FOLIA FORESTALIA POLONICA
Seria B, zeszyt 23, 1992

ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY EMISJĄ AKUSTYCZNĄ I ZAHAMOWANYM KURCZENIEM SIĘ DREWNA PODCZAS SUSZENIA

Waldemar Moliński, Jan Raczkowski, Paweł Suchorski

Katedra Nauki o Drewnie Akademii Rolniczej w Poznaniu

W pracy przedstawiono wyniki badań nad emisją aktustyczną (EA) wzbudzaną podczas suszenia próbek drewna sosny o różnej długości i wilgotności początkowej zbliżonej do punktu nasycenia włókien. Maksymalna gęstość zliczeń EA jest skorelowana z maksymalną wielkością zahamowanego kurczenia się, co następuje, gdy naprężenia desorpcyjne są najwyższe.

WSTĘP

Dla prawidłowego przebiegu procesu suszenia ważna jest ocena aktualnego stanu naprężeniowego suszonego drewna i możliwość natychmiastowej reakcji na niekorzystne zmiany owego stanu, poprzez korektę parametrów klimatu w suszarni. Miarą stanu naprężeniowego suszonego drewna mogą być, między innymi, różnice odkształceń desorpcyjnych, ponieważ drewno w postaci większych brył nie wysycha równomiernie i nie kurczy się swobodnie [np. 19 - 21]. Dotychczasowe próby nad ciągłą kontrolą stanu naprężeniowego suszonego drewna na podstawie tzw. różnicowych odkształceń desorpcyjnych są zachęcające, lecz kłopotliwe w realizacji [21]. Bardziej obiecujące wydają się natomiast próby zastosowania emisji akustycznej (EA) do ciągłego śledzenia tworzenia się i rozwoju pęknięć w suszonym drewnie [3, 5, 6, 9 - 11, 13, 23]. Wzbudzanie bowiem EA podczas suszenia drewna jest wynikiem powstawania i propagacji mikropęknięć, będących skutkiem lokalnego występowania naprężeń desorpcyjnych o wartości przekraczającej wytrzymałość tkanki drzewnej na rozciąganie w poprzek włókien. Towarzyszące tym pęknięciom EA mogą być wykorzystane jako sygnał ostrzegawczy przed zbliżającym się pojawieniem się makropęknięć.

Dotychczasowe próby formułowania związków między parametrami emisji akustycznej a wielkościami określającymi stan suszonego drewna mają na razie jedynie charakter jakościowy i dążą przede wszystkim do rozpoznania wpływu różnych czynników procesu suszenia na charakter zjawisk akustycznych [np. 1, 8, 15]. Na uwagę zasługują w szczególności te badania, które zmierzają do ustalenia zależności między EA i naprężeniami desorpcyjnymi w suszonym drewnie [12]. Dotychczas nie udało się ustalić zależności, która mogłaby powiązać parametry emisji akustycznej w suszonym drewnie z parametrami określającymi stan naprężeniowy drewna w dowolnej chwili procesu jego suszenia [4, 14]. Mając na względzie wzmiankowane okoliczności oraz zakładając, że naprężenia desorpcyjne mogą być wyrażone poprzez wartość zahamowanego kurczenia się suszonego drewna, postanowiono podjąć próbę określenia zależności między wartością zahamowanego kurczenia się suszonego drewna i dogodnym do interpretacji parametrem emisji akustycznej, jakim jest gęstość zliczeń EA.

METODYKA

Badania przeprowadzono na próbkach drewna sosny (*Pinus sylvestris* L.) o wymiarach przekroju poprzecznego $30(R)\times30(T)$ mm i długościach (L) wynoszących 5, 15, 30, 45, 60 mm. Dla zapewnienia jednorodności materiału doświadczalnego, próbki wycięto z bielastej części jednego bala, którego wilgotność początkowa wynosiła ok. 30%. W kategoriach technologii suszenia było to więc drewno już wstępnie podsuszone [22]. Próbki przechowywano nad wodą w celu zapobieżenia ich wysychaniu. Gęstość użytego do badań drewna wynosiła w stanie zupełnie suchym od 440 do 500 kg/m^3. Proces suszenia próbek prowadzono w temperaturze pokojowej (20 ± 2°C), lecz w sposób intensywny, bowiem przy niskiej wilgotności względnej powietrza nad pięciotlenkiem fosforu. W trakcie suszenia próbek mierzono emisję akustyczną w torze analogowego zapisu generowanych sygnałów oraz na tych samych próbkach dokonywano pomiarów stopnia kurczenia się. Na próbkach bliźniaczych zaś oznaczano gradient wilgotności wzdłuż długości próbek. Przy doborze warunków doświadczenia kierowano się faktem, że rola podłużnego gradientu wilgotności w określeniu skłonności drewna do pękania jest istotna w praktyce suszenia drewna [24].

Pomiary emisji akustycznej wykonano przy użyciu analizatora EA-3 (Techpan — Warszawa) wyposażonego w piezoelektryczny przetwornik akustyczny o częstotliwości rezonansowej 200 kHz. Przetwornik kontaktowano z czołową powierzchnią próbek za pośrednictwem smaru silikonowego i mocowano za pomocą wąskiej taśmy gumowej. Całkowite wzmocnienie toru pomiarowego wynosiło 80 dB. Poziom dyskryminacji

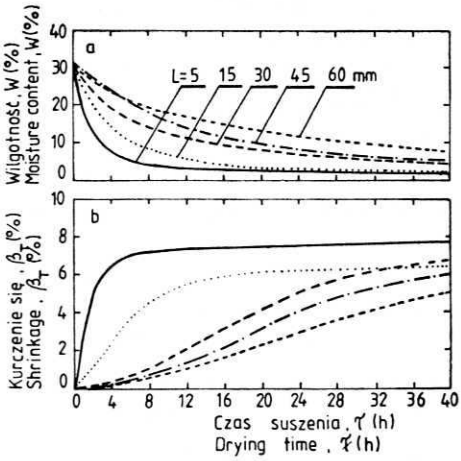
szumów dobrano tak, aby w wypadku próbek o najmniejszych wymiarach EA nie były rejestrowane. Doświadczenia wstępne wykazały bowiem, że własne naprężenia desorpcyjne, powstające w próbkach o wymiarach $30(R)\times30(T)\times5(L)$ mm można uznać za bezpieczne, ponieważ nie stwierdzono w tym wypadku widocznych pęknięć ani zmian kształtu próbek po ich wysuszeniu. Do rejestracji sygnałów EA wykorzystano dwukanałowy rejestrator graficzny X-Y (Tesla — Brno).

Pomiary stopnia kurczenia się próbek w funkcji czasu ich suszenia przeprowadzono w środku ich długości, w kierunku stycznym do przyrostów rocznych z dokładnością do 0,01 mm. Kurczenie się w kierunku stycznym próbek kontrolnych o długości wzdłuż włókien wynoszącej 5 mm, a więc mniejszej niż podwójna długość cewek sosny, uznano umownie za kurczenie się swobodne. Wartość natomiast zahamowanego skurczu w próbkach badanych, tzn. w próbkach o wymiarach wzdłuż włókien 15 mm i większych, wyliczano z różnicy stopnia kurczenia się tych próbek, oznaczonego w środku ich długości i stopnia kurczenia się próbek kontrolnych o długości 5 mm. Uwzględniano przy tym różnice między wilgotnością próbek kontrolnych i wilgotnością środkowej strefy próbek badanych.

Rozkład wilgotności na długości próbek w czasie ich suszenia oznaczano sposobem grawimetrycznym na próbkach bliźniaczych, tj. na próbkach pozyskanych z tego samego materiału doświadczalnego. Do pomiarów użyto próbek złożonych z warstw o grubości 5 mm wzdłuż włókien, a następnie zespolonych. Rozkład wilgotności wzdłuż długości próbek o wymiarach 15, 30, 45 i 60 mm oznaczono na próbkach składających się odpowiednio z 3, 6, 9 i 12 warstw, dociskanych do siebie powierzchniami czołowymi (a uprzednio w tej właśnie kolejności wyciętych z próbki litej) za pomocą wąskiej taśmy gumowej. Możliwość zastosowania takiego pomiaru rozkładu wilgotności wzdłuż długości badanych próbek potwierdziły doświadczenia metodyczne, które nie wykazały istotnych różnic między kinetyką spadku wilgotności próbek zespolonych i kinetyką spadku wilgotności próbek litych.

WYNIKI I ICH ANALIZA

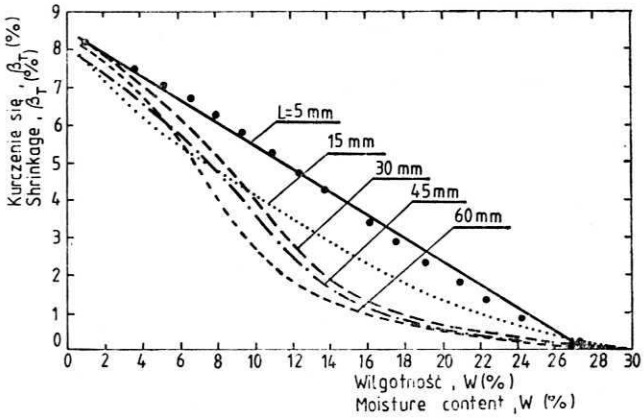
Wyniki przeprowadzonych doświadczeń, charakteryzujące kinetykę suszenia i przebieg kurczenia się próbek drewna sosny, zobrazowano na rysunku 1. Przedstawione na tym rysunku zależności obrazują istotne różnice w kinetyce wysychania próbek o różnej długości, co uwidacznia się szczególnie w początkowych okresie suszenia. Zróżnicowanie kinetyki spadku wilgotności badanych próbek w sposób istotny wpływa na ich kurczenie się. Maksymalny stopień kurczenia się wszystkich badanych próbek, oznaczony po 312 godzinach suszenia, był zbliżony i wy-



Rys. 1. Wpływ czasu suszenia na przebieg zmian wilgotności (a) i kurczenia się (b) próbek drewna sosny w zależności od ich długości (*L*) przy stałym wymiarze przekroju poprzecznego 30×30 mm

Fig. 1. Effect of drying time on the course of moisture changes (a) and shrinkage (b) of pine wood samples depending on their length (*L*) at constant dimensions of the cross-section of 30×30 mm

nosił 8,0 - 8,2%. Oznaczona po tym czasie wilgotność próbek mieściła się w przedziale od 0,9 do 1,5%. Zależności kurczenia się tych próbek w funkcji wilgotności, przedstawione na rysunku 2, wskazują dowodnie na występujące w czasie ich suszenia nieswobodne kurczenie się warstw przypowierzchniowych. Warstwy przypowierzchniowe obniżają



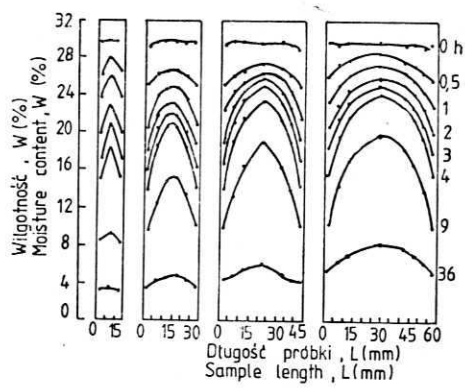
Rys. 2. Zależność między stopniem kurczenia się i wilgotnością próbek drewna sosny o różnej długości (*L*) przy stałym wymiarze przekroju poprzecznego 30×30 mm

Fig. 2. Relationship between shrinkage and moisture content of pine wood samples with different length (*L*) at constant dimensions of the cross-section of 30×30 mm

bowiem swoją wilgotność szybciej aniżeli warstwy środkowe próbek. Fakt nieswobodnego kurczenia się próbek, związany z nierównomiernym rozkładem wilgotności w całej ich objętości, przejawia się w odchyleniu krzywych kurczenia się w funkcji wilgotności od zależności prostoliniowej. Z rysunku 2 wynika bowiem, że jedynie próbki o wymiarze wynoszącym wzdłuż włókien 5 mm kurczą się praktycznie swobodnie, a więc proporcjonalnie do spadku ich wilgotności

$$\beta_{T(5)} = 8{,}54 - 0{,}31\ W\ (R^2 = 0{,}99).$$

Odchylenie krzywych kurczenia się drewna w funkcji jego wilgotności od prostej jest tym większe, im większa jest długość badanych próbek. Strefy przyczołowe próbek tracą bowiem wilgoć szybciej niż strefy głębiej położone, oddalone od powierzchni czołowych [2]. Przemieszczenie się wilgoci wzdłuż włókien jest, jak wiadomo, ok. 10^4 razy szybsze aniżeli w poprzek włókien [17]. Towarzyszący spadkowi wilgotności skurcz drewna jest związany z nierównomiernym rozkładem wilgotności w całej objętości suszonej próbki. W początkowym okresie suszenia warstwom zewnętrznym, które usiłują się kurczyć, przeciwdziałają jeszcze nie kurczące się warstwy środkowe. Wskutek tego kurczenie się próbek badanych o długości $L > 15$ mm jest w danej chwili mniejsze niż kurczenie się próbki kontrolnej o długości $L = 5$ mm, kurczącej się względnie swobodnie. Wartość przeto zahamowanego kurczenia się prób-



Rys. 3. Wpływ czasu suszenia na rozkład wilgotności wzdłuż długości *(L)* próbek drewna sosny

Fig. 3. Effect of drying time on distribution of moisture content along the length *(L)* of the pine wood samples

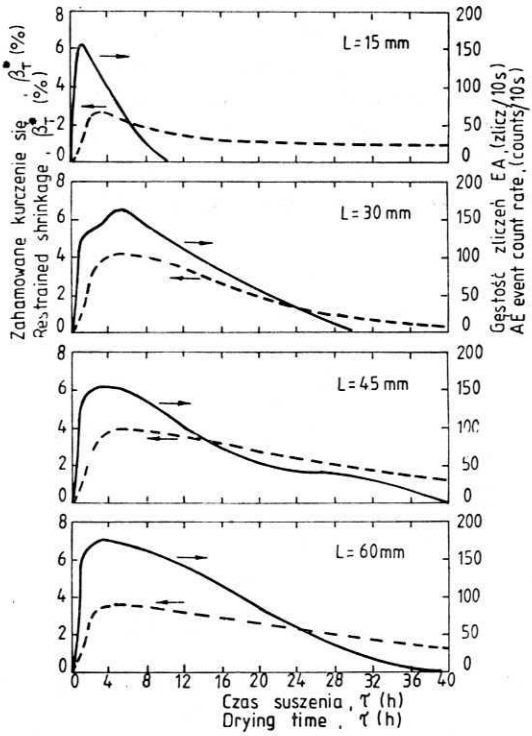
ki może być miarą naprężeń powstających w suszonym drewnie. Znając przybliżony rozkład wilgotności wzdłuż długości próbek (rys. 3) można oszacować wartość zahamowanego kurczenia się w warstwach przyczołowych próbek (β_T^*) w stosunku do ich warstw środkowych,

korzystając z zależności:

$$\beta_T^* = (\beta_T^0 - \beta_T) - K_T \Delta W,$$

gdzie β_T^0 oznacza stopień kurczenia się próbki kontrolnej ($L=5$ mm), β_T — stopień kurczenia się próbki właściwej ($L \geqslant 15$ mm) w środku jej długości, K_T — współczynnik kurczenia się drewna sosny w kierunku stycznym ($K_T = \Delta\beta_T/\Delta W = 0{,}31$), ΔW — różnica między wilgotnością środkowych warstw próbek właściwych i wilgotnością próbki kontrolnej.

Obliczone w przedstawiony wyżej sposób wartości zahamowanego kurczenia się poszczególnych rodzajów próbek przedstawiono w funkcji czasu ich suszenia na rysunku 4. Na rysunku tym zobrazowano również uśrednione (z 5 powtórzeń) przebiegi gęstości zliczeń sygnałów akustycznych generowanych w czasie wysychania próbek. Z przedstawionych danych wynika, że gęstość zliczeń EA zależy od wartości zaha-



Rys. 4. Wpływ czasu suszenia na przebieg zahamowanego kurczenia się (β_T^*) i gęstości zaliczeń EA ($N/\Delta\tau$) w próbkach drewna sosny o różnej długości (L) przy stałym wymiarze przekroju poprzecznego 30×30 mm

Fig. 4. Effect of drying time on the course of the restrained shrinking (β_T^*) and EA events count rate ($N/\Delta\tau$) in pine wood samples different length (L) and constant cross-section dimensions of 30×30 mm

mowanego kurczenia się drewna, a tym samym od jego stanu naprężeniowego. Emisja akustyczna pojawia się już w momencie rozpoczęcia suszenia próbek. Gęstość generowanych sygnałów EA narasta szybciej aniżeli zahamowane kurczenie się badanych próbek. Na fakt ten wpływa zapewne przyjęty sposób pomiaru wartości zahamowanego kurczenia się próbek. Hamowane kurczenie się tkanki drzewnej określano bowiem jako wielkość wypadkową, odniesioną do całego wymiaru próbki w kierunku stycznym. Lokalnie, na powierzchni próbek, wartość zahamowanego kurczenia się tkanki drzewnej jest większa i prawdopodobnie przyrasta równie szybko, jak EA. W początkowym zatem okresie suszenia przeważają efekty akustyczne, mające swoje źródło na powierzchni drewna. Maksymalna gęstość zliczeń EA pojawia się praktycznie w chwili wystąpienia maksymalnych wartości zahamowanego kurczenia się drewna, a więc w czasie, gdy naprężenia desorpcyjne również osiągają maksimum [np. 7, 16, 21]. W tym momencie obserwowano na czołowych powierzchniach próbek liczne promieniowe pęknięcia, które stopniowo powiększały się. Od chwili obniżania się gradientu wilgotności w badanych próbkach, a tym samym od chwili zmniejszania się wartości zahamowanych odkształceń desorpcyjnych, gęstość zliczeń EA zaczyna wyraźnie maleć. Efekty akustyczne ustały zupełnie, gdy w badanych próbkach drewna występowały jeszcze pewne różnice odkształceń wynoszące ok. 1,2% (od 0,8 do 1,7%). Intensywniejsze obniżanie się tempa wzbudzania emisji akustycznej w porównaniu ze spadkiem zahamowanego kurczenia się w obrębie jednej próbki jest związane ze wzmożoną redukcją naprężeń rozciągających w zewnętrznych warstwach drewna, na co wpływa zmniejszanie się gradientu wilgotności i jednoczesny wzrost modułu sprężystości drewna, narastający w miarę obniżania się jego wilgotności. Propagacja pęknięć, pomimo spadku naprężeń desorpcyjnych w skali całej próbki, następuje w dalszym ciągu, ponieważ występuje koncentracja naprężeń w pobliżu wierzchołków pęknięć i w konsekwencji ma miejsce dalsze rozrywanie tkanki drzewnej. Zarejestrowana maksymalna gęstość zliczeń EA praktycznie nie zależy od wymiarów próbek (rys. 4). Wydaje się, że może to być związane ze zróżnicowaną kinetyką przemieszczania się wilgoci w drewnie w poszczególnych jego kierunkach anatomicznych. Przy wymiarach próbek, dobranych jak w opisanych doświadczeniach, o kinetyce ich wysychania decydowała przede wszystkim powierzchnia czołowa.

Przeprowadzone badania wykazały istnienie bliskich zależności pomiędzy aktywnością akustyczną i wartością zahamowanego kurczenia się suszonych próbek drewna. Można to uznać za nowe i istotne potwierdzenie przydatności metody emisji akustycznej do śledzenia i regulowania procesów suszenia drewna za pomocą sygnałów pochodzących bezpośrednio z samego drewna.

WNIOSKI

1. Gęstość generowanych w procesie suszenia próbek drewna sygnałów EA jest wyraźnie uzależniona od zahamowanego kurczenia się drewna.

2. Maksimum gęstości zliczeń EA pojawia się w chwili wystąpienia maksymalnych wartości zahamowanego kurczenia się drewna, a więc w czasie, kiedy naprężenia desorpcyjne są najwyższe.

Praca wpłynęła do Redakcji w styczniu 1992 r.

LITERATURA

1. Becker, H. F.: Schallemissionen während der Holztrocknung. Holz als Roh- und Werkst., 1982, 40(9), s. 345 - 350.
2. Droin-Josserand, A., Taverdet J. T., Vergnaud, J. M.: Modeling absorption and desorption of moisture by wood in an atmosphere of constant and programmed relative humidity. Wood Sci. Technol., 1988, 22(4), s. 299 - 310.
3. Honeycutt R. M., Skaar Ch., Simpson W. T.: Use of acoustic emissions to control drying rate of red oak. Forest Prod. J., 1985, 35(1), s. 48 - 50.
4. James W. L.: Research needs in wood physics: A broad overview. Wood and Fiber Sci., 1988, 20(2), s. 277 - 294.
5. Kagawa Y., Noguchi M., Katagiri J.: Detection acoustic emission in process of timber drying. Acoustic Lett., 1980, 3(8), s. 150 - 153.
6. Kitayama S., Noguchi M., Satoyoshi, K.: Automatic control system of drying zelkowa wood by acoustic emission monitoring. Acoustic Lett., 1985, 9(4), s. 45 - 48.
7. Ławniczak M., Raczkowski J.: Etude quelques bois tropicaux des tenisions de desorption apparaissant pendant le retrait perpendiculaire aux fibres. Bois et Forest des Tropiq., 1962, No 82, s. 53 - 558.
8. Melzow D., Pfeiffer T., Theis K.: Einige Ergebnisse der Schallemissionsanalyse während der Schnitholztrocknung. Holztechnologie 1986, 27(1) s. 19.
9. Noguchi M., Kagawa Y., Katagiri J.: Detection of accoustic emissions during hardwood drying. Mokuzai Gaak., 1980, 26(9), s. 637 - 638.
10. Noguchi M., Okumura S., Kawamoto S.: Characteristics of acoustic emissions during wood drying. Mokuzai Gakk., 1985, 31(3), s. 171 - 175.
11. Noguchi M., Kitayama S., Satoyoshi K., Umetsu J.: Feedback control for drying *Zelkowa serrata* using in-process acoustic emission monitoring. Forest Prod. J., 1987, 37(1), s. 28 - 34.
12. Okumura S., Kawamoto M., Nakagawa M., Noguchi M.: Relatinship between drying stresses and acoustic emission of wood. Bull. Kyoto Univ. Forests 1986, No 58, s. 251 - 259.
13. Okumura S., Kiyotaki T., Noguchi M.: A few experiments on acoustic emission during wood drying. Bull. Kyoto Univ. Forests 1987, No 59, s. 283 - 291.
14. Quarles S. L., Wengert E. M.: Applied drying technology: 1978 to 1988. Forest Prod. J., 1989, 39(6), s. 25 - 38.
15. Sadanari M., Kitayama S.: Waveform analysis acoustic emissions generated in the wood-drying process. Mokuzai Gakk., 1989, 35(7), s. 602 - 608.

16. Schniewind, A. P.: On the nature of drying stresses in wood. Holz als Roh- und Werkst., 1960, 14(6), s. 161 - 168.
17. Siau J. F.: Transport processes in wood. Springer Verlag. Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo 1984.
18. Skaar Ch., Simpson W. T., Honeycutt R. M.: Use of acoustic emisions to identify high levels of stress during oak lumber drying. Forest Prod. J., 1980, 30(2), s. 21 - 22.
19. Stöhr H. P.: Shrinkage differential as a measure for drying stress determination. Wood Sci. Technol., 1988, 22(2), s. 121 - 128.
20. Ugoliev B. N.: Deformativnost drevesiny i naprażenija pri suške. Izd. Lesnaja prom., Moskva 1971.
21. Ugoliev B. N., Lapšin Ju. G., Krotov E. V.: Kontrol napriażenii pri suške dreviesiny. Izd. Lesnaja prom., Moskva 1980.
22. Vermaas H. F., Neville, C. J.: Evaluation of low temperature and accelerated-low temperature drying schedules for *Eucalyptus grandis*. Holzforschung 1989, 43(3), s. 207 - 212.
23. Wassipaul F., Vanek M., Mayerhoffer F.: Klima und Schallemissionen bei Holztrocknung. Holzforsch. und Holzverwert., 1986, 38(4), s. 73 - 79.
24. Wengert E. M., Lamb F. M.: End coating of lumber to prevent end checking. W: Kayihan F., Johnson J. A., Smith W. R. (Ed.): „Upgrading wood quality trough drying technology". Proc IUFRO Inter. Wood Drying Symp., July 23 - 28 1989, Seattle, Wash. s. 164 - 168.

Adres autorów:
Dr inż. Waldemar Moliński
Prof. dr hab. Jan Raczkowski
Mgr inż. Paweł Suchorski
Akademia Rolnicza w Poznaniu
Katedra Nauki o Drewnie
60-627 Poznań, ul. Wojska Polskiego 38/42

RELATIONSHIP BETWEEN ACOUSTIC EMISSION AND RESTRAINED SHRINKAGE OF WOOD DURING DRYING

Summary

The presented paper reports the results of investigations of acoustic emission (AE) events generated in the drying process of pine wood samples of various length which initial moisture content was close to the fiber saturation point. The maximum in AE events count rate are correlated with the maximum in the restrained wood shrinkage, so occurs when dessorptive stresses reach the highest values.