

Waldemar Moliński

ZASTOSOWANIE EMISJI AKUSTYCZNEJ
W BADANIACH DREWNA KONSTRUKCYJNEGO

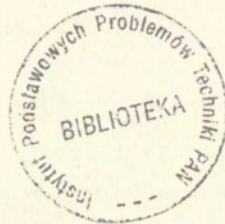
24/1995

P. 269



WARSZAWA 1995

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 11 lipca 1995 r.



56585



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 150 egz. Ark. wyd. 1,5 Ark. druk. 2,0
Oddano do drukarni w sierpniu 1995 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul. Jasna 1

Waldemar Moliński
Katedra Nauki o Drewnie
Akademia Rolnicza w Poznaniu

ZASTOSOWANIE EMISJI AKUSTYCZNEJ W BADANIACH DREWNA KONSTRUKCYJNEGO

Streszczenie

W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania metody EA w badaniach procesu pęknięcia drewna w wyniku działania naprężeń mechanicznych i własnych naprężeń wilgotnościowych. Celem więc niniejszej pracy było określenie jakościowych i w miarę możliwości ilościowych związków pomiędzy parametrami EA a procesami destrukcyjnymi zachodzącymi w naprężonym drewnie.

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń wykazały, niezależnie od rodzaju działającego naprężenia, przydatność metody EA do pomiaru akumulacji defektów w drewnie. Zważywszy jednak na specyfikę tego naturalnego biopolimeru, możliwość przewidywania czasu życia poszczególnych elementów konstrukcyjnych i całej konstrukcji drewnianych na podstawie pomiarów parametrów EA wymaga dalszych badań.

WSTĘP

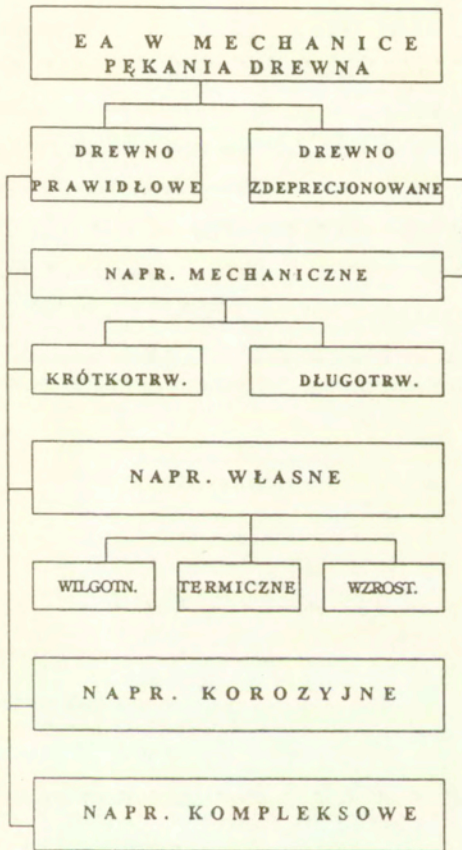
Materiały rzeczywiste, w tym również drewno wykazują znacznie niższą wytrzymałość mechaniczną aniżeli wynika to z obliczeń teoretycznych, a ponadto charakteryzują się dużą dyspersją właściwości mechanicznych. Bezpośrednią przyczyną tego stanu rzeczy są niedoskonałości lub niejednorodności strukturalne różnej skali, które z punktu widzenia mechaniki zniszczenia traktować można jako zbiór pęknięć o różnych wartościach naprężeń krytycznych. Stan lokalnych naprężeń wg. teorii Griffitha charakteryzuje tzw. współczynnik intensywności naprężeń (K_I) [7]. W momencie gdy wielkość tego współczynnika osiągnie wartość krytyczną (K_{IC}) następuje gwałtowne rozprzestrzenianie się pęknięcia. Jeżeli rozwój pęknięcia przyczyni się do rozładowania naprężeń na jego krawędzi - pęknięcie zostaje powstrzymane. W określonych warunkach możliwy jest również rozwój pęknięć podkrytycznych tzn. takich w których $K_I < K_{IC}$. Warunkiem sprzyjającym temu mechanizmowi jest szeroko pojęta korozja materiału.

Charakter procesu zniszczenia zależy nie tylko od wielkości i rozkładu defektów strukturalnych, ale również od stanu fizycznego materiału i warunków naprężania. W badaniach więc mechanizmów zniszczenia materiałów wydają się mieć szczególne zastosowanie te metody, które pozwalają otrzymywać informacje o procesie jego destrukcji bezpośrednio od źródła, czyli z miejsc powstawania i rozprzestrzeniania się różnego rodzaju defektów. Jedną z takich metod jest właśnie metoda emisji akustycznej (EA). Obecnie metoda ta uważana jest za jedną z najbardziej perspektywicznych metod badania procesów niszczenia. Już obecnie jest ona stosowana z powodzeniem do wykrywania, lokalizacji i oceny stopnia zdefektowania struktury pod naprężeniem eksploatacyjnym elementów silników spalinowych, reaktorów jądrowych, zbiorników wysokociśnieniowych, korpusów raket, części samolotowych i innych niemniej odpowiedzialnych konstrukcji technicznych [12].

Pomiary EA w drewnie zapoczątkowano już w latach 60-tych. Jednakże dopiero w latach 80-tych zarysował się wyraźny postęp w wykorzystaniu tej metody w badaniach procesu pęknięcia drewna.

Defekty struktury materiału w aspekcie zastosowań EA powinny być aktywne, co zwykle wymaga naprężenia materiału. W mechanice pęknięcia drewna ze względu na jego

osobliwości wchodzą w rachubę następujące rodzaje naprężeń, które mogą generować emisję akustyczną (rys. 1).



Rys. 1. Rodzaje naprężeń, które mogą generować emisję akustyczną w drewnie

Za jeden z głównych celów zastosowania metody EA w badaniach właściwości mechanicznych drewna uznać można przewidywanie momentu jego zniszczenia. Na podstawie bowiem obciążenia odpowiadającego pojawieniu się progowej EA (powyżej ma miejsce intensywny wzrost liczby sygnałów akustycznych) możliwe jest prognozowanie z dużą dokładnością siły niszczącej [27; 33]. Emisja akustyczna stwarza także możliwość detekcji

lokalnych uszkodzeń w strukturze drewna i ich akumulacji w warunkach długotrwałe działających naprężeń [5, 18, 19, 21]. Pomiar emisji dźwięków umożliwia wykrycie bardzo wczesnych stadiów destrukcji biologicznej drewna, niemożliwych do określenia przy użyciu innych konwencjonalnych metod za wyjątkiem metod mikroskopowych, które są wszakże pracochłonne i nie zawsze możliwe do zastosowania [1; 22; 23; 24]. Właściwości mechaniczne drewna ulegają - jak wiadomo pod działaniem rozkładu grzybowego obniżeniu znacznie wcześniej aniżeli zgnilizna staje się zauważalna w warunkach terenowych. Przeto potencjalne możliwości zastosowania EA do detekcji i oceny rozkładu drewna w konstrukcjach budowlanych są obiecujące. W tym aspekcie można również wspomnieć o udanych eksperymentach nad lokalizacją miejsc żerowania technicznych szkodników drewna, a zwłaszcza termitów [6; 26] i świrdra okrętowego [2].

Osiągnięcia w zakresie stosowania emisji akustycznych w mechanice pękania umożliwiają przejście do detekcji i oceny uszkodzeń struktury drewna w warunkach jego powstawania i użytkowania. Próbę klasyfikacji obszarów praktycznych zastosowań EA przedstawiono na rys. 2. Zwrócić należy zwłaszcza uwagę na udane eksperymenty nad



Rys. 2. Obszary praktycznych zastosowań EA w kontroli i ocenie jakości drewna i wyrobów drewnopochodnych

wykorzystaniem EA do kontroli, a nawet sterowania niektórymi operacjami technologicznymi. Jako przykład może posłużyć próba wdrożenia metody EA do kontroli i sterowania procesem sztucznego suszenia drewna [25, 28]. Zaawansowane są prace zmierzające do opracowania systemu automatycznej regulacji parametrów mechanicznej obróbki drewna [10, 11; 20, 35]. Metodę EA wdraża się również do oceny jakości sortowanej tarcicy konstrukcyjnej i wielkowymiarowych elementów klejonych [27; 38,40; 41]. Przeprowadzono udane doświadczenia jakościowego sortowania sklejki w warunkach przemysłowych [8; 36, 37]. Metodę EA można też wykorzystać do optymalizacji parametrów technologicznych zaklejania połączeń palczastych [31] i określania właściwości: spoin klejowych [39]. Osiągnięcia w tym zakresie stwarzają możliwość wykorzystania metody EA do oceny stopnia zużycia całych konstrukcji drewnianych i ich elementów [34]. Warto też w tym kontekście przypomnieć, że w górnictwie od dawna korzystano z tzw. ostrzegawczych właściwości drewna w obudowie górniczej. Między momentem bowiem wystąpienia siły krytycznej, sygnalizowanym przez głośnie trzaski pękającego drewna a złamaniem stojaków upływa pewien czas, którym dysponują ludzie na opuszczenie zagrożonego wyrobiska. Gdy zaczęto wprowadzać stalowe obudowy, górnicy w wielu kopalniach protestowali w obawie o „ciche” zniszczenie stalowej obudowy.

Badania nad EA w drzewnictwie są prowadzone ze szczególną aktywnością w Japonii, USA i w Niemczech. W Polsce zaś takie badania na szerszą skalę prowadzi już od 6-let Katedra Nauki o Drewnie AR w Poznaniu w oparciu o krajową aparaturę, wyprodukowaną przez IPPT PAN w Warszawie o nazwie detektor emisji akustycznych EA-3, a obecnie zmodyfikowaną jego wersję detektor emisji akustycznych EA-100, która jest przystosowana do współpracy z komputerem typu IBM PC. Badania te są realizowane we współpracy z IPPT PAN w Warszawie, Katedrą Fizyki AR w Poznaniu i Uniwersytetem Technicznym w Zvolenu na Słowacji. Źródłem finansowania badań jest grant KBN i grant UE w ramach projektu COST 508 „Mechanika drewna”

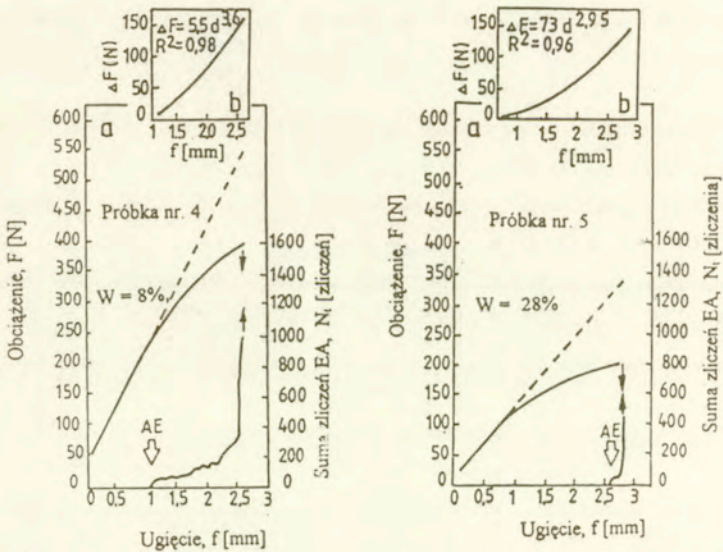
Bibliografia nt EA w drzewnictwie obejmuje obecnie w skali światowej ponad 150 pozycji, z czego prawie 1/2 przypada na prace autorów Japońskich. Wspomniana bibliografia obejmuje kilkanaście opracowań prezentujących wyniki badań wykonanych w Akademii Rolniczej w Poznaniu. W niniejszym opracowaniu zdecydowano się przedstawić tylko niektóre wyniki badań własnych nad aktywnością akustyczną drewna generowaną naprężeniami mechanicznymi i wilgotnościowymi (desorpcyjnymi i adsorpcyjnymi).

WYNIKI BADAŃ

Emisja akustyczna w drewnie aktywowana naprężeniami mechanicznymi

Podstawowym problemem w zakresie badań nad wytrzymałością drewna jest opracowanie podstaw naukowych przewidywania momentu jego zniszczenia pod długotrwałym obciążeniem eksploatacyjnym. Główną przyczyną obniżenia się wytrzymałości elementów konstrukcyjnych jest akumulacja pęknięć. Istnieją przeto podstawy do przypuszczeń, że metoda EA, pozwalająca śledzić powstawanie i wzrost tego typu defektów strukturalnych, może stać się źródłem danych niezbędnych przy określeniu niezawodności konstrukcji drewnianych.

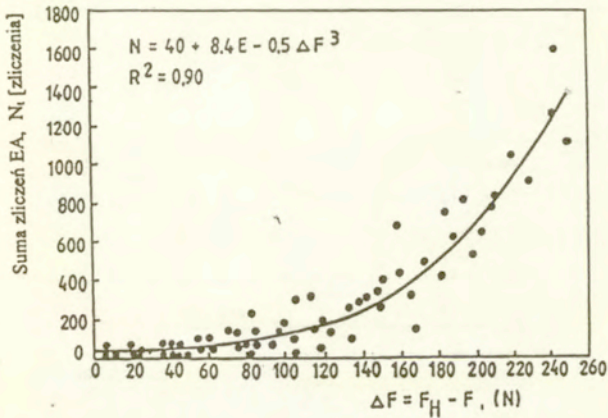
Przeprowadzone pomiary EA w próbie trójpunktowego zginania drewna buka w kierunku promieniowym przedstawione na rys. 3 wykazały, że w wypadku drewna suchego sygnały EA generowane są praktycznie w momencie, gdy wartość naprężeń zginających osiąga poziom naprężeń na granicy proporcjonalności. W wypadku zaś drewna mokrego - tuż przed



Rys. 3. Przykładowe krzywe obciążenie-ugięcie drewna buka zginanego w poprzek włókien i typowe przebiegi sumy zliczeń EA (a) oraz narastanie nieliniowości (b) [16]

jego zniszczeniu. Przedstawione na tym rysunku charakterystyki mechaniczne wskazują, że mechanizm powstawania nieliniowości w przebiegu krzywych obciążenie-odkształcenie

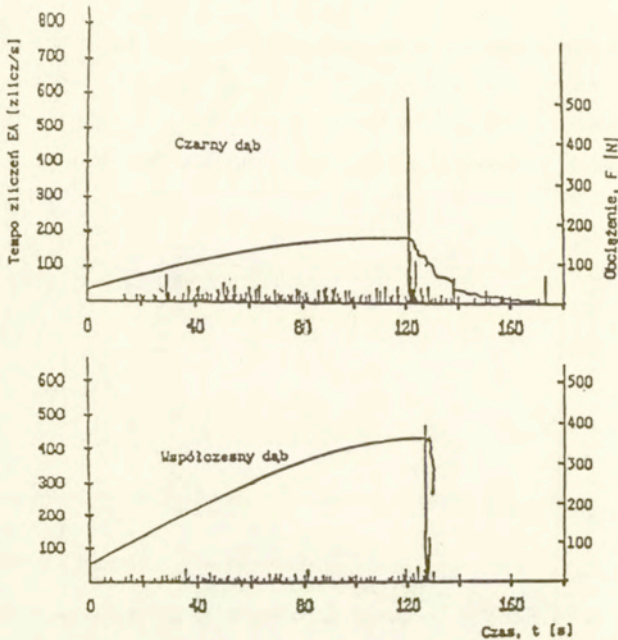
drewna zależy od jego wilgotności. W przypadku drewna suchego podstawową przyczyną nieliniowości są procesy destrukcji (pęknięcia). Można tak przyjąć, ponieważ pomiędzy parametrem nieliniowości (ΔF) a sumą zliczeń sygnałów EA istnieje ścisły związek, co zobrazowano na rys. 4. W drewnie zaś mokrym, ze względu na wzmożone w porównaniu z



Rys. 4. Zależność sumy zliczeń (N) sygnałów EA generowanych podczas zginania drewna buka (drewno suche) w poprzek włókien od parametru nieliniowości (ΔF) jego charakterystyki mechanicznej [16]

drewnem suchym procesy reologiczne, rozkład naprężeń wewnętrznych jest bardziej wyrównany co oznacza, że defekty, które w stanie suchym ujawniały się jako krytyczne, w wyniku uplastycznienia drewna zostały przegrupowane do grupy podkrytycznych. Stopniowo zaś rozwój pęknięć podkrytycznych generuje sygnały EA o stosunkowo niskiej amplitudzie. Przy względnie wysokim poziomie dyskryminacji, zastosowanym w pomiarach EA, związanym z koniecznością eliminacji sygnałów pochodzących od urządzenia probierczego nie były one rejestrowane. Dopiero naprężenie zbliżone do naprężenia niszczącego wyzwalalo intensywną emisję sygnałów EA, charakterystyczną dla pęknięcia drewna.

W wypadku drewna o większej niejednorodności strukturalnej np. dębu, EA generowana jest już przy bardzo niskim poziomie naprężeń zewnętrznych, co obrazuje rys. 5.



Rys. 5. Typowe przebiegi tempa zliczeń sygnałów EA zarejestrowanych podczas zginania w poprzek włókien czarnego i współczesnego drewna dębu [9]

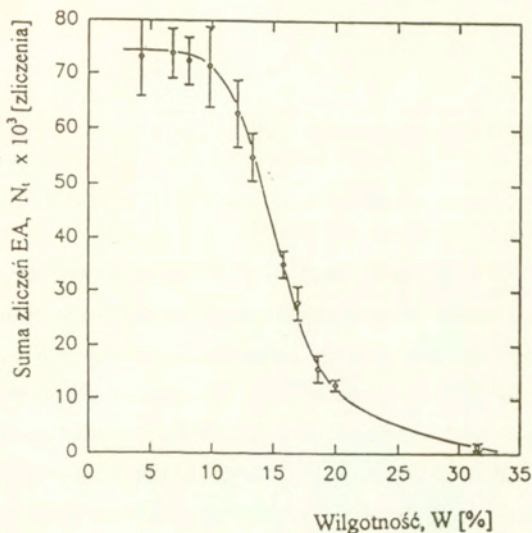
Na rysunku tym przedstawiono proces zginania w poprzek włókien mokrego drewna i towarzyszącą temu procesowi emisję akustyczną. Z rysunku tego wynika, że powstała w drewnie dębu czarnego w czasie ok. 2500 lat deprecjacja tkanki drzewnej dodatkowo przyczynia się do zmiany funkcji rozkładu defektów strukturalnych, co wyraźnie odzwierciedla się wzrostem aktywności akustycznej. Analiza wartości liczbowych wytrzymałości na zginanie w poprzek włókien czarnego i współczesnego drewna dębu oraz generowanej w tych próbach emisji akustycznej pozwala na sformułowanie następującej zależności:

$$R_g / R_g^* = \Sigma EA^* / \Sigma EA \cong 0.40 \div 0.44$$

- gdzie: R_g - wytrzymałość na zginanie drewna dębu współczesnego
 R_g^* - wytrzymałość na zginanie drewna czarnego dębu
 ΣEA - suma zliczeń sygnałów EA do momentu zniszczenia próbki drewna dębu współczesnego
 ΣEA^* - suma zliczeń sygnałów EA do momentu zniszczenia próbki drewna czarnego dębu

Powyższa relacja wskazuje na możliwość wykorzystania metody EA do oceny stopnia biotycznej i abiotycznej deprecjacji struktury drewna.

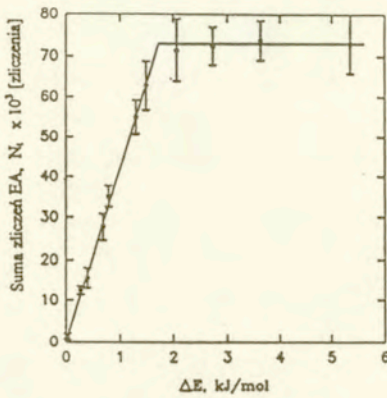
Wpływ wilgotności i stanu termodynamicznego wody zawartej w drewnie na przebieg zjawisk emisji akustycznej, generowanej podczas jego destrukcji mechanicznej, przedstawiono na rys. 6. Rysunek ten przedstawia przebieg zmian liczby zliczeń (N_t) sygnałów EA



Rys. 6. Suma zliczeń sygnałów EA (N_t) zarejestrowana podczas rozluźniania próbek drewna sosny o wymiarach 20(T) x 20(R) x 30(L) mm w funkcji ich wilgotności [30]

zarejestrowany podczas rozluźniania próbek drewna sosny w funkcji ich wilgotności. Przedstawiona zależność jest podobna do zależności wytrzymałości drewna od jego wilgotności. Obserwowany przy wzroście wilgotności drewna spadek wartości jego mechanicznych parametrów jest interpretowany jako efekt plastyfikującego działania wody, obniżającego średnią energię interakcji wielkocząsteczkowych składników substancji drzewnej.

Z zależności całkowitej liczby zliczeń sygnałów EA od energii wiązania wody ΔE przedstawionej na rys. 7 wynika, że wzrost energii wiązania od 0 do 175 kJ/mol, następujący



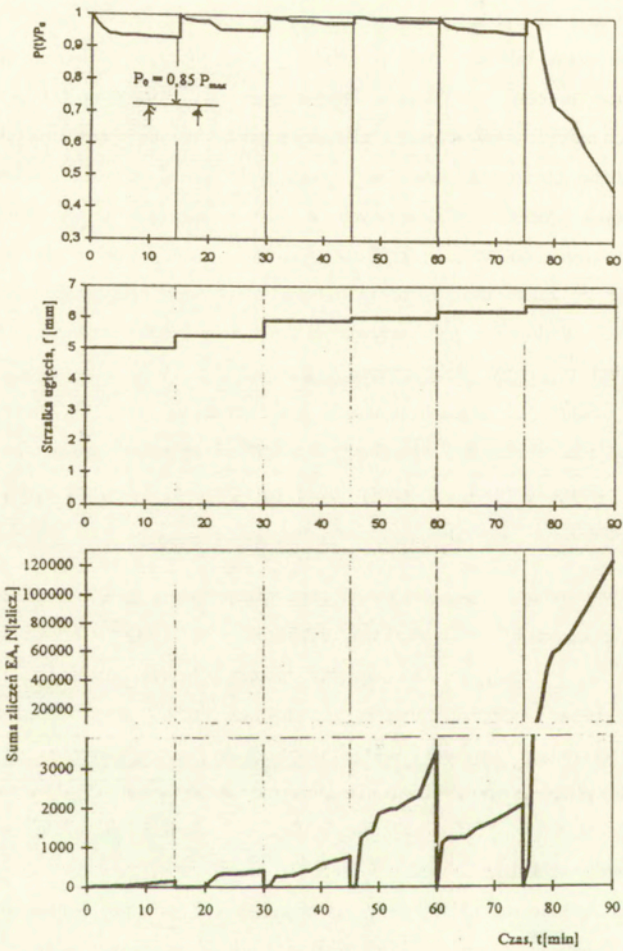
Rys. 7. Zależność całkowitej liczby zliczeń sygnałów EA od energii wiązania wody (ΔE) [30]

w miarę zmniejszania się wilgotności próbek, powoduje ściśle liniowy wzrost aktywności akustycznej pękającego drewna. Po przekroczeniu energii wiązania wody równej 1.75 kJ/mol sumaryczna liczba sygnałów emisji akustycznej towarzyszącej niszczeniu drewna praktycznie przestaje się zmieniać. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w narzuconych warunkach ustalania się równowagi higroskopijnej energia równa 1.75 kJ/mol odpowiada wilgotności drewna równej 11%. Jest to stan hydratacji, przy którym jeden mol cząsteczek sorpcyjnie związanej wody przypada na jeden mol ogniw celulozy ($18/163=0.11$). Uzyskane zatem wyniki sugerują, że oddziaływanie wody, obniżające kruchość drewna, a więc plastyfikujące ten materiał, przejawia się wówczas, gdy na jedno ogniwo polimeru przypada więcej niż jedna cząsteczka wody sorpcyjnie związanej. Molekularna istota tego zjawiska jest jednak trudna do wyjaśnienia na obecnym etapie badań. Można jednak przypuszczać, że wyraźny spadek kruchości drewna, obserwowany przy wilgotności powyżej 11%, jest spowodowany zwiększeniem się szybkości procesów relaksacji naprężeń w materiale. Przy wzroście wilgotności drewna możliwa jest więc zmiana funkcji rozkładu defektów strukturalnych z krytycznych w podkrytyczne.

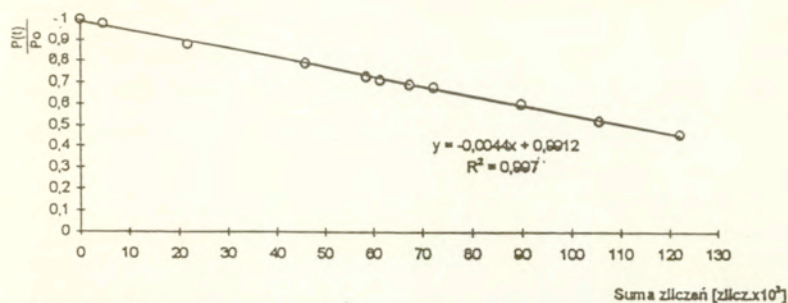
Procesy reologiczne zachodzące w drewnie w zakresie nieliniowej lepkości są nie tylko funkcją czasu, ale również funkcją działającego naprężenia. W takim wypadku pełzanie, bądź relaksacja naprężeń stanowią wypadkową pomiędzy postępującym w czasie dopasowywaniem się molekularnej struktury badanego materiału do nowych warunków równowagowych i postępującą jego destrukcją [32]. W drewnie, kompleksowym materiale

wielkocząsteczkowym, procesy czysto reologiczne przejawiają się na skutek reorientacji określonych grup funkcyjnych, w pierwszej kolejności w najbardziej osłabionych i maksymalnie naprzężonych miejscach struktury. Można zatem założyć, że w początkowym okresie pełzania lub relaksacji naprężeń mają miejsce jednostkowe procesy reologiczne o najkrótszym czasie relaksacji bądź retardacji. W tym to czasie obserwuje się intensywnie przebiegające procesy reologiczne. Jednocześnie, w procesie pełzania dochodzi do redystrybucji naprężeń, a w wypadku relaksacji naprężeń ma miejsce zmiana obszarów reakcji na zewnętrzne obciążenie. Jeżeli w wyniku tych zjawisk dojdzie do wyczerpania się jednostkowych procesów relaksacyjnych, a wartość naprężeń w określonych miejscach struktury wzrośnie do wartości krytycznej, zostanie zainicjowany proces jego destrukcji. Spodziewać się zatem można, że w okresie intensywnie przejawiających się procesów reologicznych w drewnie, jego aktywność akustyczna będzie nieznaczna. Osłabienie zaś intensywności procesów reologicznych, pociągające za sobą koncentrację naprężeń w obszarach o dłuższych czasach relaksacji przyczyniać się może do wzrostu aktywności akustycznej. Inaczej mówiąc, warunkiem koniecznym do zainicjowania i rozwoju procesu kruchego pęknięcia drewna jest koncentracja naprężeń w obszarach słabo bądź wogóle nierelaksujących.

Potwierdzeniem słuszności powyższego rozumowania są wyniki oznaczeń relaksacji naprężeń zginających, w warunkach cyklicznego dociążania do wartości naprężeń początkowych, wynoszących 0.85 naprężeń niszczących (rys. 8). Na rysunku tym, obok krzywych relaksacji naprężeń, zamieszczono również przebiegi sumy zliczeń sygnałów EA i przyrosty odkształceń w trakcie kolejnych dociążeń do poziomu naprężeń początkowych. W pierwszych cyklach procesu relaksacji ma miejsce wyczerpywanie się czysto reologicznego zachowania się drewna (intensywność relaksacji zmniejsza się w kolejnych cyklach). Jednocześnie, w kolejnych cyklach tego procesu zarejestrowano wzrost aktywności akustycznej ugiętej próbki. Dyskretny zaś charakter EA świadczy o narastającym procesie destrukcji. Gdyby w kolejnych cyklach relaksacji nie ujawniała się EA, to stopień relaksacji naprężeń byłby mniejszy. W ostatnim, 6-tym cyklu, spadek naprężeń spowodowany był wyłącznie procesem pęknięcia badanej próbki. Świadczy o tym zależność obrazująca związek pomiędzy spadkiem naprężenia a sumą zliczeń sygnałów EA, zarejestrowaną w tym cyklu (rys. 9). Zależność między sumą zliczeń sygnałów EA a spadkiem naprężeń ma charakter



Rys. 8. Przebieg relaksacji naprężeń zginających przyrostu odkształceń oraz sumy zliczeń sygnałów EA podczas cyklicznego dociążania do poziomu naprężeń początkowych próbki drewna sosny o wymiarach 5(T) x 10(R) x 150(L) mm



Rys. 9. Zależność sumy zliczeń sygnałów EA od spadku naprężeń w 6-tym cyklu relaksacji naprężeń zginających

prostoliniowy i odznacza się bardzo wysokim współczynnikiem korelacji. Uwzględniając tę zależność oraz biorąc pod uwagę fakt, że średnia energia dla 100 kolejnych zdarzeń EA jest praktycznie taka sama [25], można z przebiegu sumy zliczeń sygnałów EA wydzielić udziały spadku naprężeń w poszczególnych cyklach relaksacji spowodowane destrukcją tkanki drzewnej i czystymi zjawiskami reologicznymi.

W tabeli 1 zestawiono wartości sumy zliczeń sygnałów EA, stopień relaksacji naprężeń zarejestrowany na końcu każdego cyklu oraz obliczone na podstawie zależności przedstawionej na rysunku 8 udziały w tym procesie destrukcji badanej próbki. Z danych zawartych w tej tabeli wynika (pomijając ostatni cykl relaksacji), że aktywność akustyczna drewna jest tym większa im w mniejszym stopniu przebiegają procesy reologiczne, w tym wypadku im z mniejszą intensywnością przebiegają procesy relaksacyjne.

Wyniki przeprowadzonego doświadczenia wskazują na możliwość wykorzystania metody EA do pomiaru akumulacji defektów w naprężonych elementach drewnianych. Możliwość jednakże przewidywania czasu życia poszczególnych elementów i całych konstrukcji drewnianych wymaga dalszych badań.

Emisja akustyczna w drewnie aktywowana naprężeniami wilgotnościowymi

Bezpośrednią przyczyną emisji akustycznej emitowanej z drewna w procesie zmian jego wilgotności są własne naprężenia wilgotnościowe, wywołane gradientem wilgotności suszonej bądź nawilżanej bryły drewna. Zjawisko to ma miejsce wtedy, gdy występuje nieswobodne kurczenie się lub pęcznienie tkanki drzewnej [np. 13; 14; 15]. Źródła sygnałów

akustycznych zlokalizowane są zawsze, niezależnie od kierunku zmian wilgotności w strefie naprężeń rozciągających, odpowiedzialnych za wilgotnościowe pękanie drewna [14]. W początkowym okresie działania naprężeń wilgotnościowych, sygnały EA pochodzą bezpośrednio od istniejących defektów i nieciągłości strukturalnych zapoczątkowujących proces mikro- i makropęknięć tkanki drzewnej [np. 28; 42].

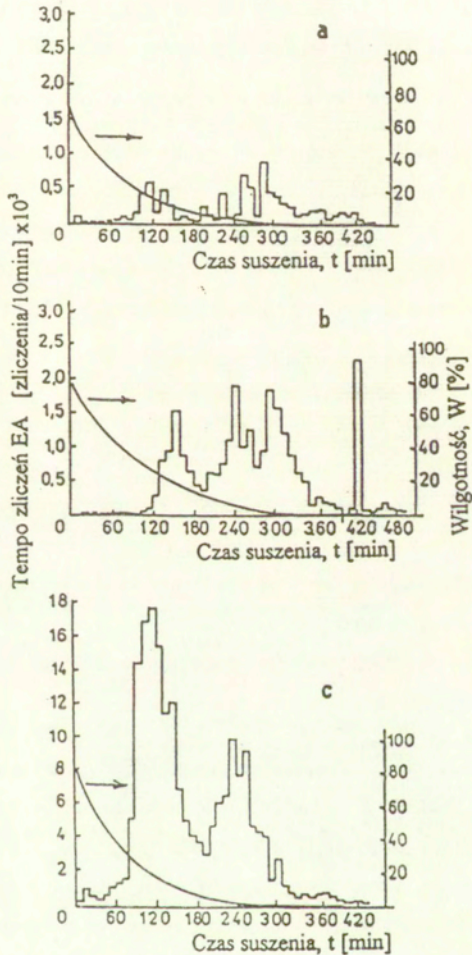
Tabela 1

Udział procesów destrukcji w relaksacji naprężeń w drewnie sosny poddanym zginaniu siłą $0.85 P_{max}$ w warunkach cyklicznej relaksacji naprężeń

Mierzony parametr	Nr cyklu relaksacji					
	I	II	III	IV	V	VI
Suma zliczeń N [zliczenia] w każdym cyklu	148	402	766	3386	2088	122366
Spadek obciążenia na końcu cyklu P_{15} / P_0	0.0716	0.0455	0.0195	0.0162	0.0455	0.539
Oblicz. spadek obciążenia spowodowany destrukcją P_{15} / P_0	0.0006	0.0018	0.0034	0.0149	0.0092	1.00
Udział procentowy destrukcji w danym cyklu relaksacji [%]	0.91	3.96	17.44	91.9	20.2	100

Obciążenia desorpcyjne

Aktywność akustyczną drewna podczas jego desorpcyjnego pęknięcia przedstawiono przykładowo na rys. 10. Dane na tym rysunku obrazują przebiegi tempa zliczeń sygnałów EA i zmian wilgotności próbek napięciowego (rys. 10a i 10b - o zawartości włókien galaretowatych odpowiednio 90 i 70%) oraz drewna opozycyjnego buka podczas ich suszenia w suszarce laboratoryjnej w temperaturze $80^{\circ}C$. Drewno napięciowe jest odmianą drewna reakcyjnego liściastych gatunków drzew, występujące po rozciąganej stronie pochylonych pni lub gałęzi. Drewno opozycyjne zaś tworzy się po przeciwległej stronie pnia. Z rysunku tego wynika, że w wypadku suszenia drewna do niskich wilgotności ($W_k = 1\%$) w spektrogramie tempa zliczeń sygnałów EA pojawiają się niezależnie od rodzaju tkanki



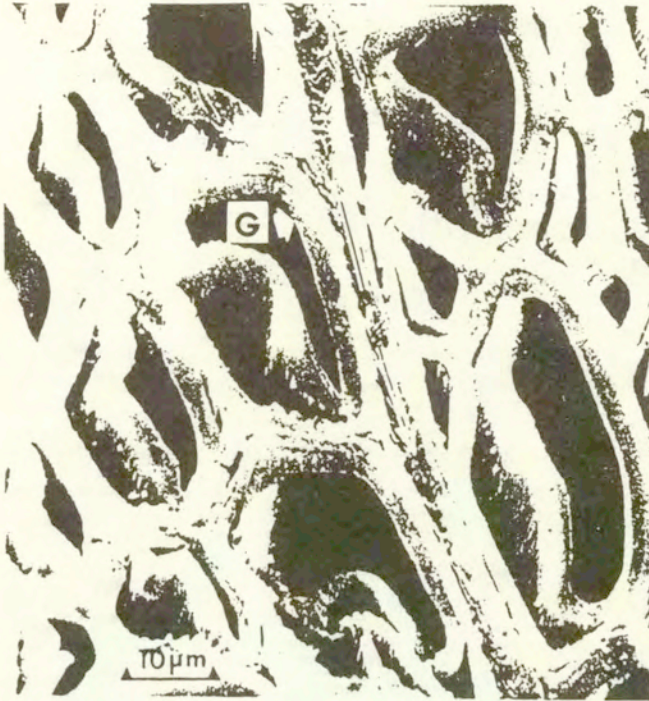
Rys. 10. Aktywność akustyczna i zmiana wilgotności próbek napięciowego (a i b - o zawartości włókien galaretowatych odpowiednio 90 i 70 %) oraz próbek opozycyjnego drewna buka (c) podczas ich suszenia w temperaturze 80° C [4]

drzewnej dwa maksima. Pierwsze z nich odpowiada maksymalnej prędkości tworzenia się pęknięć zewnętrznych. Drugie maksimum tempa zliczeń EA odzwierciedla wewnętrzne pęknięcia desorpcyjne. Powstawanie pęknięć wewnętrznych w suszonych bryłach drewna ma miejsce wówczas, gdy pęknięcia zewnętrzne ulegną zamknięciu (na skutek zmiany znaku naprężeń) i w strefie wewnętrznej suszonego drewna naprężenia rozciągające osiągną wartość krytyczną [np. 15].

Drugie istotne spostrzeżenie, jakie wynika z danych przedstawionych na tym rysunku, to obniżenie się aktywności akustycznej drewna w miarę wzrostu udziału włókien napięciowych w tkance reakcyjnej. Związane jest to z obecnością w tkance tensyjnej tzw. pokładu galaretowatego „G”. Pokład ten jest stosunkowo luźno związany z głębiej położonymi pokładami ściany komórkowej i ma odmienną budowę aniżeli pokłady S_1 i S_2 (rys. 11).

Zróznicowanie procesu pęknięcia tkanki napięciowej i opozycyjnej uwidoczniło na rys. 12. Zamieszczone na tym rysunku fotografie z mikroskopu skaningowego przekroju poprzecznego próbek opozycyjnego (rys. 12.2 i 12.3) oraz tensyjnego (napięciowego) (rys. 12.4 i 12.7) drewna buka wyraźnie uwidaczniają różnicę w spękaniu obu rodzajów tkanek. W wypadku drewna opozycyjnego, pęknięcia desorpcyjne tworzą się głównie na skutek delaminacji tzn. odrywania się ścian sąsiednich komórek (tor pęknięcia przebiega przez blaszkę środkową). Na początku strefy przyrostów rocznych, gdzie grubość ścian włókien drzewnych jest stosunkowo niewielka, pęknięcia rozwijają się również poprzez rozrywanie ścian komórkowych (rys. 12.3).

W wypadku tkanki napięciowej sygnały EA generowane są przede wszystkim odrywaniem się pokładu „G” od głębiej położonych pokładów wtórnej ściany komórkowej. Ponieważ powiązanie pokładu „G” z pokładem S jest słabe, stąd też generowana EA jest niewielka. Proces odrywania pokładu galaretowatego „G” od pozostałych pokładów ściany komórkowej wynika ze znacznych różnic w kurczeniu się tych pokładów. W pokładzie „G” układ mikrofibryl jest praktycznie równoległy do osi komórki. Stąd znaczne jego poprzeczne kurczenie się. Sąsiadujący zaś z nim pokład np. S_2 w dużym stopniu inkrustowany ligniną, posiada mikrofibryle zorientowane w stosunku do podłużnej osi komórki pod kątem ok. 20° .

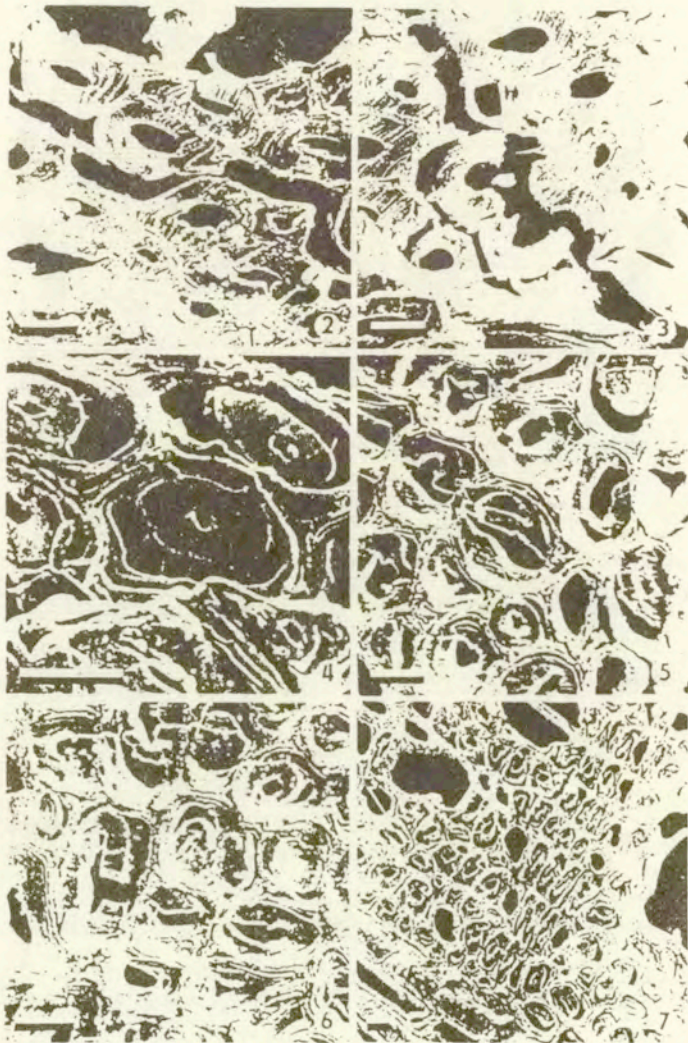


Rys. 11. Włókna napięciowe. Wyraźnie widoczny pokład „G” częściowo oderwany od głębiej leżących pokładów ściany komórkowej [3]

Kurczenie się tego pokładu ściany komórkowej w kierunku poprzecznym w porównaniu z pokładem „G” jest znacznie mniejsze

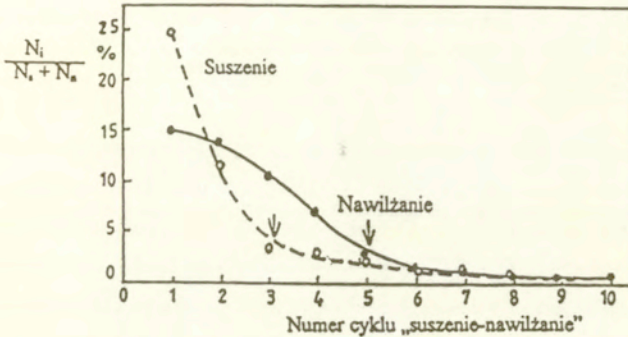
W drewnie napięciowym można również zauważyć pęknięcia rozwijane na skutek delaminacji, szczególnie w pobliżu granicy przyrostów rocznych (rys. 12.7). Nadto obecność elastycznego pokładu „G” we włóknach drzewnych zmniejsza prawdopodobieństwo kruchych pęknięć

Interesujące wyniki pomiarów EA uzyskano w próbie cyklicznego suszenia i nawilżania drewna w wodzie. Rezultaty tych doświadczeń, przeprowadzonych na próbkach drewna buka, przedstawiono na rys. 13. Prezentowane dane ujawniają, że najwięcej EA generowanych jest



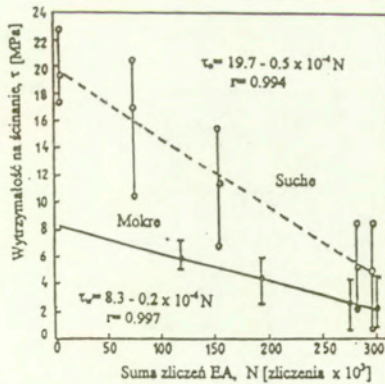
RYS. 12 Pęknięcia desorpcyjne (źródła EA) w próbkach opozycyjnego (fot. 2 i 3) oraz tensyjnego drewna buka (fot. 4 do 7) [4]

podczas pierwszego suszenia i nawilżania drewna. W kolejnych cyklach zmian wilgotności drewna liczba rejestrowanych sygnałów EA zmniejsza się. Badane próbki wykazały wyraźnie malejącą aktywność akustyczną do 3 cyklu suszenia i 5 cyklu nawilżania. W ostatnich cyklach zmian wilgotności drewna emisja akustyczna praktycznie zanika.



Rys. 13. Wpływ liczby cykli zmian wilgotności drewna na sumę zliczeń EA rejestrowaną podczas suszenia i nawilżania w wodzie próbek drewna buka, odniesioną do całkowitej sumy EA zarejestrowanej po 10 cyklach zmian wilgotności [17]

Wyniki oznaczeń wytrzymałości drewna na ścinanie w płaszczyźnie promieniowej, w funkcji całkowitej liczby zarejestrowanych zliczeń sygnałów EA po upływie określonych cykli suszenia i nawilżania przedstawia rys. 14. Zobrazowane na tym rysunku dane wykazują, że wytrzymałość drewna na ścinanie w płaszczyźnie głównych torów pęknięć wilgotnościowych (LR), zarówno w suchym jak i mokrym stanie maleje proporcjonalnie do całkowitej liczby



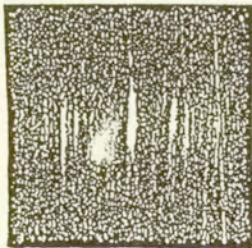
Rys. 14. Zależność między sumą zliczeń sygnałów EA, zarejestrowaną w trakcie cyklicznego suszenia i nawilżania próbek drewna buka w wodzie, a wytrzymałością na ścinanie wzdłuż włókien w płaszczyźnie promieniowej (LR) w stanie zupełnie suchym i mokrym [17]

zliczeń EA, zarejestrowanej we wszystkich uprzednich cyklach suszenia i nawilżania badanych próbek. Wysoki współczynnik korelacji przedstawionej zależności świadczyć może o tym, że spadek wytrzymałości drewna, w miarę wzrostu liczby cykli zmian wilgotności, spowodowany jest głównie postępującą redukcją rzeczywistej powierzchni ścinania. Zmniejszanie się rzeczywistej powierzchni ścinania badanych próbek wynika z rozwoju pęknięć wilgotnościowych, których miernikiem jest liczba zarejestrowanych zliczeń sygnałów EA.

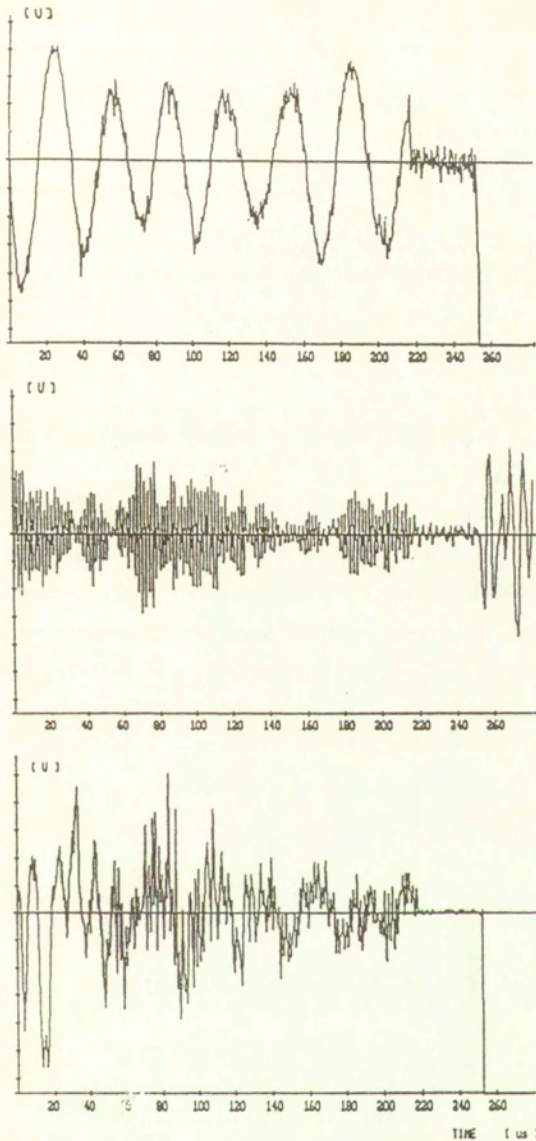
Obciążenia adsorpcyjne

W porównaniu z pęknięciami desorpcyjnymi, pęknięcia adsorpcyjne, a więc powstające podczas nawilżania drewna są mniej poznane. Świadomość tego, że drewno pęka również podczas nawilżania nie jest tak powszechna jak świadomość pęknięcia drewna podczas suszenia. W literaturze znaleźć można wzmiankę pewnego niemieckiego leśnika, który znalazł się w lesie świerkowym podczas ulewnego deszczu (spadłego po długim okresie suszy) i był zaskoczony głośnym trzaskiem pęczniejących gałęzek.

Pęknięcia w nawilżanym drewnie powstają, podobnie jak w wypadku suszenia w strefie działania naprężeń rozciągających. Tworzą się one w suchej, wewnętrznej partii nawilżanego drewna. Naprężenia rozciągające w wewnętrznych strefach nawilżanego drewna są wynikiem interakcji pomiędzy już pęczniejącymi zewnętrznymi warstwami nawilżanej bryły drewna, a jeszcze suchymi partiami wewnętrznymi. Tory pęknięć adsorpcyjnych są analogiczne jak pęknięć desorpcyjnych, tzn. przebiegają przede wszystkim w płaszczyźnie promieniowej drewna. Uwidacznia to rentgenogram (rys. 15), wykonany po 40 minutach nawilżania próbki



Rys. 15. Adsorpcyjne pęknięcia drewna sosny [14]



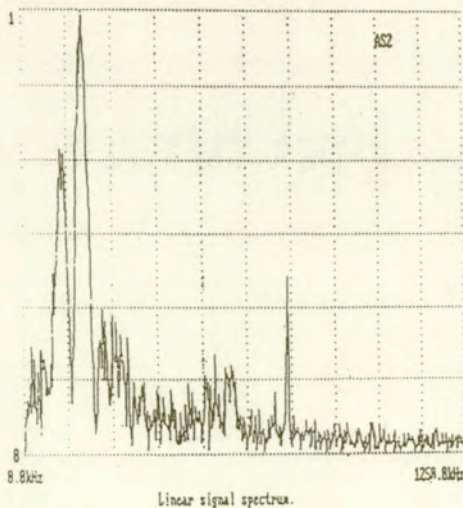
Rys 16 Typowe przebiegi czasowe fal naprężeniowych zarejestrowane w procesie nawilżania zupełnie suchych próbek drewna sosny o wymiarach 30(T) x 30(R) x 10(L) mm w wodzie

drewna sosny o wymiarach 50x50x50 mm. Podobieństwo pęknięć adsorpcyjnych i pęknięć desorpcyjnych daje podstawy do przypuszczeń, że widma fal naprężeniowych, generowanych tymi procesami będą również podobne.

Typowe widma przebiegów czasowych fal naprężeniowych zarejestrowanych w procesie nawilżania próbek drewna sosny w wodzie przedstawia rys. 16. Z rysunku tego wynika, że w procesie adsorpcyjnego pęknięcia drewna generowane są fale o zróżnicowanej częstotliwości. Prezentowane na tym rysunku fale naprężeniowe przedstawiają kolejno:

- * falę o niskiej częstotliwości,
- * falę o bardzo wysokiej częstotliwości,
- * główną falę nośną o stosunkowo niskiej częstotliwości, na którą nakładają się fale o częstotliwości wysokiej.

Analizę częstotliwościową całego spektrum emitowanych fal w procesie adsorpcyjnego pęknięcia drewna przedstawia rys. 17. Na rysunku tym widać przynajmniej 5 dominujących częstotliwości fal naprężeniowych. W literaturze już istnieją uzasadnione przesłanki o możliwości przyporządkowania pewnych dominujących częstotliwości generowanych fal naprężeniowych do konkretnych zjawisk związanych z powstawaniem pęknięć. Ponieważ są to wyniki dopiero wstępnych badań, pełna ich interpretacja nie jest jeszcze możliwa. Potrzebne są



Rys. 17. Charakterystyka częstotliwościowa fal naprężeniowych generowanych procesem adsorpcyjnego pęknięcia drewna sosny

dalsze doświadczenia, które wymuszałyby jeden dominujący proces pękania drewna np. poprzez delaminację lub poprzez rozrywanie ścian komórkowych.

ZAKOŃCZENIE

Na zakończenie można wyrazić opinię, że spodziewany postęp w zakresie ustalania ilościowych związków pomiędzy parametrami EA a parametrami mechanicznymi i fraktograficznymi, jakie można odczytać z powierzchni lub profilu pęknięć w drewnie przyczyni się do spójnego przejścia od mechaniki pękania do diagnostyki uszkodzeń (defektów) w drzewie i wyrobach z drewna. Ponieważ ten obszar badań drewna odznacza się wysoką ekspansją, przeto można oczekiwać, że wraz z dalszym postępowaniem badań nad EA w drewnie i tworzywach drzewnych zwiększą się znane i pojawiają się nowe możliwości zastosowania EA do oceny i kontroli jakości materiałów i wyrobów z drewna.

LITERATURA

1. Beall, F.C., Wilcox, W.W.: Relationship of acoustic emission during radial compression to mass loss decay. *Forest Prod. J.*, 1987 37(4):345-350
2. Beall, F.C.: Acoustic emission and acoustic-ultrasonic characteristics. W: Schniewind, A.P. (Ed.): *Concise encyclopedia of wood and wood-based materials*. Pergamon Press. Oxford et al. 1989:1-4
3. Core, H.A., Cote, W.A., Day, A.C.: *Wood structure and identification*. Syracuse Wood Science Series 6, Syracuse Univ. Press 1977
4. Cunderlik, I., Moliński, W., Raczkowski, J.: The monitoring of drying checks in the tension and opposite beech wood by acoustic emission and scanning electron microscopy methods. *Holzforschung*, 1995 (w druku)
5. DeBaise, G. R., Porrtter, A.W., Pentoney, R.E.: Morphology and mechanics of wood fracture. *Material Research and Standards*, 1966 6(10):493-499
6. Fujii, Y., Noguchi, M., Imamura, Y., Tokoro, M.: Using acoustic emission monitoring to detect termite activity in wood. *Forest. Prod. J.*, 1990 40(1):34-36
7. Gordon, J.: *Structures, or why things don't fall down*. Penguin Books, Hamondsworth 1978
8. Ishibashi, M., Sato, K., Fushitani, M.: Acoustic emission inspecting of poor bonding in production line of plywood factory. *Progress in Acoustic Emission V. Proc. of 10 Int. AE Symp. The Japanese Soc. for NDI. Sendai, Japan Oct. 22-25, 1990:174-1800*
9. Kokociński, W., Moliński, W.: Detekcja zmian strukturalnych w drewnie czarnego dębu metodą emisji akustycznych. *Roczniki AR - Poznań*, 1995 (w druku)
10. Lemaster, R.L., Dornfeld, D.A.: Monitoring the wood cutting process with acoustic emission. *Proc. 2nd Int. Conf. of Acoustic Emission, Las Vegas* 1985
11. Lemaster, R.L., Tee, L.B., Dornfeld, D.A.: Monitoring tool wear during wood machining with acoustic emission. *Wear* 1985 101(3):273-282
12. Malecki, I.: Rozwój historyczny badań emisji akustycznej. W: *Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowania*. Praca zbiorowa pod Red. Malecki, I. i Ranachowski, J.: Wyd. Pascal, Warszawa 1994 s.9-18
13. Moliński, W., Raczkowski, J., Suchorski, P.: Effect of initial moisture content on acoustic emission in wood during its swelling under mechanical restraint. *Drev. Vyskum* 1991 130:1-9

14. Moliński W., Raczkowski, J., Poliszko, S., Ranachowski, Z.: Mechanism of acoustic emission in wood soaked in water. *Holzforschung* 1991 45(1):13-17
15. Moliński, W., Raczkowski, J., Suchorski, P. : Zależność między emisją akustyczną i zahamowanym kurczeniem się drewna podczas suszenia. *Folia Forest. Polonica* 1992 Seria B (23)65-73
16. Moliński, W., Raczkowski, J., Poliszko, S.: Acoustic activity of wood during across to-the-grain bending. *Folia Forest. Polonica* 1995 Seria B (25):65-72
17. Moliński, W., Raczkowski, J., Poliszko, S.: Cracks accumulation in wood under cyclic changes of its moisture content estimated by acoustic emission method. *Proc. COST 508 Wood Mechanics "Service Life Assessment of Wooden structures"* Espoo, Finland, May 18-19 1994
18. Moliński, W., Raczkowski, J., Poliszko, S.: Acoustic activity in bending creep of wood (praca niepublik.)
19. Morgner, W., Niemz, P., Theis, K.: Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Bruch- und Kriechvorgängen in Werkstoffen aus Holz. *Holztechnologie* 1980 21(2):77-82
20. Murase, Y., Ike, K., Mori, M.: Acoustic emission monitoring of wood cutting. I. Detection of tool wear by AE signals. *Mokuzai Gakk.*, 1988 34(2):207-213
21. Niemz, P., Wagner, M., Theis, K.: Stand und Möglichkeiten der anwendung der Schallemissionsanalyse in der Holzforschung. *Holztechnologie* 1983 24(2):91-95
22. Noguchi, M., Nishimoto, K.: Detection of western hemlock in very early stages of decay using acoustic emission. *Proc. 2nd int. Conf. of Acoustic Emission, Las Vegas* 1985
23. Noguchi, M., Fujii, Y., Imamura, Y.: Use of acoustic emission in the detection of incipient stages of decay in western hemlock wood. *Acoustic Letters* 1985 9(6):79-89
24. Noguchi, M., Nishimoto, K., Imamura, Y., Fujii, Y., Okumura, S., Miyachi, T.: Detection of very early stages of decay in western hemlock wood using acoustic emissions. *Forest Prod. J.*, 1986 36(4):35-36
25. Noguchi, M., Kitayama, S., Satoyoshi, K., Umetsu, J.: Feedback control for drying *Zelkova serrata* using in-process acoustic emission monitoring. *Forest Prod. J.*, 1987 37(1):28-34

26. Naguchi, M., Fujii, Y., Owada, M., Imamura, Y., Tokoro, M., Tooya, R.: AE monitoring to detect termite attack on wood of commercial dimension and posts. *Forest Prod. J.*, 1991 41(9):32-36
27. Ohya, S., Kitayama, S., Kawaguchi, M.: The effect of veneer quality on the bending strength of laminated wood. *Mokuzai Gakk.*, 1989 35(10):905-911
28. Okumura, S., Kawamoto, S., Mori, T., Noguchi, M.: Acoustic emission during drying of Japanese oak (*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*). *Bull. Kyoto Univ. For.*, 1986 No 57:300-307
29. Okumura, S., Kiyotaki, T., Noguchi, M.: A few experiments on acoustic emissions during wood drying. *Bull. Kyoto Univ. For.*, 1987 No 59:283-291
30. Poliszko, S., Moliński, W., Raczkowski, J.: Relationship between water binding energy in wood and its mechanical strength determined by acoustic emission method. *Proc. COST 508 Wood Mechanics "Service Life Assessment of Wooden Structures"*. Espoo, Finland, May 18-19. 1994
31. Porter, A.W., El-Osta, M.L., Kusec, D.J.: Prediction of failure of finger joints using acoustic emissions. *Forest Prod. J.*, 1972 22(9):74-82
32. Raczkowski, J.: Der Einfluss von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechverhalten des Holzes. *Holz als Roh- und Werkst.*, 1969 27(6):232-237
33. Raczkowski, J., Cegiela, J.: Determination of wood tension strength perpendicular to the grain in radial compression test. *Proc. IUFRO Div. 5 Conference. Nancy 1992* vol. I pp. 322-323
34. Raczkowski, J., Moliński, W., Ranachowski, Z.: Emisja akustyczna w drzewnictwie. *Prace IPPT PAN 1992* z.27:1-58
35. Sadanari, M., Kitayama, S., Hattori, N., Segawa, K.: Relationship between chip formations and acoustic emissions during the rectilinear cutting of wood. *Mokuzai Gakk.*, 1991 37(5):424-433
36. Sato, K., Fushitani, M.: Application of acoustic emission to stress grading of timber. *Progress in Acoustic Emission IV. Proc. of 5th Inter. Acoustic Emission Symp. The Japanese Soc. for Non-Destr. Inspection. Kobe, Nov. 14-17, 1988* p. 657-663
37. Sato, K., Yamaguchi, K., Ando, N., Fushitani, M.: Detection of poor bond in plywood utilizing acoustic emission technique. *Proc. of 12th World Conf. on Non-Destr. Testing. Amsterdam, April 23-28, W: Boogaard, J., Van Dijk, G.M. (Ed's): Non-Destructive Testing. Elsevier Sci. Publ., Amsterdam 1989* p. 1627-1629

38. Sato, K., Takeuchi, H., Yamaguchi, K., Ando, N., Fushitani, M.: Lumber stress grading utilizing the acoustic emission technique. *J. Acoustic Emission* 1990 9(3):209-213
39. Suzuki, M., Schniewind, A.P.: Relationship between fracture toughness and acoustic emission during cleavage failure in adhesive joints. *Wood Sci. and Technol.*, 1987 231(2):121-130
40. Takeuchi, H., Sato, K., Fushitani, M., Yamaguchi, K., Ando, N: Application of acoustic emission to stress grading of timber. II. Detection of knots and cros grain. *Proc. of 7th National Acoustic Emission Conf.*, Shizuoka, Japan 1989 p. 95-99
41. Takeuchi, H., Sato, K., Yamaguchi, K., Ando, N., Fushitani, M.: Application of acoustic emission to stress grading of timber. III. Evaluation using MOE and AE. *Progress in Acoustic Emission V. Proc. of 10th Int. AE Symp.* Senadi, Japan Oct. 22-25, 1990. The Japanese Soc. for NDI p. 160-166
42. Wassipaul, F., Vanek, M., Mayerhofer, A.: Klima und Sachallemissionen bei der Holztrocknung. *Holzforsch. und Holzverwert.* 1986 38(4):73-79



56585