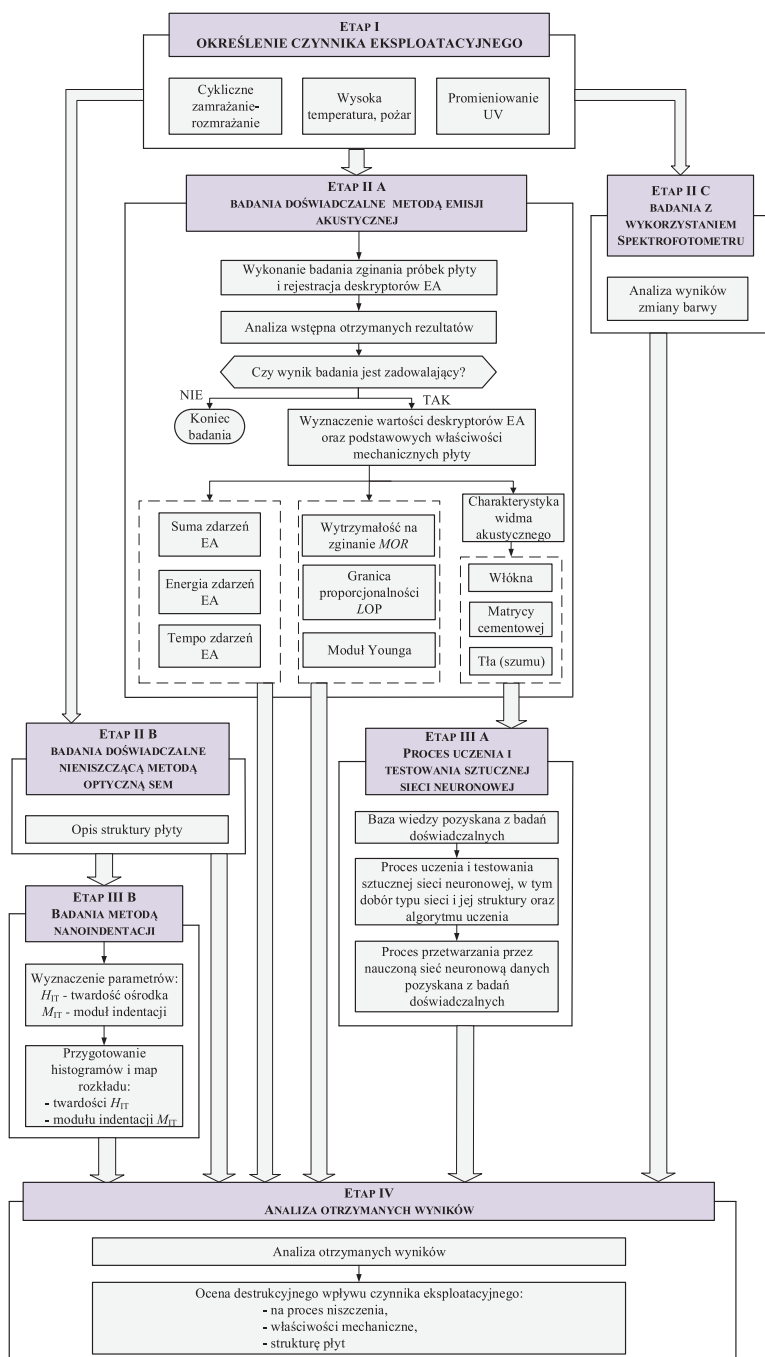
6. Autorska metoda kompleksowej oceny wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i strukturę płyt włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym

Biorąc pod uwagę kwerendę literatury i zdobyte przez autora doświadczenie oraz najnowsze rezultaty badań własnych i wynikające z nich wnioski szczególnie świadczące o przydatności wybranych zastosowanych zaawansowanych metod badawczych, rozszerzone o nowe elementy kompilacji badawczych i uzyskane wyniki, stały się inspiracją do zaproponowania w pracy oryginalnej własnej metody takiej oceny w ujęciu wieloskalowym. Na szczególną uwagę zasługują metoda emisji akustycznej w połączeniu ze sztucznymi sieciami neuronowymi, uzupełnionymi o metodę obrazowania SEM i metodę nanoindentacji. Należy podkreślić, że zaproponowana autorska metoda stanowi propozycję oryginalnej, wiarygodnej, bo potwierdzonej dogłębnymi badaniami oceny wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i strukturę kompozytów włóknisto-cementowych na podstawie parametrów, określanych kompilacją różnych metod nieniszczących.

Opracowaną autorską metodę przedstawiono na rys. 6.1 jako algorytm działań. W algorytmie wyróżniono cztery etapy.

Etap I polega na określeniu (identyfikacji) czynnika eksploatacyjnego, któremu były poddane płyty włóknisto-cementowe. Następnie należy wskazać na płytach miejsca, z których należy pobrać próbki do badań.

Etap II podzielono na trzy części oznaczone literami A, B i C. W etapie IIA pierwszym krokiem jest przygotowanie próbek płyt włóknisto-cementowych z miejsc wskazanych w etapie I. W tym celu należy wyciąć z płyty przynajmniej po trzy próbki o wymiarach 20×100 mm. Tak przygotowane próbki należy umieścić w maszynie wytrzymałościowej i przeprowadzić badanie trójpunktowego zginania, podczas którego rejestrowane będą: siła niszcząca F i odkształcenie ε oraz deskryptory emisji akustycznej, takie jak: suma zdarzeń $\sum N_{zd}$, energia zdarzeń E_{zd} , tempo zdarzeń N_{zd} . Po wykonaniu próby zginania, należy dokonać wstępnej analizy otrzymanych rezultatów. Jeżeli wyniki są zadowalające, kolejnym krokiem jest wyznaczenie podstawowych właściwości mechanicznych płyty i wartości deskryptorów emisji akustycznej. Właściwości mechaniczne płyty to wytrzymałość na zginanie MOR , granica proporcjonalności LOP i wartość modułu Younga E_D .



Rys. 6.1. Schemat autorskiej metody kompleksowej oceny wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i strukturę kompozytów włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym

Zarejestrowane sygnały emisji akustycznej na etapie IIA służą do przygotowania wzorcowych charakterystyk widm akustycznych towarzyszących pękaniu włókien i matrycy cementowej oraz tła (szumu) badanych płyt włóknisto-cementowych. Po tym można przejść do kolejnego etapu. W zaprezentowanej metodzie zawarte są jeszcze dwa etapy, tj. etap IIB i IIC, które występują równolegle z etapem IIA. Etap IIB dotyczy badań doświadczalnych z wykorzystaniem nieniszczącej metody optycznej z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego SEM, umożliwiającego wieloskalową obserwację topografii badanego materiału w skali od nanometrycznej do mikrometrycznej. Badania te polegają na umieszczeniu na stoliku w komorze mikroskopu próbki płyty, a następnie skanowaniu jej powierzchni linia po linii. W prezentowanej metodzie badania te wykorzystano jako wspomagające do badań z wykorzystaniem metody emisji akustycznej. Dzięki nim otrzymano bardzo precyzyjny opis struktury badanej płyty włóknisto-cementowej. Etap IIC związany jest z badaniami z użyciem spektrofotometru. Jeżeli chodzi o etap IIC, to jest on przeznaczony tylko dla płyt włóknisto-cementowych elewacyjnych (okładzinowych), które zostały poddane oddziaływaniu promieniowania UV. Badania te umożliwiają ocenę zmiany barwy powierzchni płyty. Wyniki zmiany barwy przedstawia się za pomocą różnicy współrzędnych w przestrzeni barw CIELAB.

Zaproponowany w pracy etap III metody jest również podzielony na dwa równoległe etapy oznaczone jako IIIA i IIIB. Etap IIIA stanowi proces uczenia i testowania sztucznej sieci neuronowej. Na początku, na podstawie badań doświadczalnych wykonanych uprzednio z wykorzystaniem emisji akustycznej należy przygotować bazę wiedzy. Otrzymany zbiór wzorców należy zapisać w pliku komputerowym, a następnie wykorzystuje się go w następnym kroku jako dane wejściowe dla sieci neuronowej. Kolejny krok to uczenie sieci, podczas którego wzorce uczące podawane są w odpowiedniej kolejności. Wykorzystując wzorce uczące, sztuczna sieć neuronowa uczy się identyfikować charakterystyki widm akustycznych towarzyszących pękaniu włókien, matrycy oraz charakterystyki tła. Na tym etapie dobierany jest typ sztucznej sieci neuronowej i jej struktura oraz algorytm uczenia. W zależności od liczby uzyskanych parametrów z badań doświadczalnych należy przyjąć strukturę sieci. Po nauczaniu sztucznej sieci neuronowej na danych wejściowych należy sprawdzić poprawność odwzorowywania sieci na danych do uczenia oraz na danych do testowania. W tym celu podawane są dwie pary danych wejściowych, a mianowicie dane, na których uczyła się sieć, gdzie sprawdzana była umiejętność odtwarzania wzorców, oraz dane do testowania, gdzie sprawdzana była umiejętność identyfikowania wzorcowych charakterystyk widmowych pochodzących od włókna i matrycy w trakcie próby zginania.

Jeżeli sieć neuronowa poprawnie odwzorowuje dane uczące i poprawnie identyfikuje dane testujące, to przyjmuje się, że jest ona nauczona. Następnie dane wyjściowe z sieci neuronowej należy przetworzyć. Wynikiem tego jest dla każdego z segmentów zapisu EA próby zginania, zapis wyjść sieci neuronowych rozpoznanych odpowiadających im widm akustycznych odpowiednio dla charakterystyki pęknięcia włókna i matrycy lub tła. Etap IIIB dotyczy badań z wykorzystaniem metody nanoindentacji. Metoda ta jest zalecana do wieloskalowego podejścia w aspekcie prowadzonych badań. Autor zaleca ją jako uzupełnienie metody obrazowania SEM i metody emisji akustycznej. W tym etapie na początku należy przygotować próbki do badań zgodnie z opisem zawartym w podrozdz. 4.3.1 niniejszej pracy. Ocenę parametrów mechanicznych płyt włóknisto-cementowych należy przeprowadzać z wykorzystaniem metody opracowanej dla materiałów niejednorodnych na osnowie cementowej z użyciem techniki Grid Indentation Technique (GIT). Dla każdej próbki zastosowano regularną siatkę 220 testów. W każdym punkcie siatki należy wykonać pojedynczy standardowy test nanoindentacji przy maksymalnym obciążeniu 500 mN. Test przebiega w następujący sposób: ciągły wzrost siły do ustalonej wartości $F_{\max}$, następnie w krótkim czasie utrzymywana jest ustalona maksymalna wartość siły, po czym następuje odciążenie, które również odbywa się w sposób ciągły. Podczas badania rejestrowana jest zależność między siłą F i wartością zagłębienia końcówki wgłębnika h . Po teście w badanej powierzchni pozostaje odcisk o wielkości zależnej m.in. od twardości materiału. Na podstawie analizy przeprowadzonych badań uzyskuje się rozkład parametrów mechanicznych na powierzchni próbek, tj. mapy konturowe i histogramy rozkładu twardości H_{IT} oraz rozkładu modułu indentacji M_{IT} .

Ostatni, IV etap to analiza otrzymanych wyników rozszerzonej kompilacji badań z wykorzystaniem wszystkich użytych metod badawczych. Podczas analizy określa się, czy wystąpił destrukcyjny wpływ wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia, właściwości mechaniczne oraz strukturę płyt włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym.

Opracowana i przedstawiona w pracy autorska metoda kompleksowej oceny wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i strukturę kompozytów włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym znajduje praktyczne i aktualne zastosowanie w budownictwie. Jest również odpowiedzią na wiele napotkanych przez autora problemów naukowych i inżynierskich związanych z płytami włóknisto-cementowymi poddanymi oddziaływaniu różnych czynników eksploatacyjnych.

7. Wnioski

Celem autora niniejszej monografii była ocena wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na strukturę i proces niszczenia kompozytów włóknisto-cementowych, a także identyfikacja imperfekcji materiałowych (wad produkcyjnych), takich jak delaminacje i rysy. Czynnikiem eksploatacyjnym, którego wpływ wzięto pod uwagę w pracy, było: cykliczne zamrażanie–rozmarzanie, promieniowanie UV (badania starzeniowe), wysoka temperatura 230°C oraz oddziaływanie pożaru. W badaniach wykorzystano różne kompilacje metod badawczych, w tym m. in.: metodę emisji akustycznej w połączeniu ze sztucznymi sieciami neuronowymi, metodę optyczną z wykorzystaniem elektronicznego mikroskopu skaningowego, metodę nanoindentacji i bezkontaktowy skaner ultradźwiękowy. Głównym celem było opracowanie autorskiej metody umożliwiającej wiarygodną ocenę wpływu wymienionych wyżej czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i zmiany w strukturze płyt włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym, co niewątpliwie osiągnięto.

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych i interpretacji ich rezultatów sformułowano najważniejsze osiągnięcia naukowe.

1. Wykazano jednoznacznie, że wpływ zmiennych cykli zamrażania i rozmrażania objawia się przede wszystkim spadkiem wytrzymałości na zginanie *MOR* dla wszystkich badanych serii płyt. Przeprowadzone badania wykazały, że w chwili osiągnięcia wytrzymałości na zginanie *MOR* następuje pęknięcie matrycy cementowej. Zarysowanie matrycy cementowej inicjuje następne zdarzenia będące pękaniem włókien w płytach włóknisto-cementowych. We wszystkich seriach zaobserwowano powstanie lub wyraźne zwiększenie nieliniowego przyrostu naprężeń w stosunku do odkształceń. Udowodniono, że działanie cykli zamrażania i rozmrażania obniża aktywność akustyczną zdarzeń zachodzących podczas próby zginania. W trakcie badań z wykorzystaniem SEM zaobserwowano mechaniczne uszkodzenia włókien celulozowych oraz PVA, które zostały przerwane lub wyrwane z matrycy cementowej podczas próby trójpunktowego zginania. Analizując obrazy wykonane z wykorzystaniem SEM oraz rezultaty badań z użyciem metody emisji akustycznej wykazano, że dla płyt włóknisto-cementowych działanie cykli zamrażania i rozmrażania działa destrukcyjnie w zakresie osłabienia przyczepności włókien do matrycy cementowej oraz obniżeniem wytrzymałości na rozciąganie włókien celulozowych.

2. Udowodniono, że oddziaływanie promieniowania UV wpływa destrukcyjnie na strukturę płyt, szczególnie na włókna, co zostało potwierdzone spadkiem liczby zdarzeń rozpoznanych jako pękanie włókien. Udowodniono, że wyraźnie zmieniają się proporcje liczby zdarzeń przypisanych do pęknięcia włókien w stosunku do liczby zdarzeń przypisanych pękaniu matrycy po poddaniu płyt badaniom starzeniowym. Wykazano, że badania starzeniowe powodują zwiększenie liczby zdarzeń przypisanych do pęknięcia matrycy, co jednoznacznie świadczy o destrukcji włókien zawartych w strukturze płyt.
3. Potwierdzono przydatność metody nanoindentacji, dzięki której zaobserwowano zauważalne zmiany morfologii mechanicznej analizowanych płyt pod wpływem wysokiej temperatury. Średnia wartość modułu indentacji M_{IT} , będącego miarą sprężystości materiału, po wystawieniu na działanie temperatury 230°C przez 3 godziny istotnie się zmniejszyła. Rezultaty te bardzo dobrze korespondują z analizą wykonaną z wykorzystaniem obrazowania SEM. Spadek odpowiedzi sprężystej mikrostruktury materiału, w rzeczywistości jego sztywności, był głównie spowodowany zmianami geometrii mikrostruktury obserwowanymi w SEM. Na tej podstawie udowodniono, że średnia wartość twardości H_{IT} w wyniku ekspozycji na temperaturę 230°C istotnie się zmniejszyła.
4. Udowodniono, że wysoka temperatura ma destrukcyjny wpływ na strukturę płyt włóknisto-cementowych. Wykazano, że wraz ze wzrostem temperatury i czasem jej oddziaływania na płyty włóknisto-cementowe znacząco zmienia się charakter przebiegu niszczenia podczas próby trójpunktowego zginania, co wynika z zarejestrowanych deskryptorów emisji akustycznej oraz uzyskanych wartości wytrzymałości na zginanie MOR. Płyty poddane działaniu ognia charakteryzują się tym, że w momencie osiągnięcia wytrzymałości na zginanie MOR ulegają zniszczeniu podczas kruchego pęknięcia. Świadczy o tym zapis tempa zdarzeń EA, który jest w zasadzie jednostkowym pikiem w porównaniu do zapisu dla płyty referencyjnej. Na tej podstawie autor wykazał, że wysoka temperatura powoduje uszkodzenie włókien celulozowych (pirolizę) zawartych w strukturze płyty. Kruche pękanie zarejestrowane podczas badań świadczy o całkowitej pirolizie włókien celulozowych i tym samym uzyskaniu w wyniku tego procesu struktury płyty składającej się tylko z matrycy cementowej.
5. Udowodniono przydatność wykorzystania bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego do wykrywania imperfekcji materiałowych, tj. delaminacji i rys w płytach włóknisto-cementowych (wad produkcyjnych)

w wyniku nieprawidłowego składowania. Analiza badań potwierdziła, że w przypadku wykrycia delaminacji zaobserwowano nagły lokalny spadek amplitudy fali w płycie, który istotnie odbiega od wartości średniej amplitudy w zbiorze płyt. Jeżeli chodzi o identyfikację rys, to w badaniach wykazano, że otrzymany przebieg amplitudy fali Lamba sugeruje pojawienie się nieprawidłowości tego typu. Widoczne jest w tym przypadku przesunięcie narastania sygnału fali Lamba w porównaniu z amplitudą rejestrowaną dla innych płyt pozbawionych tego typu imperfekcji. Ponadto w przeprowadzonych badaniach z wykorzystaniem skanera potwierdzono, że opisywana metoda badawcza może być przydatna również w określaniu zawilgocenia płyt włóknisto-cementowych. Analizując wyniki badań ultradźwiękowych dla płyty zawilgoconej, potwierdzono spadek amplitudy fali Lamba oraz wzrost czasu przejścia fali przez płytę w porównaniu z wynikami dotyczącymi płyt będących w stanie powietrzno-suchym (niezawilgoconymi).

Istotnym osiągnięciem naukowym autora niniejszej monografii, będącym zwieńczeniem przeprowadzonych badań własnych i analizy uzyskanych wyników, jest opracowanie autorskiej metody kompleksowej oceny wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i strukturę płyt włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym. Niewątpliwie ważne jest rzeczywiste potwierdzenie przydatności zaproponowanej metody.

Autor ma świadomość, że przedstawione w pracy wyniki badań własnych i analizy nie wyczerpują wszystkich omówionych i zasygnalizowanych problemów. W związku z ogromnym potencjałem, jaki mają płyty włóknisto-cementowe i powszechnym ich zastosowaniem zdaniem autora istnieje potrzeba kontynuacji badań rozpoczętej w pracy problematyki. Autor proponuje następujące badania naukowe:

1. Wpływ agresji chemicznej wywołanej opadami deszczu na proces niszczenia oraz strukturę płyt stanowiących okładzinę elewacyjną w systemach elewacji wentylowanych. Badania te byłyby uzupełnieniem badań dotyczących oddziaływania promieniowania UV oraz cyklicznego zamrażania-rozmrażania. Idealnym rozwiązaniem byłoby poddanie płyt tym trzem czynnikom jednocześnie, co odzwierciedlałoby realne, możliwe do wystąpienia warunki środowiskowe;
2. Proces destrukcji płyt włóknisto-cementowych poddanych wpływom czynników produkcyjnych oraz wad produkcyjnych i nieprawidłowego składowania. Autor obserwował wielokrotnie eksploatowane płyty włóknisto-cementowymi mającymi wady produkcyjne, takie jak:

delaminacje, wykwyty, spękania. Wpływ tych wad na trwałość płyt włóknisto-cementowych nie została dotychczas zbadana;

3. Próby rozróżnienia charakterystyk widm akustycznych pochodzących od pękania różnego rodzaju włókien wraz z próbą oszacowania ich liczby. Identyfikacja taka umożliwiłaby lepszą kontrolę produkowanych płyt oraz podjęcie analizy dotyczącej szczególnie odporności poszczególnych rodzajów włókien na zachowanie w wysokich temperaturach;
4. Poszerzenie zaproponowanych procedur badań i analiz o analizę innych materiałów na bazie spoiw cementowych. Zastosowanie metody wielostopniowej do rozmaitych materiałów budowlanych umożliwiłoby uzupełnienie wiedzy naukowej o zachowaniu ich w procesie eksploatacji i sytuacjach wyjątkowych (pożar). Dodatkowo analiza dotycząca wad, które mogły powstać w procesie produkcyjnym, przyczynić się może do poprawy bezpieczeństwa i świadomego użytkowania wielu obiektów, co jest niezmiernie istotne zarówno dla nauki, jak i dla całego przemysłu budowlanego.

Bibliografia

- [1] Abraham O., Piwakowski B., Villain G., Durand O., *Non-contact, automated surface wave measurements for the mechanical characterization of concrete*, Construction and Building Materials, 2012, Vol. 37, s. 904–915.
- [2] Adamczak-Bugno A., Gorzelańczyk T., Krampikowska A., Szymków M., *Nieniszczące badania struktury materiałów włóknisto-cementowych z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego*, Badania Nieniszczące i Diagnostyka, 2017, nr 3, s. 20–23.
- [3] Adamczak-Bugno A., Krampikowska A., Świt G., *Analysis of the Frequency of Acoustic Emission Events in Terms of the Assessment of the Reduction of Mechanical Parameters of Cellulose-Cement Composites*, Materials, 2021, No. 14.
- [4] Adeli H., *Neural networks in civil engineering: 1989–2000*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2001, Vol. 16, s. 126–142.
- [5] Akhavan A., Catchmark J., Rajabipour F., *Ductility enhancement of autoclaved cellulose fiber reinforced cement boards manufactured using a laboratory method simulating the Hatschek process*, Construction and Building Materials, 2017, Vol. 135, s. 251–259.
- [6] Alleyne D.N., Cawley P., *The interaction of Lamb waves with defects*, IEEE Transactions on Ultrasonic Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, Vol. 39, s. 381–397.
- [7] Almeida A.E.F.S., Tonoli G.H.D., Santos S.F., Savastano H., *Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age*, Cement and Concrete Composites, 2013, Vol. 42, s. 49–58.
- [8] Ambroziński Ł., Stepiński T., Paćko P., Uhl T., *Self-focusing Lamb waves based on the decomposition of the time-reversal operator using time-frequency representation*, Mech. Syst. Signal Process, 2012, Vol. 27, s. 337–349.
- [9] Ardanuy M., Claramunt J., Toledo Filho R.D., *Cellulosic Fiber Reinforced Cement-Based Composites: A Review of Recent Research*, Construction and Building Materials 2015, Vol. 79, s. 115–128.
- [10] Banaszak J., *Zastosowanie metody emisji akustycznej do monitorowania pęknięć w materiałach suszonych*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2014, Vol. 53, s. 10–12.
- [11] Bentchikou M., Guidoum A., Scrivener K., Silhadi K., Hanini S., *Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix*, Construction and Building Materials, 2012, Vol. 34, s. 451–456.
- [12] Bentur A., Akers S.A.S., *The microstructure and aging of cellulose fiber reinforced cement composite cured in normal environment*, Int. J. Cem. Comp. and Ltwt. Conc., 1989, Vol. 11, No. 2, s. 99–109.

- [13] Bezerra E.M., Joaquim A.P., Savastano H., *Some properties of fiber-cement composites with selected fibers*, Conferencia Brasileira de Materiais e Tecnologias Não Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social Brasil-Nocmat 2004.
- [14] Biagiotti J., Puglia D., Kenny J.M., *A review on natural fibre-based composites*, Part I, 2008, s. 37–41.
- [15] Bledzki A., Gassan J., *Composites reinforced with cellulose based fibres*, Prog. Polym. Sci, 1999, Vol. 24, s. 221–274.
- [16] Brandt A.M., *Zastosowanie doświadczalnej mechaniki zniszczenia do kompozytów o matrycach cementowych*. Praca zbiorowa – Mechanika kompozytów betonowych, Ossolineum, Wrocław 1983, s. 449–504.
- [17] Brunarski L., Runkiewicz L., *Podstawy i przykłady stosowania metod nieniszczących w badaniach konstrukcji z betonu*, ITB, Warszawa 1983.
- [18] Chady T., Schabowicz K., *Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu*, Badania Nieniszczące i Diagnostyka, 2016, nr 1–2, s. 62–66.
- [19] Chady T., Schabowicz K., Szymków M., *Multisource Electromagnetic Automated Inspection of Fibre-Cement Boards*, Automation in Construction 2018, Vol. 94, s. 383–394.
- [20] Claramunt J., Ardanuy M., García-Hortal J.A., *Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites*, Carbohydrate Polymers, 2010, 79, s. 200–205.
- [21] Cooke A.M., *Durability of Autoclaved Cellulose Fiber Cement Composites*. Conference on Inorganic Bonded Wood and Fibre Composites, Idaho, 2000.
- [22] Cooke T., *Formation of Films on Hatschek Machines*, Bonded Wood and Fibre Composites Conference, Idaho, 2002.
- [23] Cooke A.M., Akers S., *The effect of aluminous additives on the properties of Autoclaved Cellulose Fibre Cement*, IIBCC, Madrid 2008.
- [24] Cooke W.E., *Fibrosis of the Lungs due to the Inhalation of Asbestos Dust*, British Medical Journal, 1924, Vol. 2, s. 147.
- [25] Coutts R.S.P., Kightly P., *Bonding in Wood Fibre-Cement Composites*, Journal of Materials Science, 1984, Vol. 19, s. 3355–3359.
- [26] Coutts R.S.P., *A Review of Australian Research into Natural Fibre Cement Composites*, Cement and Concrete Composites, 2005, Vol. 27, s. 518–526.
- [27] Dębowski T., Lewandowski M., Mackiewicz S., Ranachowski Z., Schabowicz K., *Badania ultradźwiękowe płyt włóknisto-cementowych*, Przegląd Spawalnictwa, 2016, vol. 88, nr 10, s. 69–71.
- [28] Dobie G., Summan R., Pierce S.G., Galbraith W., Hayward G., *A noncontact ultrasonic platform for structural inspection*, IEEE Sensors Journal, 2011, Vol. 11, s. 2458–2468.

-
- [29] Döring D., Solodov I., Busse G., *Air-coupled Surface Acoustic Waves: Opportunities and Limitations for NDT-Applications*, IV NDT in Progress, Prague 2007.
- [30] Döring D., Siegmund F., Rheinfurth M., Solodov I., Busse G., Haberstroh E., *Aircoupled ultrasonic Lambwaves for process monitoring*, Proc. 10th European Conference on NDT, Moscow 2010.
- [31] Drelich R., Gorzelańczyk T., Pakuła M., Schabowicz K., *NDT testing of cellulose fibre cement boards using non-contact ultrasound*, J. Nondestruct. Test. Ultrason., 2013, Vol. 6, s. 21–28.
- [32] Drelich R., Domanowski P., Gorzelańczyk T., Pakuła M., Radzik Ł., Schabowicz K., *Studies of influence of moisture content in cellulose fiber cement boards on wave parameters using non-contact ultrasound*, Proc. 11th European Conference on NDT, Brno University of Technology, Prague 2014.
- [33] Drelich R., Gorzelańczyk T., Pakuła M., Schabowicz K., *Automated Control of Cellulose Fibre Cement Boards with a Non-Contact Ultrasound Scanner*, Automation in Construction, 2015, Vol. 57, s. 55–63.
- [34] Drzymała T., Ogrodnik P., Zegardło B., *Wpływ oddziaływania wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na zginanie kompozytów cementowych z dodatkiem włókien polipropylenowych*, TTS Technika Transportu Szynowego, 2016, nr 12, s. 82–86.
- [35] Drzymała T., *Wpływ dodatku włókien polipropylenowych do kompozytów cementowych poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury na ich wytrzymałość na rozciąganie*, Przemysł Chemiczny, 2017, nr 9, s. 1902–1905.
- [36] Färber J., Reiterer A., Stanzl-Tschegg S., Fratzl P., *Cellulose Microfibril Angles in a Spruce Branch and Mechanical Implications*, Journal of Materials Science, 2001, Vol. 36, s. 5087–5092.
- [37] Faruk O., Bledzki A.K., Fink H.P., Sain M., *Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010*, Progress Polymer Science, 2012, Vol. 37, s. 1552–1596.
- [38] Fojutowski A., Wiejak A., Kropacz A., *Odporność izolacji formowanej in situ z włókna celulozowego w postaci luźnej na grzyby powodujące pleśnienie*, Izolacje, 2016, nr 6, s. 44–47.
- [39] Garbacz A., *Non-destructive assessment of repair efficiency with impact-echo and ultrasonic methods — an overview*, International Conference on Concrete Repair Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR) Cape Town, South Africa, 2005.
- [40] Garbacz A., *Nieniszczące badania betonopodobnych kompozytów polimerowych za pomocą fal sprężystych – ocena skuteczności napraw*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Budownictwo, z. 147, 2007, s. 3–208.
- [41] Garbacz A., *Zastosowanie metod nieniszczących w ocenie skuteczności napraw konstrukcji betonowych wg PN-EN 1504*, XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awary budowlane”, Szczecin 2015.

- [42] Garboczi E.J., *Three-Dimensional Mathematical Analysis of Particle Shape Using X-Ray Tomography and Spherical Harmonics: Application to Aggregates Used in Concrete*, Cement and Concrete Research, 2002, Vol. 32, s. 1621–1638.
- [43] Garcia-Hortal J.A., *Fibras papeleras*, Barcelona Edicions UPC, 2007.
- [44] Garnier V., Piwakowski B., Abraham O., Villain G., Payan C., Chaix J.F., *Acoustic Techniques for Concrete Evaluation: Improvements, Comparisons and Consistency*, Construction and Building Materials, 2013, Vol. 43, s. 598–613.
- [45] Goodhew P., Humphreys J., Beanland R., *Electron Microscopy and Analysis*, 3rd ed., Taylor and Francis, London 2001.
- [46] Gorzelańczyk T., *Ocena metodami akustycznymi procesu niszczenia betonów samozagęszczalnych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2007.
- [47] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., *Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych metodą dielektryczną*, Przegląd Spawalnictwa, 2014, nr 11, s. 24–27.
- [48] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., *Non-Destructive Testing of Moisture in Cellulose Fiber Cement Boards*, 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), Prague 2014.
- [49] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., *Nondestructive Testing of Moisture in Cellulose Fibre Cement Boards*, Proc. of 3rd Int. Conference Durability and Effectiveness of Repairing of Buildings, Poznań 2014.
- [50] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., *Badania płyt włóknisto -cementowych zawierających materiały z recyklingu*, Materiały Budowlane, 2015, nr 10, s. 27–29.
- [51] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., *Rewitalizacja elewacji budynków z zastosowaniem płyt włóknisto-cementowych*, Materiały Budowlane, 2015, nr 11, s. 163–165.
- [52] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., *Zastosowanie płyt włókno-cementowych do naprawy okładzin wewnętrznych*, [w:] *Trwałe metody naprawcze w obiektach budowlanych: praca zbiorowa*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2015, s. 195–205.
- [53] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., Szymków M., *Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem emisji akustycznej*, Przegląd Spawalnictwa, 2016, vol. 88, nr 10, s. 35–38.
- [54] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., *Effect of freeze-thaw cycling on the failure of fibre-cement boards, assessed using acoustic emission method and artificial neural network*, Materials, 2019, Vol. 12, No. 13, s. 1–18.
- [55] Gorzelańczyk T., Pachnicz M., Różański A., Schabowicz K., *Multiscale structural assessment of cellulose fibres cement boards subjected to high temperature treatment*, Materials, 2019, Vol. 12, No. 15, s. 1–13.
- [56] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., Jurasz Z., Michałek P., Piczak A., Juraszek J., *Wpływ badań starzeniowych na płyty włóknisto-cementowe oceniany metodami nieniszczącymi*, Badania Nieniszczące i Diagnostyka, 2019, nr 3, s. 10–13.

-
- [57] Gorzelańczyk T., Pachnicz M., Różański A., Schabowicz K., *Identification of microstructural anisotropy of cellulose cement boards by means of nanoindentation*, Construction and Building Materials, 2020, Vol. 257, s. 1–11.
- [58] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., Szymków M., *Tests of fiber cement materials containing recycled cellulose fibers*, Materials, 2020, Vol. 13, No. 12, s. 1–20.
- [59] Gorzelańczyk T., Schabowicz K., Szymków M., *Application of the acoustic emission method and artificial neural networks to assess the damaging effect of high temperature on the structure of fibre-cement boards*, Materials, 2022, Vol. 15, No. 18, s. 1–16.
- [60] Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W., Krampikowska A., Tworzewska J., Tworzewski P., *Experimental validation of concrete crack identification and location with acoustic emission method*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2012, vol. 12 (1), s. 23–28.
- [61] Gozdecka G., Domowicz B., *Charakterystyka cech akustycznych czipsów ziemniaczanych w zależności od rodzaju testu mechanicznego*, Nauka Technologia Jakość, 2013, vol. 2 (87), s. 126–136.
- [62] Grosse Ch., Ohtsu M., *Acoustic Emission Testing*, Springer, Berlin–Heidelberg 2008.
- [63] Händle F., *Extrusion in Ceramics*, Springer, 2009.
- [64] Hannant D.J., *Fibre Cements and fibre concretes*, John Wiley & Sons, 1978.
- [65] Hasse L., Siralski L., Sikula J., *Pomiary obróbki sygnałów emisji akustycznej w diagnostyce obiektów*, XIV Seminarium „Zastosowanie komputerów w nauce i technice”, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 20, Gdańsk 2004.
- [66] Haykin S., *Neural Networks – A Comprehensive Foundations*, Macmillian College Publishing Co., Englewood Cliffs, NJ, 1994, 2nd Ed., Prentice Hall Intern., Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [67] Hertlein B.H., Davis A.G., Davis A.G., *Locating Concrete Consolidation Problems Using the Nondestructive Impulse Response Test*, Am. Concr. Inst. Fall Conv., Los Angeles 1988.
- [68] Hertlein B., Davis A., *Locating Concrete Consolidation Problems Using the Nondestructive Impulse Response Test*, American Concrete Institute Fall Convention, Los Angeles 1998.
- [69] Hertz J., Krogh A., *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison-Wesley Publishing Comp., Reading, Mass., USA, 1991.
- [70] Hoła J., Moczko A., *Analiza procesu niszczenia wybranych struktur betonowych przy wykorzystaniu metody ultradźwiękowej i emisji akustycznej*, Rozprawa doktorska, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1984, 206 s.
- [71] Hoła J., Ranachowski Z., *Metoda emisji akustycznej w zastosowaniu do badania betonu* 26/1991, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 1991.

- [72] Hoła J., *Naprężenia inicjujące i krytyczne a destrukcja naprężeniowa w betonie ściskany*, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 76, Monografie Nr 33, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [73] Hoła J., Schabowicz K., *Nieniszcząca diagnostyka obiektów budowlanych. Przegląd wybranych najnowszych metod z przykładami zastosowań*, 56 Konferencja Naukowa KILiW PAN oraz KN PZITB „Diagnostyka, monitoring i modernizacja eksploatowanych obiektów budowlanych”, red. W. Trąmpczyński, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2010.
- [74] Hoła J., Schabowicz K., *State-of-the-Art Non-Destructive Methods for Diagnostic Testing of Building Structures – Anticipated Development Trends*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2010, Vol. 10, s. 5–18.
- [75] Hoła J., Sadowski Ł., Schabowicz K., *Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods*, Automation in Construction, 2011, Vol. 20, s. 799–807.
- [76] Hoła J., Bień J., Sadowski Ł., Schabowicz K., *Nondestructive and semidestructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2015, Vol. 63, No. 1, s. 87–96.
- [77] Homme M., Kubska M., *Technologia malowania wyrobów włókno-cementowych* Materiały Budowlane, 2012, nr 6, s. 21, 22.
- [78] Ikai S., Reichert J.R., Rodrigues A.V., Zampieri V.A., *Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process*, Construction and Building Materials, 2010, Vol. 24, s. 171–180.
- [79] Informacja ze strony internetowej <http://atgndt.com/>
- [80] Informacja ze strony internetowej <http://www.cembrit.com>
- [81] Informacja ze strony internetowej <http://atlas-mts.com>
- [82] Informacja ze strony internetowej <http://www.equitone.com>
- [83] Informacja ze strony internetowej <http://www.esal.si>
- [84] Informacja ze strony internetowej https://de.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Hatschek
- [85] Informacja ze strony internetowej <http://www.xrite.com/>
- [86] Informacja ze strony internetowej <https://www.kuraray.us.com>
- [87] Informacja ze strony internetowej <https://pl.wikipedia.org/wiki/Azbest>
- [88] Informacja ze strony internetowej <https://portalkomunalny.pl/historia-azbestu-od-euforii-zakazu-314159>
- [89] Informacje ze strony internetowej <https://scalamid.com/pl>
- [90] Jawaid M., Khalil H.P.S.A., *Cellulosic/synthetic fibre reinforced polimer hybrid composites: A review*, Carbohydrate Polymers, 2011, Vol. 86, s. 1–18.
- [91] John M., Thomas S., *Biofibres and biocomposites*, Carbohydrate Polymers, 2008, Vol. 71, s. 343–364.

-
- [92] Juskowiak E., Małdachowska A., Panek M., *Emisja akustyczna kompozytowych płyt przekładkowych podczas trójpunktowego zginania*, Przetwórstwo Tworzyw, 2013, nr 4, 351–354.
- [93] Kaczmarek M., Piwakowski B., Drelich R., *Noncontact Ultrasonic Nondestructive Techniques: State of the Art and Their Use in Civil Engineering*, Journal of Infrastructure Systems, 2017, Vol. 23, s. 45–56.
- [94] Kaszyński J., *Ultrasonic testing of concrete, taking into account reinforcement and cracking zones*, Szczecin Polytechnic, Scientific Papers, Szczecin 2003.
- [95] Keppert M., Vejmelkova E., Švarcová S., Bezdička P., Černý R., *Zmiany mikrostruktury i właściwości resztkowe kompozytów cementowych zbrojonych włóknami poddanych działaniu wysokich temperatur*, Cement Wapno Beton, 2012, nr 2, s. 77–89.
- [96] Khorami M., Ganjian E., *Comparing flexural behavior of fibre–cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus*, Construction and Building Materials, 2011, Vol. 25, s. 3661–3667.
- [97] Khorami M., Ganjian E., *The effect of limestone powder, silica fume and fibre content on flexural behaviour of cement composite reinforced by waste kraftpulp*, Construction and Building Materials, 2013, Vol. 46, s. 142–149.
- [98] Kichou H.B., Chavez J.A., Turo A., Salazar J., Garcia-Hernandes M.J., *Lamb waves beam deviation due to small inclination of the test structure in air-coupled ultrasonic NDT*, Ultrasonics, 2006, Vol. 44, s. 1077–1082.
- [99] Kim P.J., Wu H.C., Lin Z., Li V.C., Lhoneux B., Akers S.A.S., *Micromechanics-based durability study of cellulose cement in flexure*, Cement and Concrete. Research, 1999, Vol. 29, s. 201–208.
- [100] Kopyłow O., *Ocena techniczna elewacji wentylowanych*, Materiały Budowlane, 2013, (9).
- [101] Kopyłow O., *Elewacje wentylowane*, Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych, ITB, 2015.
- [102] Kopyłow O., *Zastosowanie elewacji wentylowanych na ścianach z płyt warstwowych*, Materiały Budowlane, 2015, (9).
- [103] Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D., *Sztuczne sieci neuronowe, podstawy i zastosowania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994.
- [104] Kozioł M., Hyla I., *Badanie przebiegu zniszczenia zszywanych kompozytów polimer-włókno szklane przy zginaniu za pomocą rejestracji sygnału emisji akustycznej*, Kompozyty, 2005, vol. 5, nr 3, s. 30–34.
- [105] Krampikowska A., *Lokalizacja, identyfikacja uszkodzeń i szacowanie szerokości rys w elementach betonowych metodą emisji akustycznej*, Monografia habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2023.
- [106] Kudela P., Ostachowicz W., *A multilayer delaminated composite beam and plate elements: reflections of Lamb waves at delamination*, Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2009, Vol. 16, s. 174–187.

- [107] Kurdowski W., *Chemia cementu i betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2010.
- [108] Kurzydłowski K., Boczkowska A., Schmidt J., Konopka K., Sychalski W., *Monitorowanie uszkodzeń w kompozytach metodami nieniszczącymi*, Polimery, 2005, vol. 50, nr 4, s. 255–261.
- [109] Lanzon M., Cnudde V., Kock T., Dewanckele J., *X-ray microtomography (μ -CT) to evaluate microstructure of mortars containing low density additions*, Cement and Concrete Composites, 2012, Vol. 34, s. 993–1000.
- [110] Lewicki P., Marzec A., Ranachowski Z., Dębowski T., *Spectral characteristic of acoustic signals emitted by flat rye bread samples*, XLIX Otwarte Seminarium Akustyki 2002, Druk „Sowa”, Warszawa 2002, s. 453–458.
- [111] Li V.C., Stang H., Krenchel H., *Micromechanics of Crack Bridging in Fibre-Reinforced Concrete*, Materials and Structures, 1993, Vol. 26, s. 486–494.
- [112] Li Z., Zhou X., Bin S., *Fiber-Cement extrudates with perlite subjected to high temperatures*, Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, Vol. 16, No. 3, s. 221–229.
- [113] Logoń D., *The application of acoustic emission to diagnose the destruction process in FSD cement composites*, Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences BMC 11 International Symposium on brittle matrix composites, Institute of Fundamental Technological Research, Warsaw 2015, s. 299–308.
- [114] Lu S., Landis E.N., Keane D.T., *X-Ray Microtomographic Studies of Pore Structure and Permeability in Portland Cement Concrete*, Materials and Structures, 2006, Vol. 39, No. 6, s. 611–620.
- [115] Łazarska M., Woźniak T.Z., Ranachowski Z., Trafarski A., Domek G., *Analysis of acoustic emission signals at austempering of steels using neural networks*, Metals and Materials International, 2017, s. 1–8.
- [116] Malecki I., Ranachowski J., *Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowanie*, KBN, Warszawa 1994.
- [117] Malhort V.M., Carin J.N., *Handbook on Non-Destructive Testing of Concrete*, CRC Press, 2004.
- [118] Malinowski P., Wandowski T., Ostachowicz W., *Investigation of sensor placement in Lambwave-based SHM method*, Key Engineering Materials, 2012, Vol. 518, s. 174–183.
- [119] Marzec A., Lewicki P., Ranachowski Z., Dębowski T., *The influence of moisture content on spectral characteristic of acoustic signals emitted by flat bread samples*. Proceedings of the AMAS Course on Nondestructive Testing of Materials and Structures, J. Deputat, Z. Ranachowski (eds.), Centre of Excellence for Advanced Materials and Structures, Warszawa 2002, s. 127–135.

-
- [120] Marzec A., Lewicki P., Ranachowski Z., *Wpływ aktywności wody na właściwości mechaniczne i akustyczne pieczywa chrupkiego pszennego*, Inżynieria Rolnicza, 2002, vol. 5, nr 38, s. 101–108.
- [121] Marzec A., Lewicki P., Ranachowski Z., *Opis emisji akustycznej pieczywa chrupkiego*, Inżynieria Rolnicza, 2006, nr 3, s. 305–312.
- [122] McCann D.M., Forde M.C., *Review of NDT Methods in the Assessment of Concrete and Masonry Structures*, NDT & E International, 2001, Vol. 34, s. 71–84.
- [123] Michell A.J., Freischmidt G., *Effect of Fibre Curl on the Properties of Wood Pulp Fibre Cement and Silica Sheets*, Journal of Materials Science, 1990, Vol. 25, s. 5225–5230.
- [124] Mnahoncakova E., Tesarek P., Padevet P., Cerny R., *Własności kompozytów cementowych wzmacnianych włóknem szklanym po poddaniu ich obciążeniu termicznemu*, Cement Wapno Beton, 2006, nr 4, s. 217–225.
- [125] Mohr B.J., Nanko H., Kurtis K.E., *Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling*, Cement and Concrete Composites, 2005, Vol. 27, s. 435–448.
- [126] Mohr B.J., Biernacki J.J., Kurtis K.E., *Microstructural and chemical effects of wet/dry cycling on pulp fiber–cement composites*, Cement and Concrete Research, 2006, Vol. 36, s. 1240–1251.
- [127] Moliński W., *Zastosowanie emisji akustycznej w badaniach drewna konstrukcyjnego*, IPPT PAN, Warszawa 1995.
- [128] Mytych-Kumańska E., *Ocena stopnia uszkodzenia laminatu epoksydowo-szklanego o oplocie kątowym, poddanego obciążeniom zmiennym z zastosowaniem emisji akustycznej*, Rozprawa doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2007.
- [129] Nakashima Y., Kamiya S., *Mathematica Programs for the Analysis of Three-Dimensional Pore Connectivity and Anisotropic Tortuosity of Porous Rocks Using X-ray Computed Tomography Image Data*, Journal of Nuclear Science and Technology, 2012, Vol. 44, s. 1233–1247.
- [130] Neithalath N., Weiss J., Olek J., *Acoustic performance and damping behavior of cellulose–cement composites*, Cement and Concrete Composites, 2004, Vol. 26, s. 359–370.
- [131] Oh S., Suh B., Noh M., Han S., Kim K., Cho E., Ahn T., Ji Y., *Non-destructive test for the assessment of concrete structure safety applied to full-scale test model*, American Geophysical Union, Fall Meeting, 2009, Vol. 12.
- [132] Ohdaira E., Masuzawa N., *Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete – the possibility of NDE*, Ultrasonics, 2000, Vol. 38, (1–8), s. 546–552.
- [133] Ohtsu M., *The history and development of acoustic emission in concrete engineering*, Magazine of Concrete Research, 1996, Vol. 48, s. 321–330.
- [134] Osowski S., *Sieci neuronowe*, OWPW, Warszawa 1994.
- [135] Ottosen N., Ristinmaa M., Davis A., *Theoretical interpretation of impulse response tests of embedded concrete structures*, Journal Engineering Mechanics, 2004, Vol. 130, No. 9, s. 1062–1071.

- [136] Paćko P., Bielak T., Spencer B., Staszewski W.J., Uhl T., Worden K., *Lamb wave propagation modelling and simulation using parallel processing architecture and graphical cards*, Smart Materials and Structures, 2012, Vol. 21, No. 7.
- [137] Państwowa Inspekcja Pracy, *Azbest. Podręcznik dobrych praktyk*, Warszawa 2010.
- [138] Patent. Polska, nr 225529. K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, *Komora do badań starzeniowych*, WUP 04/17, opubl. 28.04.2017.
- [139] Patent. Polska, nr 227043. T. Dębowski, M. Lewandowski, S. Mackiewicz, Z. Ranachowski, J. Hoła, K. Schabowicz, *Sposób wykrywania delaminacji w płytach włókno-cementowych i urządzenie do wykrywania delaminacji w płytach włókno-cementowych*, opubl. 31.10.2017.
- [140] Patent. Polska, nr 228257. K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, *Komora klimatyczna do pielęgnacji płyt włóknisto-cementowych podczas ich dojrzewania i sposób pielęgnacji płyt włóknisto-cementowych podczas ich dojrzewania*, opubl. 30.03.2018.
- [141] Patent. Polska, nr PL 230070. M. Kaczmarek, R. Drelich, M. Pakuła, D. Witkowski, K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, *Sposób bezkontaktowej kontroli jakości płyt*, opubl. 28.09.2018.
- [142] Patent. Polska, nr PL 229421. M. Kaczmarek, R. Drelich, M. Pakuła, D. Witkowski, K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, *Układ bezkontaktowej kontroli jakości materiałów płytowych w ruchu*, opubl. 31.07.2018.
- [143] Patent. Polska, nr PL 234159. K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, A. Kapelko, *Kompozytowy materiał włóknisto-cementowy z dodatkiem pyłu perlitowego oraz jego zastosowanie*, opubl. 31.01.2020.
- [144] Patent. Polska, nr PL 234161. K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, A. Kapelko, *Kompozytowy materiał włóknisto-cementowy z dodatkiem popiołu lotnego i jego zastosowanie*, opubl. 31.01.2020.
- [145] Patent. Polska, nr PL 234160. K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, A. Kapelko, *Kompozytowy materiał włóknisto-cementowy z dodatkiem proszku kaolinowego i jego zastosowanie*, opubl. 31.01.2020.
- [146] Patent. Polska, nr PL 234158. K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, Kapelko A., *Kompozytowy materiał włóknisto-cementowy z dodatkiem pyłu keramzytowego i jego zastosowanie* opubl. 31.01.2020.
- [147] Pawełek A., Piątkowski A., Jasiński Z., Kudela S., Litwora A., Ranachowski P., Rejmund F., *Emisja akustyczna w materiałach kompozytowych i ceramicznych*, Inżynieria Materiałowa, 2004, nr 5, s. 828–832.
- [148] Pawełek A., *Metoda emisji akustycznej w badaniach plastyczności metali, stopów i kompozytów*, Techniki i Metody, 2014, nr 3.
- [149] Piwakowski B., Ould-Naffa S., Goueygou M., Buyle-Bodin F., *Detection of the Damage in Concrete Cover Using Ultrasound*, Nondestructive Testing of Materials and Structures, Institute of Fundamental Technological Research, Warsaw 2002, s. 173–184.

-
- [150] Pizzol V.D., Mendes L.M., Savastano H., Frías M., Davila F.J., Cincotto M.A., John V.M., Tonoli G.H.D., *Mineralogical and microstructural changes promoted by accelerated carbonation and ageing cycles of hybrid fiber–cement composites*, Construction and Building Materials, 2014, Vol. 68, s. 750–756.
- [151] PN-EN 197 -1. Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [152] PN-EN 492. Płytki włóknisto-cementowe i elementy wyposażenia – Właściwości wyrobu i metody badań.
- [153] PN-EN 494. Profilowane płyty włóknisto-cementowe i elementy wyposażenia. Właściwości wyrobu i metody badań.
- [154] PN-EN 12467. Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań.
- [155] PN EN ISO 12572. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie właściwości związanych z transportem pary wodnej – Metoda naczynia.
- [156] PN-EN 13501-1. Klasyfikacja ogniowa wyrobów budowlanych i elementów budynków. Część 1: Klasyfikacja na podstawie wyników badań reakcji na ogień.
- [157] PN-EN ISO 5267-1. Masy włókniste. Oznaczanie stopnia zmielenia. Część 1: Metoda Schoppera–Rieglera.
- [158] Pogan K., *Analiza emisji akustycznej w procesie destrukcji betonów poddanych obróbce termicznej*, Rozprawa doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1998.
- [159] Polakowski K., Sikora J., Filipowicz S., Hoła J., Schabowicz K., Wójtowicz S., Biernat K., *Wall humidification imaging by ultrasonic tomography*, Przegląd Elektrotechniczny, 2007, nr 83, s. 116–121.
- [160] Popovics S., *Effects of Uneven Moisture Distribution on the Strength of and Wave Velocity in Concrete*, Ultrasonics, 2005, Vol. 43, s. 429–434.
- [161] Przybyliński B., *Recykulacja odpadów produkcji płyt włókno-cementowych*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2010, nr 5, s. 95–96.
- [162] Przybysz P., Kuncewicz C., Rieger F.: *A new device for characterisation of the drainage kinetics of fibrous suspensions under gravity*, Chemical and Process Engineering, 2014, Vol. 35 (4), s. 409–420.
- [163] Raabe J., Bobryk E.: *Zastosowanie zginania trójpunktowego i emisji akustycznej do prognozowania emisji akustycznej ceramiki konstrukcyjnej*, Instytut technologii nieorganicznej, Politechnika warszawska, Warszawa 1992.
- [164] Ranachowski Z.: *Wyznaczanie naprężeń krytycznych w betonie przy pomocy zautomatyzowanych pomiarów metodą emisji akustycznej*, Rozprawa doktorska, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
- [165] Ranachowski Z.: *The application of neural networks to classify the acoustic emission waveforms emitted by the concrete under thermal stress*, Archives of Acoustic, 21, 1996, 89–98.

- [166] Ranachowski Z.: *Pomiary i analiza sygnału emisji akustycznej*, Praca habilitacyjna, Prace IPPT PAN, nr 6, 1998, s. 86.
- [167] Ranachowski P., Ranachowski Z.: *Odporność termomechaniczna tworzywa kordierytowego stabilizowanego mulitem badana metodą emisji akustycznej* Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Konferencje, vol. 75, nr 26, Wrocław, 1999, s. 147-154
- [168] Ranachowski P., Rejmund F., Pawełek A., Piątkowski A.: *Warianty tytułu Badania elektroporcelany rodzaju 130 pod obciążeniem ściskającym metodami akustycznymi i mikroskopowymi*, Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej Nr 38, Konferencje, Nr 13, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2003, s. 31-38.
- [169] Ranachowski P., Rejmund, F., Pawełek A., Piątkowski A., *Structure degradation, texture and acoustic emission in compressed corundum ceramics*, Archives of Metallurgy and Materials, 2008, Vol. 53, s. 703-709.
- [170] Ranachowski Z., Glinicki M.A., Nowowiejski G., *Zastosowanie metody emisji akustycznej do identyfikacji składników betonu przy pomiarach mikrotwardości*, Cement Wapno Beton, 2010, nr 4, s. 202-209.
- [171] Ranachowski Z., *Emisja akustyczna i jej zastosowanie w technice*, Nowa Elektrotechnika, 2010, nr 9, s. 2-5.
- [172] Ranachowski Z., *Emisja akustyczna w badaniach żywności*, 57 Otwarte Seminarium z Akustyki, Warszawa 2010.
- [173] Ranachowski Z., *Emisja akustyczna w diagnostyce obiektów technicznych*, Drogi i Mosty, 2012, nr 2, s. 65-87.
- [174] Ranachowski Z., *Emisja akustyczna w diagnostyce obiektów budowlanych*, Drogi i Mosty, 2012, nr 2, s. 151-173.
- [175] Ranachowski Z., Józwiak-Niedźwiedzka D., Brandt A.M., Dębowski T., *Application of Acoustic Emission Method to Determine Critical Stress in Fibre Reinforced Mortar Beams*, Archives of Acoustics, 2012, Vol. 37, No. 3, s. 261-268.
- [176] Ranachowski Z., Józwiak-Niedźwiedzka D., Ranachowski P., Rejmund F., Dąbrowski M., Kudela S., Dvorak T., *Application of X-Ray Microtomography and Optical Microscopy to Determine the Microstructure of Concrete Penetrated by Carbon Dioxide*, Archives of Metallurgy and Materials, 2014, Vol. 59, s. 1451-1457.
- [177] Ranachowski Z., Schabowicz K., *The contribution of fiber reinforcement system to the overall toughness of cellulose fiber concrete panels*, Construction and Building Materials, 2017, Vol. 156, s. 1028-1034.
- [178] Ranachowski Z., Schabowicz K., *The Fabrication, Testing and Application of Fibre Cement Boards*, Cambridge Scholars Publishing, Newcastle 2018.

-
- [179] Ranachowski Z., Ranachowski P., Dębowski T., Gorzelańczyk T., Schabowicz K., *Investigation of structural degradation of fiber cement boards due to thermal impact*, Materials, 2019, Vol. 12, No. 6, s. 1–14.
- [180] Rose J.L., *Ultrasonic waves in solid media*, Cambridge University Press, Cambridge 1999.
- [181] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. Nr 75, poz. 690.
- [182] Sansalone M., Strett W., *Impact-echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, Ithaca 1997.
- [183] Sasmal S., Avinash G., *Investigations on Mechanical Performance of Cementitious Composites Micro-Engineered with Poly Vinyl Alcohol Fibers*, Construction and Building Materials, 2016, Vol. 128, s. 136–147.
- [184] Satyanarayana K.G., Arizaga G.G.C., Wypych F., *Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers an overview*, Prog. Polym. Sci., 2009, Vol. 34, s. 982–1021.
- [185] Savastano H., Warden P.G., Coutts R.S.P., *Ground blast-furnace slag as a matrix for cellulose cement materials*, Cement and Concrete Composites, 2001, Vol. 23, s. 389–397.
- [186] Savastano H., Warden P.G., Coutts R.S.P., *Microstructure and mechanical properties of waste fibre-cement composites*, Cement and Concrete Composites, 2005, Vol. 27, s. 583–592.
- [187] Sawicki J., *Płyty włóknocementowe w budownictwie*, Izolacje, 2007, nr 10, s. 68, 69.
- [188] Schabowicz K., *Nieniszcząca identyfikacja wytrzymałości na ściskanie betonu z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Budownictwa, Wrocław 2003.
- [189] Schabowicz K., *Neural networks in the NDT identification of the strength of concrete*, Archives of Civil Engineering, 2005, No. 51, s. 371–382.
- [190] Schabowicz K., *Rozwiązania elewacyjne stosowane w modernizowanych obiektach*, Izolacje, 2018, R. 23, nr 1, s. 56–66.
- [191] Schabowicz K., Gorzelańczyk T., *Opracowanie procesu technologicznego produkcji płyt włóknisto-cementowych*, Raporty Inst. Bud. Politechniki Wrocławskiej, 2013, Ser. SPR, Nr 11.
- [192] Schabowicz K., Gorzelańczyk T., *Płyty włókno-cementowe jako okładziny wewnętrzne*, Izolacje, 2015, nr 5, s. 42–44.
- [193] Schabowicz K., Szymków M., *Elewacje wentylowane z płyt włóknisto-cementowych w ujęciu prawnym*, Izolacje, 2015, nr 9, s. 60–64.
- [194] Schabowicz K., Gorzelańczyk T., *A nondestructive methodology for the testing of fibre cement boards by means of a non-contact ultrasound scanner*, Construction and Building Materials, 2016, Vol. 102, s. 200–207.

- [195] Schabowicz K., Szymków M., *Elewacje wentylowane z płyt włóknisto-cementowych*, Materiały Budowlane, 2016, nr 4, s. 112–114.
- [196] Schabowicz K., Ranachowski Z., Józwiak-Niedźwiedzka D., Radzik Ł., Kudela S., Dvorak T., *Application of X-ray microtomography to quality assessment of fibre cement boards*, Construction and Building Materials, 2016, Vol. 110, s. 182–188.
- [197] Schabowicz K., Szymków M., *Elewacje wentylowane z płyt włóknisto-cementowych na podkonstrukcji aluminiowej*, Materiały Budowlane, 2016, nr 9, s. 28–30.
- [198] Schabowicz K., Matuszewski M., Nierösel B., Schlößer D., *Nieniszczące badania struktury materiałów włóknisto-cementowych z użyciem tomografii komputerowej*, Badania Nieniszczące i Diagnostyka, 2017, nr 3, s. 3–5.
- [199] Schabowicz K., Szymków M., *Elewacje wentylowane z płyt włóknisto-cementowych na podkonstrukcji drewnianej*, Materiały Budowlane, 2017, nr 4, s. 36–38.
- [200] Schabowicz K., Gorzelańczyk T., Szymków M., *Współczesne systemy elewacji wentylowanych – rodzaje i wymagania*, Izolacje, 2017, nr 7/8, s. 74–83.
- [201] Schabowicz K., Gorzelańczyk T., Szymków M., *Elewacje wentylowane*, Architektura Murator, 2017, nr 6, suppl. Fasady, s. 36–53.
- [202] Schabowicz K., Juraszek J., Roskosz M., Piczak A., Jurasz Z., Sterniuk A., *Badania starzeniowe płyt włóknisto-cementowych z użyciem komory starzeniowej*, Przegląd Spawalnictwa, 2017, vol. 89, nr 11, s. 34–36.
- [203] Schabowicz K., Szymków M., *Elewacje wentylowane na podkonstrukcji drewnianej*, Izolacje, 2017, nr 10, s. 68–72.
- [204] Schabowicz K., Gorzelańczyk T., Budzisz R., Roskosz M., Juraszek J., *Nieniszczące badania struktury materiałów włóknisto-cementowych z użyciem mikroskopii optycznej stosowanej w metalografii*, Badania Nieniszczące i Diagnostyka, 2017, nr 4, s. 17–21.
- [205] Schabowicz K., Józwiak-Niedźwiedzka D., Ranachowski Z., Kudela S. Jr., Dvorak T., *Microstructural characterization of cellulose fibres in reinforced cement boards*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, Vol. 18, No. 4, s. 1068–1078.
- [206] Schabowicz K., *Elewacje wentylowane: technologia produkcji i metody badania płyt włóknisto-cementowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2018.
- [207] Schabowicz K., Gorzelańczyk T., Szymków M., *Identification of the degree of degradation of fibre-cement boards exposed to fire by means of the acoustic emission method and artificial neural networks*, Materials, 2019, Vol. 12, No. 4, s. 1–17.
- [208] Schabowicz K., Gorzelańczyk T., Szymków M., *Identification of the degree of fibre-cement boards degradation under the influence of high temperature*, Automation in Construction, 2019, Vol. 101, s. 190–198.

- [209] Schabowicz K., Sulik P., Gorzelańczyk T., Zawislak Ł., *Numerical analysis of storey to storey fire spreading*, Archives of Civil Engineering, 2022, Vol. 68, No. 1, s. 91–109.
- [210] Schabowicz K., Sulik P., Gorzelańczyk T., Zawislak Ł., *Assessment of the destruction of a fibre cement board subjected to fire in a large-scale study*, Materials, 2022, Vol. 15, No. 8, s. 1–13.
- [211] Schumacher T., *New Acoustic emission applications in civil engineering*, PhD, Portland State University, Portland 2010.
- [212] Shaoa Y., Qiu J., Shahb S.P., *Microstructure of extruded cement-bonded fiberboard*, Cement and Concrete Research, 2001, Vol. 31, s. 1153–1161.
- [213] Silva F. A., Melo Filho J. A., Toledo Filho R. D., Fairbairn E.M.R.: *Mechanical behavior and durability of compression moulded sisal fiber-cement mortar laminates* (SFCML), Proc. 1st International RILEM Symposium on Textile Reinforced Concrete, 2006, s. 171–180.
- [214] Sławiński S (red.), *Technika impulsowa*, Praca zbiorowa, WNT, Warszawa 1973.
- [215] Śliwiński A., *Ultradźwięki i ich zastosowanie*, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2001.
- [216] Smith R.A., Nelson L.J., *Automated analysis and automated defect characterization from ultrasonic scans of composites*, J. Br. Inst. NDT, 2009, Vol. 51, s. 82–87.
- [217] Soroushian P., Malikunte S., *Long-term durability and moisture sensitivity of cellulose fiber-reinforced cement composites*, R.N. Swamy (Ed.), Fibre-Reinforced Cement and Concrete, E&FN Spon, London 1992, s. 1166–1184.
- [218] Stawiski B., *Ultradźwiękowe badania betonów i zapraw głowicami punktowymi*, Monografie Nr 39, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
- [219] Studziński J., *Fabryka betonu „Eternit” ul. Firlejowska 32*, Lublin 1995.
- [220] Su Z., Ye L., *Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications*, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, 2009.
- [221] Szymków M., *Nieniszcząca identyfikacja procesu destrukcji płyt włóknisto-cementowych pod wpływem działania wybranych czynników eksploatacyjnych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2018.
- [222] Świt G., *Metoda emisji akustycznej w analizie uszkodzeń konstrukcji betonowych wstępnie sprężonych*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej „Monografie, Studia, Rozprawy” M8/2008, s. 159.
- [223] Świt G., *Analiza procesów destrukcyjnych w obiektach mostowych z belek strunobetonowych z wykorzystaniem zjawiska emisji akustycznej*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Monografie, Studia, Rozprawy, M21/2011, s. 174.
- [224] Świt G., Krampikowska A., Schabowicz K., *Wstępna analiza możliwości wykorzystania metody emisji akustycznej w ocenie trwałości konstrukcji betonowych*, Przegląd Spawalnictwa, 2014, vol. 86, nr 10, s. 31–36.

- [225] Świt G., Krampikowska A., Schabowicz K., *Zastosowanie metody emisji akustycznej do lokalizacji uszkodzeń w zbiorniku na produkty ropopochodne*, Przegląd Spawalnictwa, 2015, vol. 87, nr 12, s. 50–54.
- [226] Tadeusiewicz R., *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa 1993.
- [227] Tolêdo Filho R.D., Scrivener K., England G.L., Ghavami K., *Durability of alkalisensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites*, Cement and Concrete Composites, 2000, Vol. 22, s. 127–143.
- [228] Tonoli G.H.D., Santos S.F., Savastano H., Delvasto S., Mejía de Gutiérrez R., Lopez de Murphy M.D.M., *Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre*, Cement and Concrete Composites, 2011, Vol. 33, s. 225–232.
- [229] Ustawa z dnia 19 czerwca 1997 r. o zakazie stosowania wyrobów zawierających azbest, Dz. U. z 2004 r. Nr 3, poz. 20 z późn. zm.
- [230] Vistap M. Karbhari, „*Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites. Techniques and applications*”, Woodhead Publishing, 2013.
- [231] Wambua P., Ivens J., Verpoest I., *Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics*, Composites Science and Technology, 2003, Vol. 63, s. 1259–1264.
- [232] Wandowski T., Kudela P., Malinowski P., Ostachowicz W., *Lamb waves for damage localization in panels*, Strain, 2011, Vol. 45, s. 449–457.
- [233] Woźniak T.Z., Ranachowski Z., Ranachowski P., Ozgowicz W., Trafarski A., *The application of neural networks for studying phase transformation by the method of acoustic emission in bearing steel*, Archives of Metallurgy and Materials, 2014, vol. 59, s. 1705–1712.
- [234] Wytyczne EOTA ETAG 004 – Złożone systemy izolacji cieplnej z wyprawami tynkarskimi. *External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering*.
- [235] Wytyczne EOTA ETAG 034 – Zestawy do wykonywania okładzin ścian zewnętrznych.
- [236] Xie X., Zhou Z., Jiang M., Xu X., Wang Z., Hui D., *Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties*, Composites Part B, 2015, Vol. 78, s. 153–161.
- [237] Yashiro S., Takatsubo J., Toyama N., *An NDT technique for composite structures using visualized Lamb-wave propagation*, Composites Science Technology, 2007, Vol. 67, s. 3202–3208.
- [238] Yuki H., Homma K., *Analysis of Artificial Acoustic Emission Waveforms Using a Neural Network*, Journal of Acoustic Emission, 1991, Vol. 10, s. 35–41.
- [239] Zarządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 12 marca 1996 r. w sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia, wydzielanych przez materiały budowlane, urządzenia i elementy wyposażenia w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi, M.P. 1996 Nr 19, poz. 231.

-
- [240] Zawisław Ł., *Identyfikacja modelu zniszczenia elewacji wentylowanej z okładziną z płyt włóknisto-cementowych pod wpływem oddziaływania pożaru*, Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2023.
- [241] Zhou X., Li Z., *Light-weight wood–magnesium oxychloride cement composite building products made by extrusion*, Construction and Building Materials, 2012, Vol. 27, s. 382–389.
- [242] Zimdars D., Valdmanis J.A., White J.S., Stuk G., Williamson S., Winfree W.P., Madaras E.I., *Technology and applications of terahertz imaging non-destructive examination: Inspection of space shuttle sprayed on foam insulation*, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, 2005, Vol. 24, s. 570–577.
- [243] Żolek N., Ranachowski Z., Ranachowski P., Józwiak-Niedźwiedzka D., Kúdela S., Dvorak T., *Statistical assessment of the microstructure of barite aggregate from different deposits using x-ray microtomography and optical microscopy*, Archives of Metallurgy and Materials, 2017, Vol. 62, s. 697–702.

Assessment of the influence of selected operating factors on the structure and destruction process of fiber-cement composites

This monograph is the culmination of the author's previous scientific research, based on literature analysis, supported by his own research in various research teams, and his personal experience in assessing the impact of operational factors on the structure and deterioration of fiber-cement composites. The operational factors considered in the monograph included cyclic freezing and thawing, UV radiation (aging studies), high temperatures of 230 degrees Celsius, and fire exposure. The monograph guides the reader through the history of fiber-cement boards and their entire production process, which is enriched by his own photographic documentation. Importantly, the author co-authored the implemented technological process for producing fiber-cement boards using "flow-on" technology. Subsequently, the author actively participated in the process of launching board production and conducted extensive laboratory testing. This experience and thorough analysis of the available literature allowed the author to formulate the main objectives of the monograph and to achieve the intended scope of this original compilation of his own research. Non-destructive methods were used in the testing of fiber-cement boards, including acoustic emission combined with artificial neural networks, optical methods using a scanning electron microscope (SEM), nanoindentation, and a non-contact ultrasonic scanner. The primary and achieved goal of this monograph was to develop a method that would allow for a reliable assessment of the impact of the above-mentioned operational factors on the deterioration process and changes in the structure of fiber-cement boards on a multi-scale basis. The work resulted in the successful development of a proprietary method for comprehensively assessing the impact of selected operational factors on the deterioration process and structure of fiber-cement boards on a multi-scale basis. This undoubtedly represents a significant scientific achievement for the author, culminating in many years of work in this field.

Keywords: fiber-cement composites, destruction process, operating factors, acoustic methods, SEM, artificial neural networks

W monografii przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na strukturę i proces destrukcji kompozytów włóknisto-cementowych. Badania obejmowały wpływ cyklicznego zamrażania-rozmrażania, oddziaływania procesów starzeniowych (promieniowania UV), wysokiej temperatury oraz oddziaływania pożarem. Autor zapoznaje Czytelnika z historią technologii produkcji płyt włóknisto-cementowych i całym procesem ich powstawania w technologii „flow-on”. Opisane techniki badawcze, w tym metody nieniszczące, takie jak metoda emisji akustycznej w połączeniu ze sztucznymi sieciami neuronowymi, metoda optyczna SEM oraz metoda nanoindentacji umożliwiły opracowanie autorskiej metody kompleksowej oceny wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na proces niszczenia i strukturę płyt włóknisto-cementowych w ujęciu wieloskalowym. Monografia stanowi uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy w obszarze trwałości kompozytów włóknisto-cementowych oraz dostarcza istotnych danych dotyczących ich zachowania w warunkach eksploatacyjnych.

Książka jest przeznaczona dla inżynierów budownictwa, projektantów, producentów wyrobów włóknisto-cementowych oraz specjalistów zajmujących się oceną trwałości materiałów budowlanych.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w sprzedaży wysyłkowej:
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-8134-006-9