

Franciszek Krzysik

Wpływ wilgoci i wody na podstawowe własności drewna

Ochrona Zabytków 14/1-2 (52-53), 50-65

1961

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

WPLYW WILGOCI I WODY NA PODSTAWOWE WŁASNOŚCI DREWNA

Drewno jest to surowiec otrzymywany ze ściętych drzew i formowany, drogą obróbki, w elementy o różnym kształcie i wymiarach. Jest to materiał organiczny, zbudowany z substancji drzewnej, której ciężar właściwy w stanie całkowicie suchym i po wyeliminowaniu porów wynosi $1,50 \text{ G/cm}^3$. W wyniku porowatej struktury ciężar właściwy drewna w jego naturalnej postaci jest niższy i wykazuje dużą zmienność. W warunkach normalnych drewno związane jest zawsze z mniejszą lub większą ilością wody. Zawartość wody w drewnie ulega dużym wahaniom i zamyka się — zależnie od gatunku drewna i układu warunków zewnętrznych — w granicach od 0% do 460% wilgotności.

Wilgotność drewna jest to stosunek ciężaru zawartej w drewnie wody do ciężaru drewna całkowicie suchego, co wyraża się wzorem:

$$W = \frac{G_w - G_0}{G_0} \cdot 100 \%$$

w którym W — wilgotność drewna wyrażona w %; G_w — ciężar próbki wilgotnej w G ; G_0 — ciężar próbki całkowicie suchej w G .

Wstawiona w licznik różnica ciężarów próbki wilgotnej i suchej określa ilość zawartej w próbce wody w G . Określoną w ten sposób wartość odnosimy do ciężaru próbki całkow-

cie suchej i wyrażamy wilgotność w % ciężaru drewna całkowicie suchego. Z analizy wzoru wynika, że dwa gatunki drewna o różnym ciężarze właściwym zawierają przy tym samym poziomie wilgotności różne ilości wody. I tak np. 1 m^3 drewna o ciężarze właściwym w stanie całkowicie suchym 500 kg/m^3 zawiera przy 60% wilgotności $500 \times 0,6 = 300 \text{ kg}$ wody, wobec czego jego ciężar wynosi 800 kg/m^3 . Drewno dębowe o ciężarze właściwym w stanie całkowicie suchym 650 kg/m^3 zawiera w tych samych warunkach $650 \times 0,6 = 390 \text{ kg}$ wody, a jego ciężar przy 60% wilgotności wynosi 1040 kg/m^3 . Obliczona w ten sposób wilgotność określa ilość zawartej w drewnie wody, lecz nie daje obrazu jej rozmieszczenia. Rozmieszczenie to jest nierównomierne. Przy wysychaniu czyli desorpcji najmniej wody zawierają zewnętrzne, najwięcej środkowe warstwy drewna. Różnice te są tym większe, im większa jest grubość rozpatrywanego elementu. Przy nawilżaniu czyli sorpcji układ wilgotności w drewnie jest odwrotny: największą wilgotność wykazują zewnętrzne, przypowierzchniowe warstwy drewna. Zróżnicowanie wilgotności na poprzecznym przekroju drewna prowadzi do pojęcia gradientu wilgotności, który określa zmianę wilgotności na 1 cm grubości, szerokości lub długości drewna.

WILGOTNOŚĆ DREWNA

Wilgotność drewna świeżo ściętego wykazuje duże wahania w zależności od gatunku i wieku drzewa oraz w zależności od pory cięż-

cia. U drzew wytwarzających zabarwioną twardeł, jak: dąb, sosna, modrzew oraz u drzew o niezabarwionej twardeł, jak świerk i jod-

ła uwydatnia się wyraźnie zróżnicowanie wilgotności bielu i twardzieli; wilgotność bielu jest kilkakrotnie większa od wilgotności twardzieli. Natomiast drzewa bielaste wykazują na całej powierzchni przekroju poprzecznego wysoką i mniej zróżnicowaną wilgotność. Średnia wilgotność świeżo ściętego drewna iglastego wynosi 100 ... 150%, miękkiego drewna liściastego 80 ... 120%, twardego liściastego 55 ... 65%.

Pod wpływem przebywania na powietrzu świeżo ścięte drewno traci przeważną część wody i dochodzi stopniowo do stanu powietrzno suchego, któremu w naszych warunkach odpowiada — zależnie od pory roku i układu warunków atmosferycznych — wilgotność 13% w gorących miesiącach letnich do 22% w chłodnych i wilgotnych miesiącach jesiennych lub zimowych. Za wilgotność przeciętną przyjmuje się w naszych warunkach 15%, w krajach zachodnich 12%. W naszych warunkach w toku suszenia na powietrzu nie da się osiągnąć wilgotności niższej niż 12 ... 13%. Długotrwałe składowanie nie może spowodować dalszego wyschnięcia drewna, prowadzi natomiast do równomiernego rozmieszczenia wilgoci w drewnie i do zlikwidowania naprężeń wewnętrznych powodujących pękanie się drewna. Obniżenie wilgotności do niższego poziomu można osiągnąć jedynie przez suszenie drewna w suszarniach.

Stosowane dawniej wieloletnie sezonowanie (do 20 lat) jest nierentowne i wpływa ujemnie na trwałość drewna i jego własności wytrzymałościowe. Bardziej uzasadnione jest wstępne sezonowanie tarcicy (do 30% wilgotności) oraz dosuszanie jej w suszarniach do wymaganej wilgotności końcowej. Wilgotność drewna w pomieszczeniach ogrzewanych indywidualnymi piecami waha się w cyklu rocznym w granicach 8 ... 13%, przy centralnym ogrzewaniu — 5 ... 13%.

Poziom wilgotności sortymentów drzewnych musi być dostosowany do warunków, w jakich drewno ma przebywać i spełniać swoje zadanie. W budownictwie nadmierna wilgotność początkowa stanowi przyczynę zsychniania się, powstawania szpar i szczelin, pęknięcia i pękania się drewna oraz zagrzybienia budynków. Z drugiej strony drewno wysuszone do zbyt niskiego poziomu pęcznieje i staje się przyczyną spiętrzenia podłóg oraz zniekształcenia gotowych wyrobów lub konstrukcji. Drewno całkowicie suche wchłania intensywnie parę wodną z atmosfery. Z tego względu całkowicie suchy stan drewna odpowiadający wilgotności zbliżonej do 0% można osiągnąć

i utrzymać jedynie w warunkach laboratoryjnych.

Przeciwnieństwo stanu całkowicie suchego stanowi drewno w stanie pełnego nasycenia wodą. Stan ten osiąga drewno w wyniku długotrwałego przebywania w wodzie lub w mokrej ziemi. Ze względu na sposób powiązania oraz odmienne cechy fizyczne występującą w drewnie wodę dzieli się na wodę związaną i wodę wolną.

Woda z w i ą z a n a (woda nasycająca, woda imbibicyjna) jest to woda występująca w submikroskopowych kapilarach błony komórkowej o wymiarach średnicy 10^{-8} ... 10^{-5} cm. Jest ona fizykochemicznie związana z drewnem; na oderwanie jej od błony komórkowej trzeba, poza ciepłem parowania, dostarczyć dodatkowe ilości ciepła, tym większe, im niższy jest poziom wilgotności drewna. Drewno zawierające tylko wodę związaną nazywamy drewnem wilgotnym.

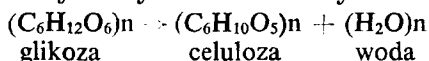
Woda wolna jest to woda ciekła, występująca w mikroskopowych i makroskopowych kapilarach drewna o średnicy większej od 10^{-4} cm. Woda wolna występuje w drewnie drzew żywych oraz w niedostatecznie wyschniętym drewnie drzew ściętych. W drewnie obrobionym lub w elementach budynków drewnianych woda wolna może występować w wyniku nawilżenia wodą z opadów atmosferycznych, w wyniku zacieków lub podsiąkania wody gruntowej oraz w wyniku zanurzenia drewna w wodzie.

Drewno zawierające wodę związaną oraz wodę wolną nazywamy drewnem mokrym. Poziom wilgotności odgraniczający przedział wilgotności drewna odpowiadający wodzie związanej od przedziału wilgotności odpowiadającego wodzie wolnej określa się mianem punktu nasycenia włókien. Jest to górna granica chłonności błon komórkowych, powyżej której ustaje higroskopijne wiązanie pary wodnej z powietrza; dalsze nawilżanie drewna może się odbywać tylko drogą wnikaną w drewno wody płynnej. Wilgotność odpowiadająca punktowi nasycenia włókien zamyka się — zależnie od gatunku drewna — w granicach 22 ... 35%; wartość najczęściej spotykana wynosi 30%. W przedziale higroskopijnym, obejmującym zakres od 0% wilgotności do punktu nasycenia włókien, wilgotność drewna dostosowuje się do warunków otoczenia i zmienia się ustawicznie wraz z ich zmianą. Przyczyną zmian wilgotności są higroskopijne własności drewna wynikające z jego chemicznej i submikroskopowej budowy.

CHEMICZNA BUDOWA DREWNA

Drewno jest to porowate ciało, zbudowane z błon komórkowych, które wchodziły w skład żyjącego organizmu drzewnego. W skład drewna wchodzi celuloza i hemicelulozy oraz ciała bezpostaciowe, z których na pierwszym miejscu należy wymienić ligninę. Udział celulozy wynosi w przybliżeniu 50%, hemiceluloz około 20%, ligniny około 26%; pozostałe 4% przypada na inne substancje. Są to wartości zmienne, ulegające przesunięciom zależnie od gatunku drewna.

Celuloza jest związkiem wielkocząsteczkowym o sumarycznym wzorze $(C_6H_{10}O_5)_n$. Jest ona naturalnym polimerem kondensacyjnym, który powstaje przez połączenie się elementarnych cząstek glikozy w długie łańcuchy przy równoczesnym wydzielaniu wody.



Cząsteczka celulozy przedstawia łańcuch reszt glikozowych powiązanych mostkami tlenowymi czyli wartościowościami głównymi.

Stopień polimeryzacji (wartość n) określa zmienną liczbę włączonych w łańcuch członów

elementarnych; w celulozie dochodzi on do 10 000. Wchodzące w skład cząsteczki łańcuchy celulozy powiązane są między sobą wartościowościami bocznymi (wiązania wodorowe), wskutek czego tworzą one trójwymiarową siatkę przestrzenną. Podłużne wiązania tlenowe są silniejsze od poprzecznych wiązań wodorowych, co stanowi główną przyczynę anizotropii pęcznienia drewna w kierunku wzdłuż włókien i w kierunkach poprzecznych.

Celulozie towarzyszą węglowodany z grupy polisacharydów objęte nazwą hemiceluloz. Stanowią one 10 ... 20% masy suchego drewna. Hemicelulozy stanowią związki niejednolite, obejmujące substancje zbliżone swoimi właściwościami do celulozy oraz substancje zbliżone do skrobi. Hemicelulozy odgrywają istotną rolę w zjawiskach wiązania wody higroskopijnej i pęcznienia drewna.

Lignina jest izotropowym ciałem bezpostaciowym o skomplikowanej i niedostatecznie wyjaśnionej budowie chemicznej. Udział ligniny w zjawiskach wiązania wody i pęcznienia drewna jest nieznaczący.

SUBMIKROSKOPOWA BUDOWA DREWNA

Celuloza zbudowana jest z łańcuchów o różnej długości. Zbliżone do siebie łańcuchy cząsteczkowe ulegają powiązaniu siłami międzycząsteczkowymi (siłami van der Waals'a). wskutek czego układają się na pewnej długości równolegle do siebie, tworząc submikroskopowy, uporządkowany układ przestrzenny, określany mianem miceli frędzlowej. Końce łańcuchów są częściowo zamknięte w ramach miceli, częściowo są umiejscowione w otaczających je przestrzeniach nieuporządkowanych. Uporządkowane przestrzenie micelle przetkane są pozbawionymi prawidłowego układu przestrzennymi, w których łańcuchy celulozy nie są z sobą powiązane. Micele łączą się w związki micel, a w dalszym ciągu w fibrile, które z kolei tworzą włókno celulozowe. Zbudowana w ten sposób celuloza zawiera sieć powiązanych z sobą szczelin i przestrzeni międzymicelarnych, z których najmniejsze mają

średnicę około 10 angstromów, największe dochodzą do 1000 angstromów (1 angstrom — 10^{-8} cm). Szczeliny te przebiegają wzdłuż micel i grupują się w nieuporządkowanych przestrzeniach. Na skutek ich obecności wewnętrzna powierzchnia wyprodukowanej z drewna celulozy obejmuje około $600 \text{ m}^2/\text{cm}^3$.

W przeciwieństwie do celulozy i hemiceluloz, lignina jest ciałem bezpostaciowym, wywołującym brak uporządkowanej budowy przestrzennej. W wyniku obecności ligniny wewnętrzna powierzchnia drewna jest mniejsza niż celulozy i zamyka się — zależnie od gatunku drewna — w granicach $240 \dots 430 \text{ m}^2/\text{cm}^3$. Występujące w celulozie i drewnie nieuporządkowane przestrzenie oraz sieć drenujących drewno submikroskopowych kapilar odgrywają dużą rolę w procesach adsorbowania pary wodnej z otaczającego powietrza.

HIGROSKOPIJNOŚĆ DREWNA

W normalnych warunkach zewnętrznych wilgotność drewna powietrzno suchego dostosowuje się do warunków otoczenia i zmienia

się ustawicznie wraz z ich zmianą. Tło zachodzących zmian stanowią higroskopijne własności drewna.

Drewno jest to porowate ciało, zbudowane z organicznych związków wielkocząsteczkowych. Niektóre z nich, zwłaszcza polisacharydy, mają zdolność adsorbowania pary wodnej z powietrza i zagęszczania jej na swej wewnętrznej powierzchni aż do skroplenia. Chemiczna i submikroskopowa budowa drewna, jego porowata struktura i związana z nią duża powierzchnia wewnętrzna stanowią podłoże zachodzących w drewnie zjawisk higroskopijnych związanych z wymianą (adsorpcja i desorpcja) pary wodnej z otaczającym powietrzem. Wymiana ta ograniczona jest do przedziału higroskopijnego, w granicach od całkowicie suchego stanu drewna (0% wilgotności) do stanu nasycenia włókien (około 30% wilgotności). Po przekroczeniu tej granicy ustają zmiany wilgotności oparte na higroskopijnych własnościach drewna.

Wchłanianie i wiązanie cząsteczek pary wodnej przez składniki błony komórkowej (celuloza i hemicelulozy) odbywa się na podłożu zjawisk adsorpcji i kondensacji kapilarnej. W wyniku dipolowego charakteru cząsteczki pary wodnej wykazują dwubiegunowość, a więc mają biegun elektrycznie dodatni i biegun elektrycznie ujemny. W łańcuchach celulozy występują ujemnie naładowane grupy OH. Znajdujące się w stanie bezładnego ruchu dwubiegunowe cząsteczki pary wodnej ulegają w ich sąsiedztwie uporządkowaniu, zwracając się biegunami dodatnimi ku ujemnie naładowanym grupom OH a różnoimiennymi biegunami ku sobie. W ten sposób odbywa się uwodnienie grup OH na powierzchni miceli, które wskutek tego rozsuwają się i oddalają od siebie. Uporządkowane i regularnie rozmieszczone cząsteczki wody zajmują mniejszą przestrzeń niż w stanie bezładnego ruchu. Następstwem tego jest kontrakcja czyli zmniejszenie objętości wody, a tym samym zwiększenie jej ciężaru właściwego, który w punkcie nasycenia włókien wynosi $1,1 \text{ G/cm}^3$, wzrastając stopniowo do $1,3 \text{ G/cm}^3$ przy wilgotności zbliżonej do 0%.

Przy wilgotności drewna wynoszącej około 15% kończą się możliwości wiązania pary wodnej drogą adsorpcji. Dalsze nawilżanie drewna odbywa się w oparciu o zjawiska kondensacji, przebiegające w submikroskopowych kapilarach drewna. W powietrzu kondensacja pary wodnej może nastąpić tylko w obecności pary nasyconej, której nadmiar ulega kondensacji po przejściu przez punkt rosy. Natomiast w submikroskopowych kapilarach, na skutek działania wklęsłych menisków, kondensacja pary wodnej przebiega przy ciśnieniach niższych od ciśnienia pary nasyconej i to tym

niższych im mniejsze są średnice kapilar. W tych warunkach para wodna wnika do otaczającego powietrza w submikroskopowe kapilary ulega kondensacji, powleka strukturalne elementy drewna cienką warstwą cieczy i powoduje ich rozsuniecie. Zjawiska kondensacji kapilarnej obejmują w przybliżeniu przedział 15 ... 30% wilgotności drewna. Kierunek zmian higroskopijnych zależy od układu określonego z jednej strony wilgotnością drewna, z drugiej strony temperaturą i względną wilgotnością powietrza lub cząstkowym ciśnieniem pary wodnej w powietrzu. Drewno o nadmiernej dla danych warunków wilgotności (ciśnienie pary wodnej w kapilarach drewna wyższe niż w otoczeniu) oddaje część swej wilgoci i wysycha. Drewno zbyt suche dąży do równowagi z układem warunków klimatycznych i pokrywa swój niedobór wilgoci, pobierając parę wodną z otaczającego powietrza.

Mianem równowagi higroskopijnej określa się taki stan, przy którym ciśnienie pary wodnej w drewnie równa się cząstkowemu ciśnieniu pary wodnej w powietrzu, wobec czego wymiana pary wodnej ustaje. Odpowiadającą temu stanowi wilgotność drewna określa się mianem wilgotności równoważnej. Ustalony stan równowagi można utrzymać w warunkach niezmiennych temperatury i niezmiennych wilgotności względnej powietrza, a więc w sztucznie stworzonych warunkach klimatycznych (klimatyzacja). W normalnych warunkach temperatura i względna wilgotność powietrza, zarówno na wolnym powietrzu, jak w pomieszczeniach, podlegają ustawicznym zmianom w cyklu dobowym i w dłuższych okresach czasu. W ślad za tym idą z pewnym opóźnieniem odpowiednie zmiany wilgotności drewna. Między wilgotnością drewna a otaczającym powietrzem istnieje stan równowagi polegający na tym, że każdej temperaturze i każdej względnej wilgotności powietrza odpowiada pewna równoważna wilgotność, którą drewno osiąga po odpowiednio długim przebywaniu w danych warunkach, z tym większym opóźnieniem, im większe są wymiary drewna. Wielkość opóźnienia określa czas potrzebny do osiągnięcia przez rozpatrywaną bryłę drewna wilgotności równoważnej. Czas ten jest mniejszy przy wysychaniu (desorpcja) drewna, większy natomiast przy nawilżaniu (adsorpcja) wyschniętego drewna. Wilgotność równoważną drewna można odczytać z odpowiednich tablic lub wykresów (tab. 1, ryc. 7).

Mechanizm i dynamika zmian wilgotności drewna w pomieszczeniach zależy bezpośrednio od układu parametrów charakteryzujących

Tabela 1 Wilgotność równoważna drewna

oC	Temperatura powietrza																				
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
100	29,0	28,7	28,5	28,4	28,3	28,2	28,1	28,0	28,0	27,9	27,9	27,4	27,0	26,6	26,1	25,6	25,0	24,6	24,1	23,6	23,0
95	24,6	24,4	24,2	24,0	23,8	23,6	23,6	23,2	23,0	22,8	22,6	22,4	22,0	21,5	21,1	20,6	20,0	19,4	18,8	18,2	17,5
90	21,0	20,8	20,6	20,4	20,2	20,0	19,7	19,4	19,1	18,9	18,7	18,3	18,0	17,5	17,0	16,5	16,0	14,9	14,3	13,8	13,3
85	19,2	18,8	18,5	18,3	18,1	17,8	17,5	17,2	16,8	16,5	16,2	15,9	15,5	15,0	14,5	14,0	13,4	12,9	12,4	12,0	11,2
80	17,5	17,2	17,0	16,7	16,3	16,0	15,7	15,3	15,0	14,7	14,4	14,0	13,6	13,1	12,6	12,1	11,7	11,2	10,7	10,3	10,0
75	15,3	15,2	15,0	14,9	14,7	14,4	14,1	13,8	13,6	13,3	13,0	12,5	12,0	11,6	11,0	10,7	10,3	9,9	9,6	9,2	8,8
70	13,6	13,4	13,2	13,1	13,0	12,8	12,6	12,4	12,1	11,8	11,5	11,1	10,8	10,4	10,0	9,6	9,2	8,7	8,4	8,1	7,8
65	12,3	12,2	12,0	11,8	11,6	11,4	11,2	11,0	10,8	10,6	10,4	10,2	9,8	9,5	9,0	8,7	8,3	7,9	7,5	7,0	6,8
60	11,3	11,0	10,8	10,6	10,5	10,4	10,3	10,1	10,0	9,7	9,5	9,2	8,9	8,5	8,2	7,8	7,5	7,1	6,8	6,5	6,2
55	10,2	10,1	10,0	9,9	9,8	9,7	9,5	9,3	9,1	8,9	8,7	8,4	8,1	7,8	7,4	7,1	6,8	6,4	6,1	5,8	5,6
50	9,6	9,4	9,2	9,1	9,0	8,8	8,6	8,4	8,2	8,0	7,8	7,6	7,4	7,0	6,7	6,5	6,2	5,9	5,7	5,5	5,2
45	8,8	8,7	8,6	8,5	8,3	8,1	7,9	7,7	7,5	7,3	7,1	6,9	6,7	6,3	6,0	5,8	5,6	5,3	5,1	4,9	4,3
40	8,2	8,1	8,0	7,8	7,6	7,4	7,2	7,0	6,8	6,6	6,4	6,2	5,9	5,6	5,4	5,2	5,0	4,8	4,6	4,3	4,1
35	7,2	7,0	6,9	6,8	6,7	6,6	6,5	6,4	6,2	6,0	5,8	5,6	5,3	5,0	4,8	4,7	4,4	4,1	3,9	3,7	3,5
30	6,3	6,2	6,1	6,0	5,9	5,8	5,7	5,6	5,4	5,2	5,0	4,8	4,6	4,4	4,2	4,1	3,9	3,5	3,3	3,1	2,9
25	5,4	5,3	5,2	5,1	5,0	4,9	4,8	4,7	4,6	4,5	4,3	4,1	3,9	3,8	3,7	3,5	3,4	3,1	2,8	2,6	2,4
20	4,7	4,6	4,5	4,4	4,3	4,2	4,1	4,0	3,9	3,8	3,6	3,5	3,3	3,2	3,1	2,9	2,8	2,6	2,5	2,3	2,1
15	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,3	2,2	2,0	1,8	1,7	1,6
10	2,7	2,7	2,7	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,4	1,2

klimat wnętrza, który z kolei kształtuje się pod wpływem układu warunków zewnętrznych. Temperatura ogrzewanych wnętrza jest w zimie — w porównaniu z otoczeniem zewnętrznym — wysoka. Wnikające do wnętrza zimne powietrze atmosferyczne o wysokiej wilgotności względnej, a małej wilgotności absolutnej¹ powoduje narastające stopniowo wysuszenie powietrza w pomieszczeniu. Jego względna wilgotność wynosząca w okresie letnim 70% spada pod koniec zimy do 40% lub nawet niżej. Wyszuszający wpływ zewnętrznego powietrza jest tym większy, im niższa jest jego temperatura. Odpowiednikiem tych zmian klimatu wnętrza są zmiany równoważnej wilgotności drewna, która w pomieszczeniach ogrzewanych centralnie wynosi pod koniec lata 13% a pod koniec zimy spada do poziomu 5%.

Dużą rolę odgrywa sposób ogrzewania. W pomieszczeniach ogrzewanych indywidualnymi piecami występują w cyklu dobowym duże

wahania temperatury, a w ślad za tym wahania względnej wilgotności powietrza. Dzięki temu zmiany wilgotności drewna skupiają się głównie w jego warstwach zewnętrznych, wobec czego głębiej położone warstwy drewna wysychają wolniej. W pomieszczeniach ogrzewanych centralnie temperatura utrzymuje się — w przybliżeniu — na tym samym poziomie. Następstwem tego jest pogłębiający się w ciągu zimy spadek względnej wilgotności powietrza i bardziej intensywne wysychanie drewna. Zmiany wilgotności drewna na tle układu parametrów klimatu zewnętrznego i klimatu centralnie ogrzewanego wnętrza przedstawiono na ryc. 8, która ujmuje syntetycznie wyniki badań przeprowadzonych w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna S.G.G.W.

Z wykresu wynika, że dominujący wpływ na kształtowanie się klimatu wnętrza i przebieg zmian wilgotności drewna wywiera przebieg temperatury na zewnątrz pomieszczenia. W warunkach stałej (w przybliżeniu) tempe-

¹ Pojemność powietrza w stosunku do pary wodnej rośnie w miarę wzrostu temperatury. Względna wilgotność powietrza (W_w) jest to wyrażony w % stosunek masy pary wodnej istotnie zawartej w powietrzu (G_p) do masy pary wodnej potrzebnej — w danej temperaturze — do pełnego nasycenia powietrza (G_n):

$$W_w = \frac{G_p}{G_n} \cdot 100 \%$$

Wilgotność absolutna jest to ilość pary wodnej zawarta w 1 kG suchego powietrza, wyrażona w G. W miarę wzrostu temperatury rośnie, a w miarę spadku temperatury zmniejsza się ilość pary wodnej potrzebnej do nasycenia powietrza; nadmiar wilgoci ulega skropleniu (rosa lub szron). W mroźne dni powietrze zewnętrzne wykazuje wilgotność względną zbliżoną do 100%; w ogrzewanym pomieszczeniu wilgotność względna wnikającego powietrza spada gwałtownie — powietrze staje się suche.

ratury wnętrza, spadek wilgotności względnej powietrza i wilgotności drewna w pomieszczeniu jest tym większy, im niższa jest temperatura zewnętrzna. Okresom niskich temperatur zewnętrznych odpowiadają okresy posuchy w klimacie wnętrza.

Duże wahania równoważnej wilgotności drewna rzutują w istotny sposób na zagadnienie konserwacji zabytków. I tak np. obrazy, które setki lat nie wykazywały spaczenia — paczą się obecnie w wyniku wprowadzenia centralnego ogrzewania. Przyczynia się do tego asymetryczny rozkład naprężeń spowodowany tym, że jednostronna powłoka malarska działa równocześnie jak jednostronna powłoka

wodoszczelna. Odwrotna strona obrazu wysycha i kurczy się bardziej intensywnie. Efektem końcowym jest nieckowate spaczenie skierowane wypukłością na zewnątrz.

W ujęciu ogólnym należy stwierdzić, że wilgotność równoważna stanowi zmienną wartość graniczną, do której dąży rzeczywista wilgotność drewna. Ustabilizowanie wilgotności drewna na stałym poziomie jest możliwe tylko w warunkach klimatyzacji pomieszczeń. Powtarzające się periodycznie zmiany wilgotności stanowią przyczynę pęknięcia i deformacji drewna, a w długich okresach czasu główną przyczynę starzenia się drewna.

NASIĄKLIWOŚĆ DREWNA

Nasiąkliwość drewna jest to zdolność wchłaniania wody przez zanurzone w niej drewno. Stopień nasycenia drewna zależy od długości czasu zanurzenia. Pełne nasycenie odpowiada maksymalnej ilości wody jaką drewno może wchłoniąć, wyrażonej w kG wchłoniętej wody na kG całkowicie suchego drewna. Maksymalna pojemność wodna drewna W_{\max} stanowi sumę wody higroskopijnej W_h (0,30 kG/kG) i wody wolnej W_k , co wyraża się wzorem:

$$W_{\max} = W_{h \max} + W_{k \max} = 0,30 + \frac{1,50 - \gamma_0}{1,50 \cdot \gamma_0} \text{ kG/kG}$$

w którym:

0,30 — zawartość wody związanej w drewnie w kG/kG,

1,50 — ciężar właściwy wolnej od porów substancji drzewnej w G/cm^3 ,

γ_0 — ciężar właściwy drewna całkowicie suchego w G/cm^3 .

Drewno lekkie, zawierające dużo wolnych przestrzeni, wchłania więcej wody niż drewno

ciężkie. Zależność nasiąkliwości od ciężaru właściwego drewna przedstawia wykres na ryc. 9.

Trociny i drewno rozłożone wchłaniają znacznie więcej wody niż drewno lite; tym tłumaczy się dużą nasiąkliwość drewna zniszczonego przez grzyby lub owady. Szybkość nasiąkania zależy od ciężaru właściwego drewna. Drewno o dużym ciężarze właściwym wchłania wodę wolniej niż drewno lekkie, drewno twardzielowe wolniej niż drewno bielaste. Wsiąkająca woda wnika w drewno głównie naczyniami i cewkami w kierunku równoległym do przebiegu włókien, wobec czego wielkość powierzchni czołowych odgrywa w procesie nasiąkania drewna dominującą rolę. Rozmieszczenie wody w nasycionym drewnie nie jest równomierne; zewnętrzne warstwy są silniej nawilżone od warstw wewnętrznych. Stan pełnego nasycenia osiąga drewno po długim okresie (powyżej roku) przebywania w wodzie; w tym stanie prawie wszystkie pory drewna są wypełnione wodą, a zawartość powietrza w drewnie jest nieznaczna.

ANIZOTROPIA WŁASNOŚCI DREWNA

Chemiczna i submikroskopowa budowa drewna wywiera istotny wpływ na jego fizyczne i mechaniczne własności. Łańcuchy celulozy i zbudowane z nich micelle ułożone są spiralnie w stosunku do podłużnej osi włókien. Następstwem rozmieszczenia silnych wiązań tlenowych w kierunku podłużnym oraz luźnych wiązań wodorowych w kierunku po-

przecznym jest anizotropia celulozy, a w ślad za nią drewna. Jej wyrazem są wysokie wytrzymałości drewna wzdłuż włókien a niskie wytrzymałości w kierunku poprzecznym oraz duże zróżnicowanie kurczenia się i pęcznienia drewna w poszczególnych kierunkach anatomicznych. Obrazują to liczby zestawione w tab. 2.

Tabela 2. Anizotropia własności drewna

Rodzaj drewna	Skurcz w % wymiarów drewna mokrego				Ściskanie kG/cm ²		Rozciąganie kG/cm ²	
	wzdłuż włókien	promieniowy	styczny	objętościowy	wzdłuż włókien	prostop. do włókien	wzdłuż włókien	prostop. do włókien
Jodła	0,1	3,8	7,6	11,7	400	45	840	23
Świerk	0,3	3,6	7,8	12,0	430	60	900	27
Sosna	0,4	4,0	7,7	12,4	435	75	1040	30
Modrzew	0,3	3,3	7,8	11,8	420	60	1070	23
Dąb	0,4	4,0	7,8	12,6	470	110	900	40
Buk	0,3	5,8	11,8	17,6	530	90	1350	70

PEĆZNIE I KURCZENIE

Zmiany wilgotności drewna stanowią bezpośrednią przyczynę zjawisk kurczenia się i pęcznienia drewna; w powiązaniu z anizotropią stanowią one również przyczynę pęcznienia się drewna.

Pęcznieniem nazywa się zwiększanie wymiarów liniowych i objętości drewna przy sorpcji pary wodnej lub wody z otoczenia, a kurczeniem zmniejszanie się tych wymiarów przy desorpcji. Drewno o wilgotności przekraczającej punkt nasycenia włókien oddaje wodę wolną, nie zmniejszając swoich wymiarów. Kurczenie się i związane z nim pękanie i pęcznienie się drewna występuje w przedziale wilgotności między punktem nasycenia włókien a stanem bezwodnym, czyli w przedziale higroskopijnej wilgotności drewna (woda związana).

Drewno suche wchłania parę wodną lub wodę z otoczenia i pęcznieje, dochodząc w punkcie nasycenia włókien do maksymalnych wymiarów. W miarę wzrostu wilgotności maleje wytrzymałość drewna. Tłumaczy się to tym, że woda wnikając między micelle powoduje zwiększenie ich wzajemnej odległości. Następstwem tego jest zmniejszenie kohezji między micelami, a w ślad za tym zmniejszenie wytrzymałości drewna. W punkcie nasycenia włókien zostaje osiągnięta górna granica chłonności błon komórkowych. Dalsze wnikanie wody wolnej nie wywiera wpływu na wytrzymałość drewna. Odmiennie przedstawia się przebieg kurczenia się i pęcznienia drewna o dużej grubości, jak bale, belki i krawędziaki. Sortymenty te zaczynają się kurczyć przy wilgotności 50%, a więc powyżej punktu nasycenia włókien. Zjawisko to jest następstwem nie-

równomiernego wysychania. Zewnętrzne warstwy drewna wysychają i kurczą się w czasie, gdy warstwy wewnętrzne nie zaczęły wysychać lub zawierają jeszcze wodę wolną. Całkowity skurcz określa różnica wymiarów w stanie maksymalnego spęcznienia (punkt nasycenia włókien lub wyższe poziomy wilgotności) i w stanie całkowicie suchym, odniesiona do wymiarów drewna mokrego:

$$K_l = \frac{l_w - l_0}{l_w} \cdot 100\%; \quad K_v = \frac{V_w - V_0}{V_w} \cdot 100\%$$

gdzie:

- K_l — całkowity skurcz liniowy,
- K_v — całkowity skurcz objętościowy,
- l_w i V_w — wymiar liniowy lub objętość w stanie maksymalnego spęcznienia,
- l_0 i V_0 — wymiar liniowy lub objętość w stanie całkowicie suchym.

W analogiczny sposób określa się spęcznienie, odnosząc różnicę wymiarów do wymiaru w stanie całkowicie suchym. W ujęciu praktycznym pęcznienie jest zjawiskiem w stosunku do kurczenia się równym co do wielkości lecz skierowanym przeciwnie.

Wielkość całkowitego skurczu, zależna od kierunku anatomicznego oraz od gatunku drewna, znajduje wyraz w następujących liczbach:

Skurcz wzdłuż włókien	— 0,1 ... 0,35%
Skurcz promieniowy	— 2,0 ... 8,50%
Skurcz styczny	— 6,0 ... 13,0%
Skurcz objętościowy	— 7,0 ... 22,5%

Tabela 3. Ciśnienie pęcznienia drewna. Wg Perkitnego

Rodzaj drewna	Kierunek styczny	Kierunek promieniowy
Sosna	do 13 kG/cm ²	do 3,5 kG/cm ²
Buk	do 22 kG/cm ²	do 13,0 kG/cm ²

Przebieg kurczenia się drewna w poszczególnych przedziałach wilgotności przedstawiono graficznie na ryc. 10.

Pęczniące drewno wywiera nacisk na swoje otoczenie powodując rozsuwanie i pęknięcie murów, wypiętrzenie podłóg oraz zniekształcenia połączeń i konstrukcji drewnianych. Obrazują to liczby podane w tab. 3. Ograniczenie pęcznienia drewna wywiera ujemne skutki. Dobrze dopasowany i ciasno osadzony element drewniany, nawilżony powyżej normalnej dla danej konstrukcji wilgotności, ulega wewnętrznemu sprasowaniu. Po wysusze-

niu do normalnego poziomu wilgotności pierwotne wymiary drewna ulegają zmniejszeniu, wskutek czego połączenie staje się luźne. Wystarczy jednorazowe nawilżenie i wysuszenie drewna, ażeby dobrze dopasowane połączenia uległy rozluźnieniu. Zjawisko pogłębia się przy wielokrotnie powtarzanym nawilżaniu i wysychaniu drewna. Nieszczelność połączeń i szpary wzdłuż płaszczyzn stykowych desek lub innych elementów konstrukcyjnych są następstwem zahamowania pęcznienia i wewnętrznej kompresji drewna.

PEKANIE I PACZENIE SIĘ DREWNA

Pęknięcie drewna jest w przeważnej części następstwem nierównomiernego wysychania. Zewnętrzne warstwy drewna wysychają prędzej, wskutek czego zaczynają się kurczyć w czasie, gdy warstwy wewnętrzne zawierają jeszcze wodę wolną. Pod naporem nie kurczących się warstw wewnętrznych występują w warstwach zewnętrznych naprężenia rozciągające. Z chwilą, gdy wielkość ich przekroczy niską wytrzymałość drewna na rozciąganie w poprzek włókien powstają pęknięcia, których wielkość rośnie w miarę postępującego naprężenia.

Paczenie się drewna jest następstwem anizotropii skurczu w kierunku stycznym i promieniowym. Wielkość i rodzaj odkształceń zależą od gatunku drewna i od wymiarów rozpatrywanych elementów oraz od tego z jakiej części kłody zostały one wyrobione. Wielkość skurczu stycznego ograniczona jest dwiema wartościami granicznymi: wartością maksymalną w obwodowej strefie drewna i wartością minimalną — równą wielkości skurczu promieniowego — w przekroju średnicowym. Między obwodem a środkiem pnia skurcz styczny przybiera wartości stopniowo malejące. Zewnętrzna płaszczyzna deski, jako bardziej odle-

gła od środka kłody i mająca bardziej styczny układ słoje, kurczy się silniej niż płaszczyzna zwrócona ku rdzeniowi, wskutek czego deska przybiera kształt nieckowaty (ryc. 13 — 1). Spaczenie deski jest tym większe, im większa jest jej grubość i szerokość. Graniaki o przekroju kwadratowym umiejscowione w partiach przyobwodowych (ryc. 13 — 2) ulegają zniekształceniu, gdyż przekątnia styczna kurczy się więcej niż przekątnia promieniowa. Deski i bele promieniowe (ryc. 13 — 3), o słojach ustawionych prostopadle do szerszych płaszczyzn, wykazują mniejszy skurcz i kurczą się bardziej równomiernie. Deski zawierające rdzeń (ryc. 14—4) wykazują największe zmniejszenie grubości na wąskich płaszczyznach bocznych (skurcz styczny), najmniejsze w płaszczyźnie rdzeniowej (skurcz promieniowy).

Wilgotność drewna musi być dostosowana do przyszłych warunków otoczenia. Szkodliwe jest stosowanie zarówno drewna mokrego, jak drewna nadmiernie wysuszonego, gdyż paczy się ono na skutek pęcznienia. Parzenie drewna lub suszenie w wysokich temperaturach wpływa dodatnio na stabilizację jego wymiarów i kształtu.

ZMIANY DREWNA POD WPLYWEM ZMIAN WILGOTNOŚCI

Grzyby powodujące rozkład drewna potrzebują do swego rozwoju zarówno wody, jak powietrza; układ substancja drzewna — woda — powietrze musi spełniać określone warunki ilościowe, decydujące o możliwościach i intensywności rozwoju grzybów. W warunkach praktycznych przyjmuje się, że minimalna wilgotność potrzebna do rozwoju grzybni wynosi 22...24%. Drewno o wilgotności mniejszej od 20% uważa się za odporne w stosunku do grzybów rozkładających drewno w budynkach, optymalna wilgotność podłoża zamyka się w granicach 35...60%. Drewno o wilgotności przekraczającej maksymalną wilgotność, przy której możliwy jest rozwój grzybni, znajduje się w wilgotnym stanie ochronnym. Czynnikiem decydującym o niemożności rozwoju grzybów jest w tym przypadku nadmierna wilgotność i związany z nią niedobór powietrza w drewnie.

Drewno okresowo nawilżane i wysychające — np. na skutek zaciekania wody deszczowej — przechodzi wielokrotnie przez zakres optymalnych warunków rozwoju grzybów i łatwo ulega rozkładowi. Drewno stale zamurzone w wodzie wykazuje dużą trwałość, nie mniej jednak w długich okresach czasu (setki lat) zachodzą zmiany w chemicznym składzie drewna. I tak np. analiza chemiczna drewna dębowego z łodzi Wikingów w Oseborg liczącej 1200 lat wykazała rozkład pentozarów w 91%, a celulozy w 95%; natomiast lignina została rozłożona tylko w nieznacznym stopniu (6). Rozkład celulozy jest prawdopodobnie spowodowany hydrolizą. Drewno takie jest lekkie i ma niską wytrzymałość. Wynika stąd, że długie okresy czasu powodują — nawet w warunkach mokrego środowiska — starzenie się drewna i jego powolny rozkład.

Drewno, które długo przebywało pod wodą wymaga po wydobyciu starannych zabiegów konserwacyjnych (powlekania mieszaniną terpentyny i oleju lnianego, nasycania gorącym

roztworem alunu), gdyż w czasie niehamowanego wysychania łatwo ulega spękaniu i zniszczeniu.

W drewnie zawierającym garbniki, wystawionym przez długi okres czasu na działanie wody zachodzą charakterystyczne zmiany barwy. Drewno dębowe zanurzone w wodzie ciemnieje, przybierając z biegiem czasu zabarwienie ciemnoszare do czarnego. Drewno dębowe w kutrach i łodziach rybackich czernieje w ciągu 30 lat; intensywne czernienie występuje zwłaszcza w sąsiedztwie łączników żelaznych. Z takiego materiału pochodzą spotykane w malarstwie podobrazia z czarnej dębiny. Intensywność i jednolitość zabarwienia zależą od długości czasu, przez jaki drewno przebywało w wodzie lub w wilgotnej ziemi. W wodzie proces czernienia przebiega bardziej intensywnie niż w ziemi. Czernienie dębiny tłumaczy się tym, że rozpuszczone w wodzie związki żelaza wchodzi w reakcję z występującymi w drewnie dębowymi garbnikami. W wyniku reakcji powstają związki barwne, które przesycają błony i wypełniają światło komórek. Obok własności barwiących mają one także własności antyseptyczne, dzięki czemu równocześnie wzrasta trwałość drewna. Czarna dębina wymaga po wydobyciu troskliwej konserwacji.

W konserwacji zabytków mogą znaleźć zastosowanie tworzywa drzewne, a zwłaszcza płyty wiórowe, klejone i prasowane z wiórów o małych wymiarach. Dzięki dużej zawartości kleju oraz dodawanego w procesie produkcyjnym preparatu parafinowego są one mniej wrażliwe na zmiany klimatu wewnątrz, mniej pęcznią i pączą się niż drewno. Ich wilgotność równoważna wynosi około 8%. Płyty wiórowe oklejone dwustronnie tkaniną i obłogami powinny wykazywać stałość kształtów i wymiarów. Należy przypuszczać, że stanowiłyby one dobry materiał na podobrazia.

STARZENIE SIĘ DREWNA

Mało badany dotychczas proces starzenia się polega na rozkładzie drewna pod wpływem otoczenia, lecz bez udziału rozkładających drewno czynników biologicznych.

Zmiany wilgotności drewna w przedziale higroskopijnym (0...30%) stanowią jedną z przyczyn starzenia się drewna. Wielokrotnie powtarzające się okresy wzrostu i spadku wilgotności są równoznaczne z wtłaczaniem cza-

steczek wody między micelle — lub na odwrót — odrywaniem ich od łańcuchów celulozy. Zjawiska te odbywają się przy współdziałaniu wielkich sił i naprężeń. Wynikiem końcowym jest osłabienie wiązań i stopniowy rozpad łańcuchów celulozy, która traci swoją włóknistą strukturę. Pod wpływem długich okresów czasu drewno i inne materiały zawierające celulozę rozpadają się w proch.

Drewno zanurzone w wodzie lub przebywające w wilgotnej ziemi wykazuje dużą długowieczność, niemniej ulega również rozkładowi i starzeje się. W wyniku długotrwałego działania wody celuloza ulega hydrolizie, a analiza rentgenograficzna wykazuje skrócenie jej łańcuchów. W wyniku zachodzących zmian drewno ulega przeobrażeniom, zmniejsza się udział celulozy w drewnie, a wzrasta stosunkowy

udział ligniny. Drewno staje się bardziej porowate, jego ciężar właściwy i własności mechaniczne ulegają obniżeniu. Utrwalenie i stabilizacja takiego drewna wymaga dużej wiedzy i troskliwych zabiegów konserwatora.

prof. dr F. Krzysik
Szkoła Główna Gospodarstwa
Wiejskiego, Warszawa

LITERATURA

1. W. Garczyński, *Transport i konserwacja wczesnośredniowiecznej łodzi ze wsi Czarnowsko*, pow. Lębork, „Materiały Zachodnio-Pomorskie“ IV, 1958, s. 393—397.

2. H. Kordecki, *Wpływ wielokrotnego suszenia i nawilżania przy mechanicznym ograniczeniu pęcznienia na ciężar właściwy i wytrzymałość na ściskanie drewna dębu*, 1951 (maszynopis pracy magisterskiej w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie).

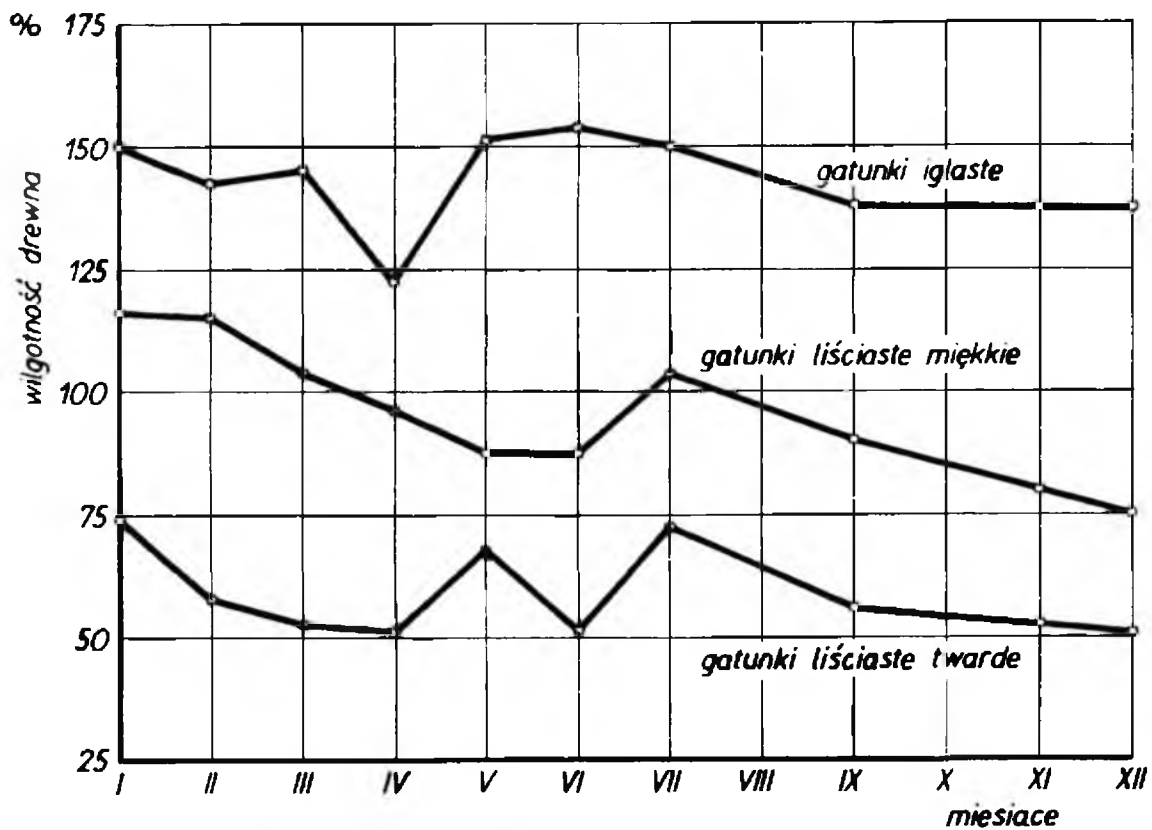
3. F. Krzysik, *Nauka o drewnie* (Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne) Warszawa, 1957.

4. F. Krzysik i K. Sobczak, *Wilgotność drewna w pomieszczeniach ogrzewanych centralnie*, „Sylwan“, 1960, nr 9.

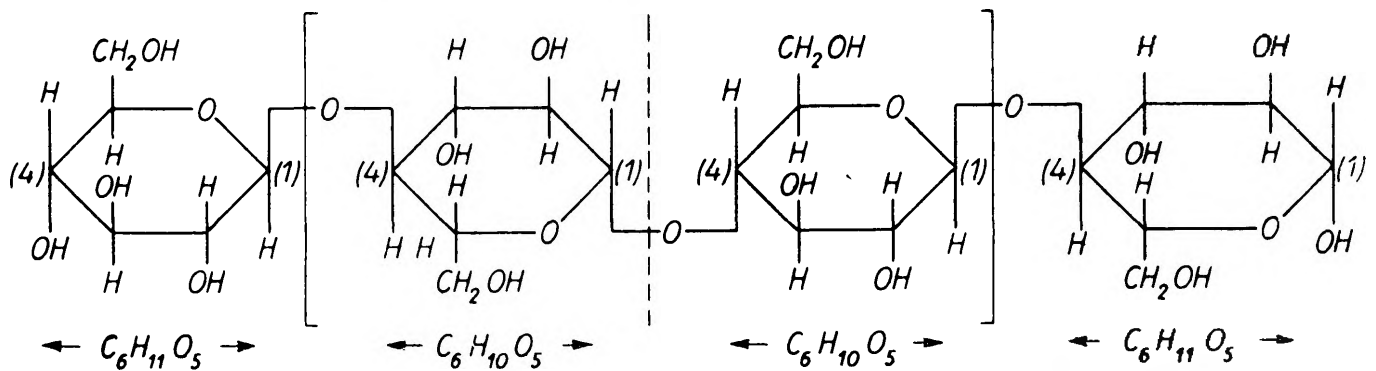
5. T. Perkitny, *Über den Einfluss mechanischer Hindernisse auf die Quellung und Schwindung von Kiefernholz*, „Holz als Roh — u. Werkstoff“, Berlin 1938, nr 12.

6. A. M. Rosenqvist, *The stabilizing of Wood found in the Viking Ship of Oseberg*, I — „Studies in Conservations“ IV, 1959, nr 1, s. 13—22; II — tamże, IV, 1959, nr 2, s. 62—72.

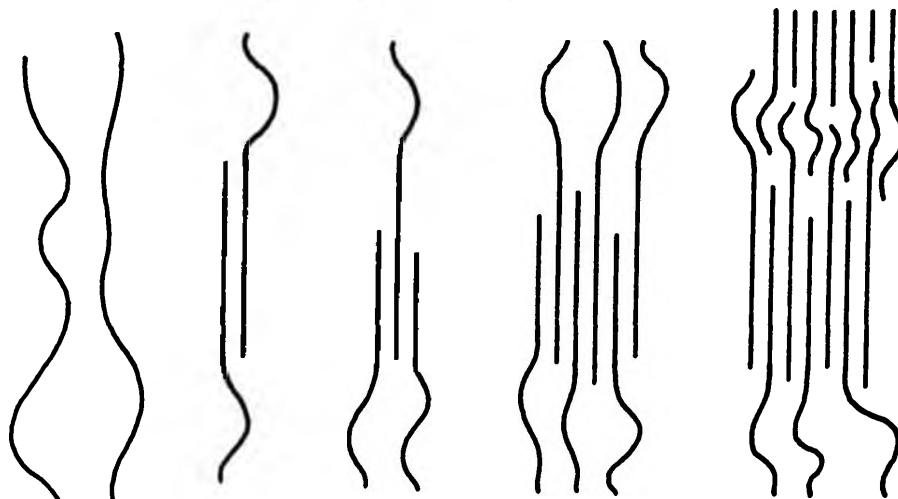
7. The Care of Wood Panels. „Museum“ (UNESCO) VIII, 1955, nr 3.



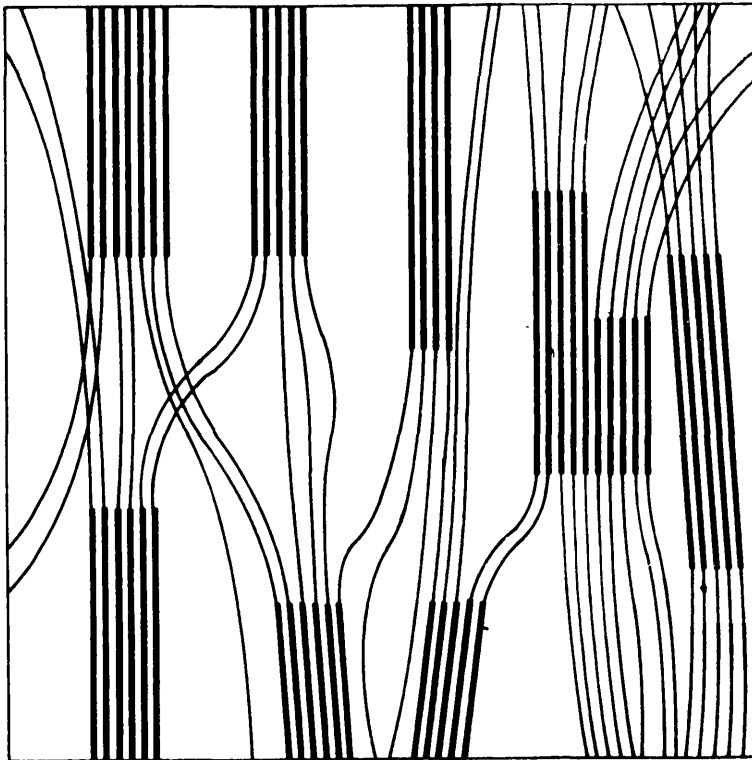
Ryc. 1. Wilgotność drewna bezpośrednio po ścięciu w poszczególnych miesiącach roku



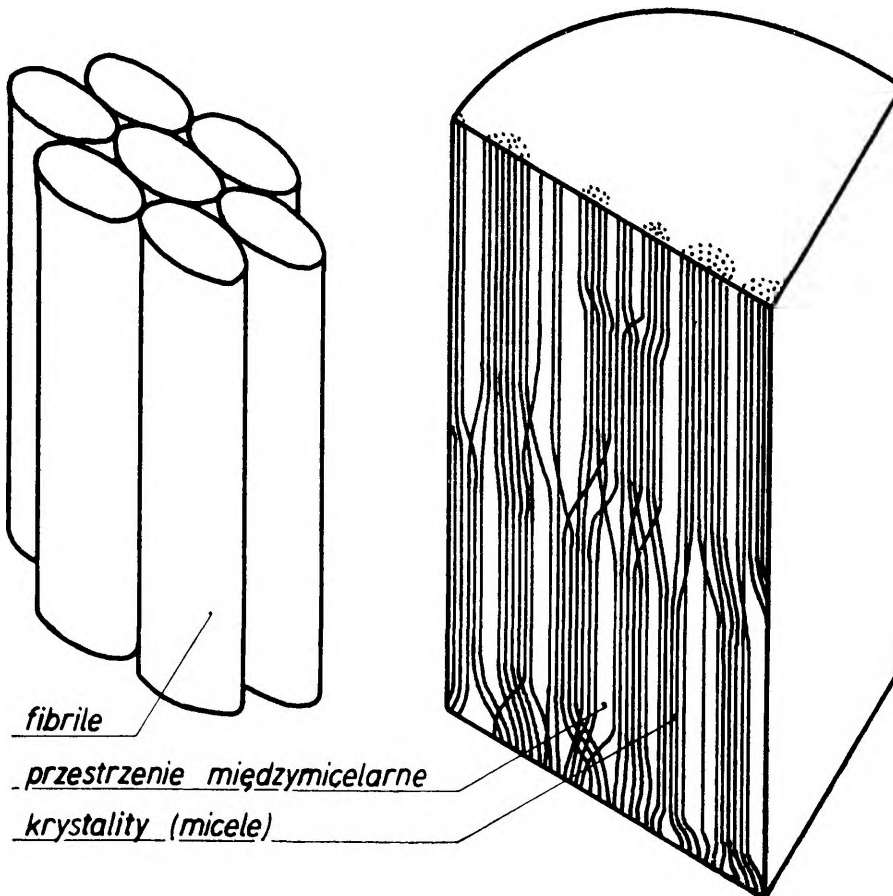
Ryc. 2. Łańcuch celulozy złożony z reszt glikozowych powiązanych głównymi wartościami (mostkami tlenowymi)



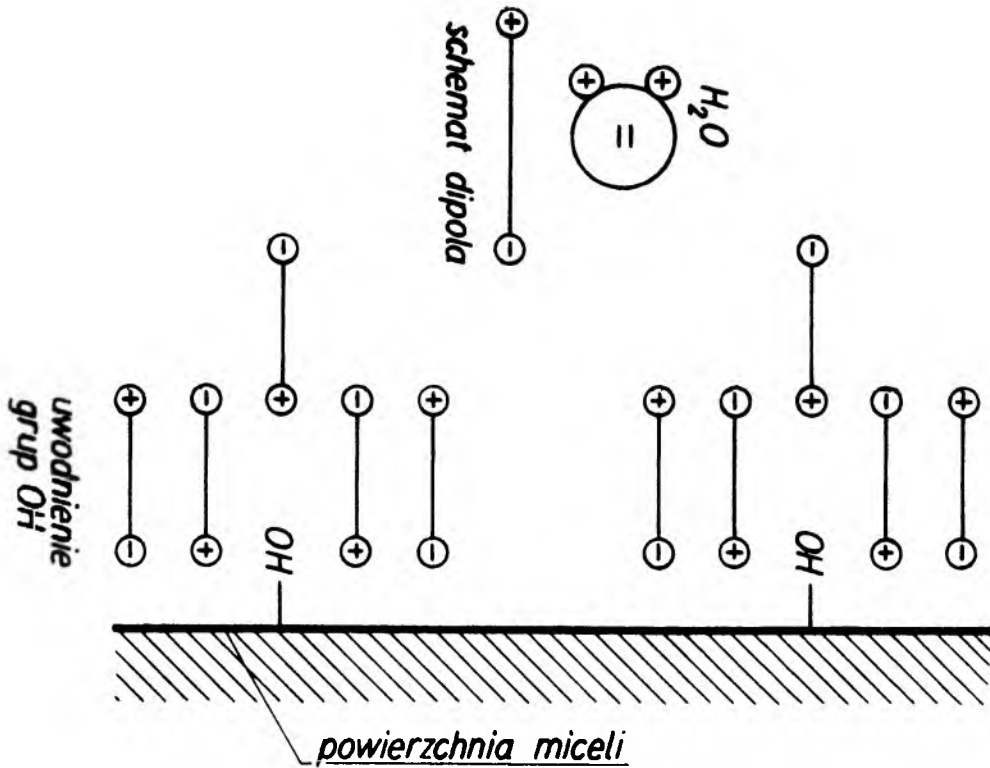
Ryc. 3. Kolejne stadia łączenia się łańcuchów celulozy w micelę frędzlową. Z Kollmanna, wg Kratky'ego



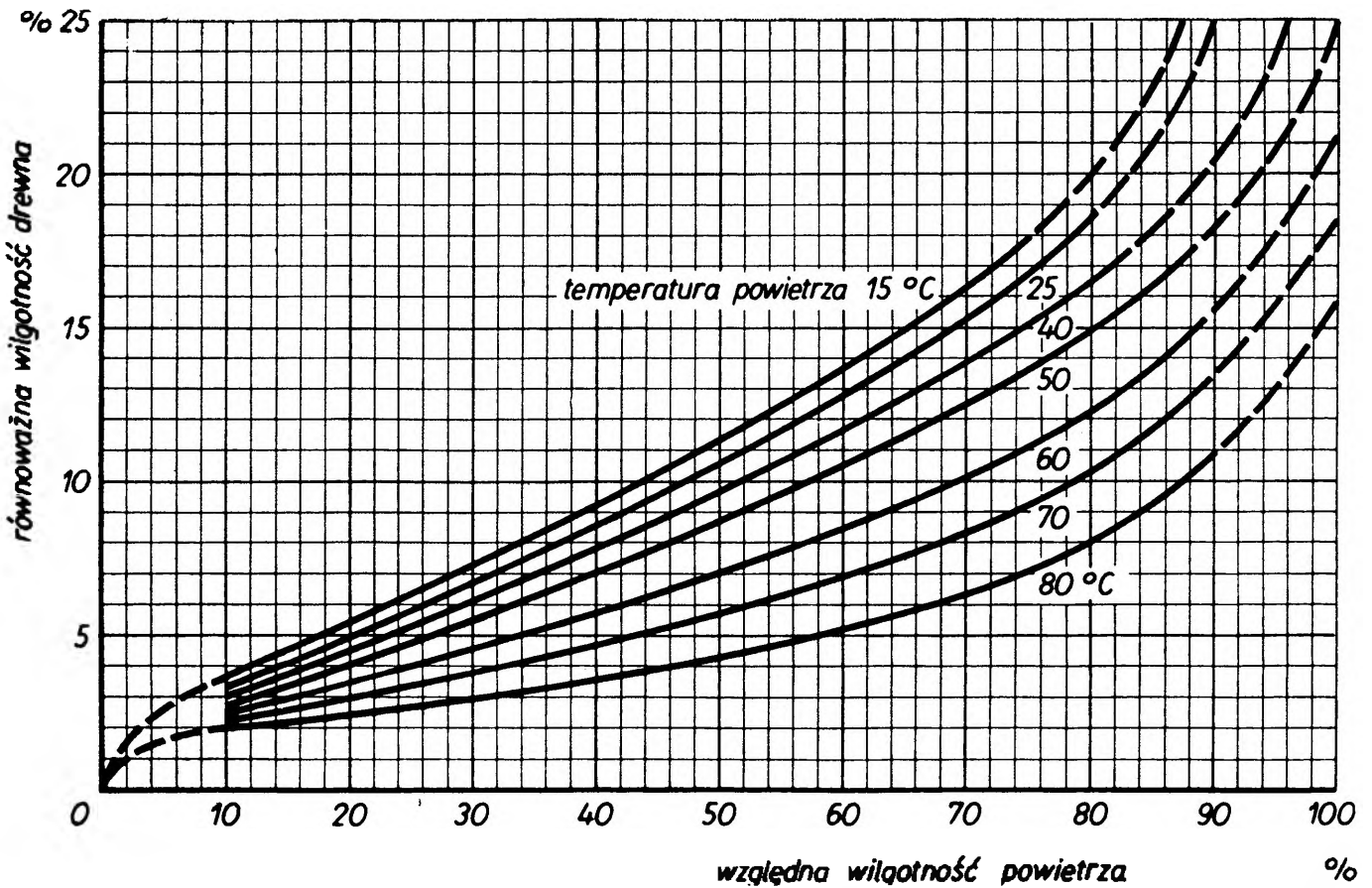
Ryc. 4. Schemat micelarniej budowy celulozy; uporządkowane przestrzennie micelle przetkane obszarami nieuporządkowanymi.
Z Malinowskiego, wg Frey-Wysslinga



Ryc. 5. Schemat submikroskopowej budowy drewna

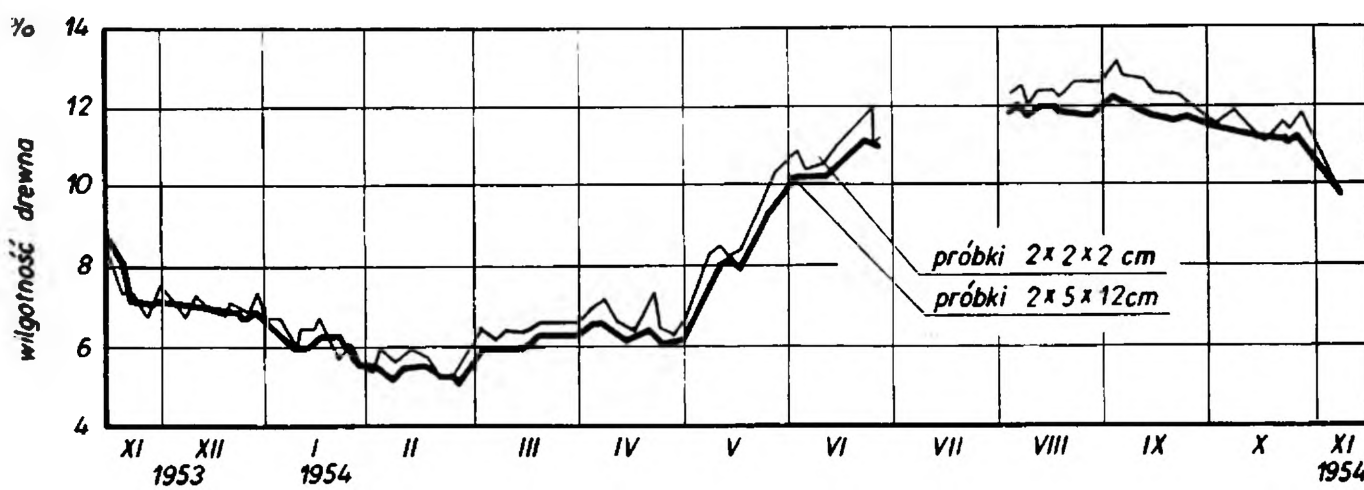
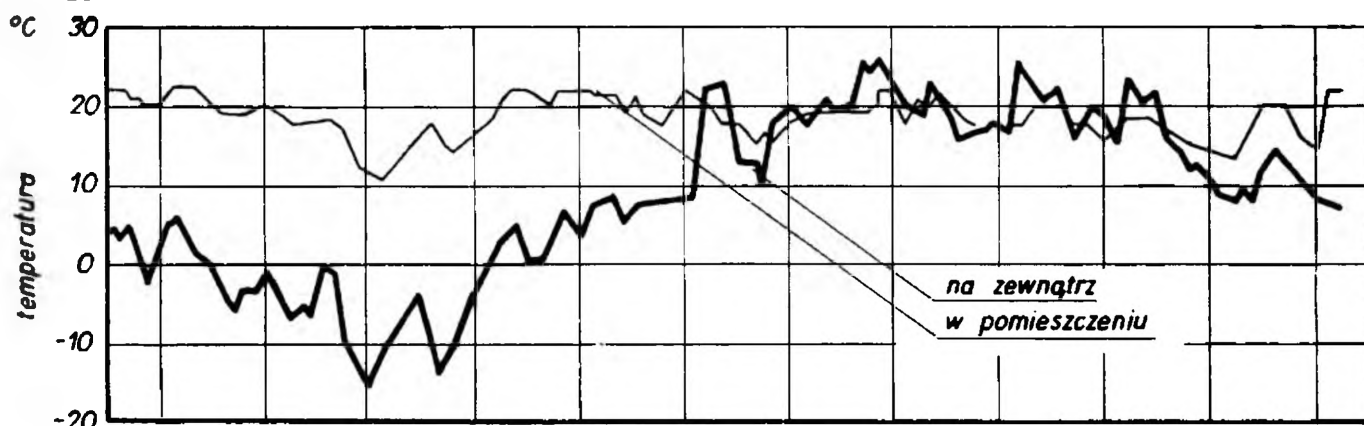
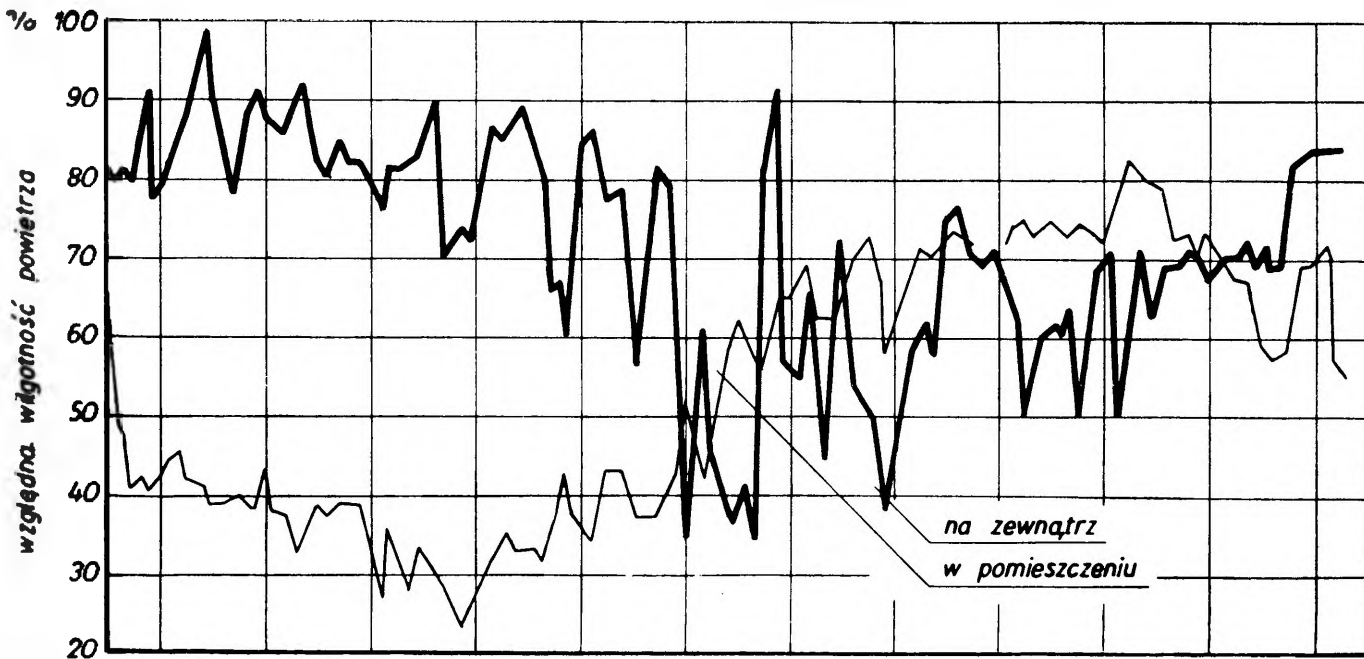
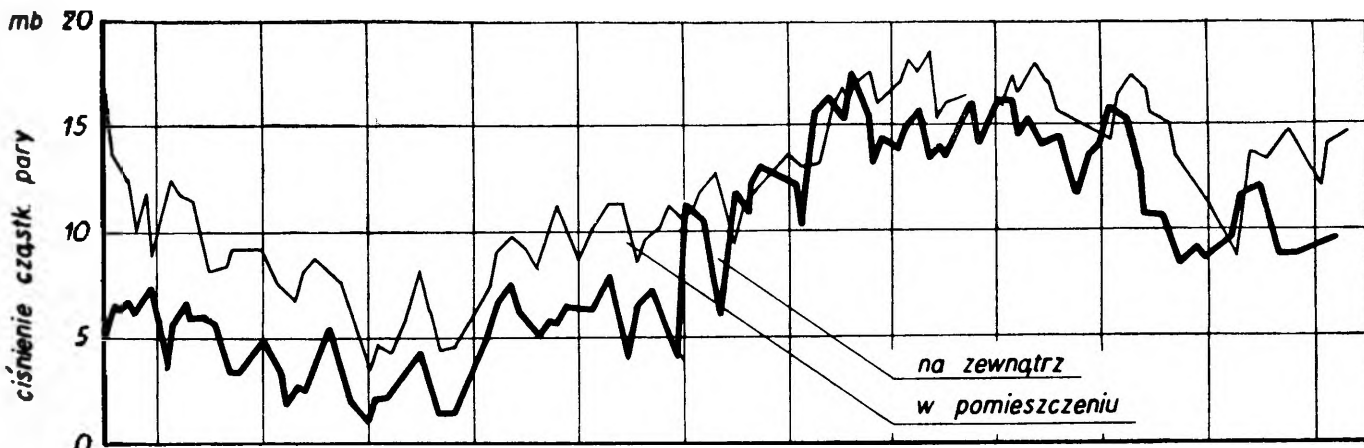


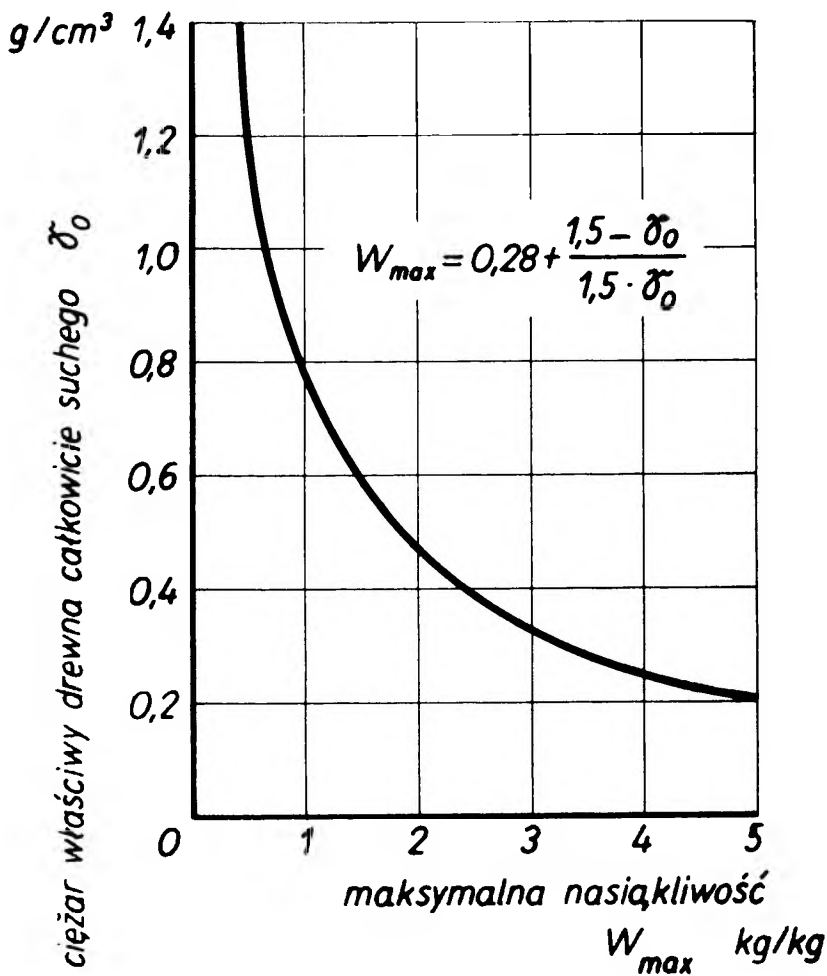
Ryc. 6. Uwodnienie grup OH na powierzchni miceli. Wg Frey-Wysslinga



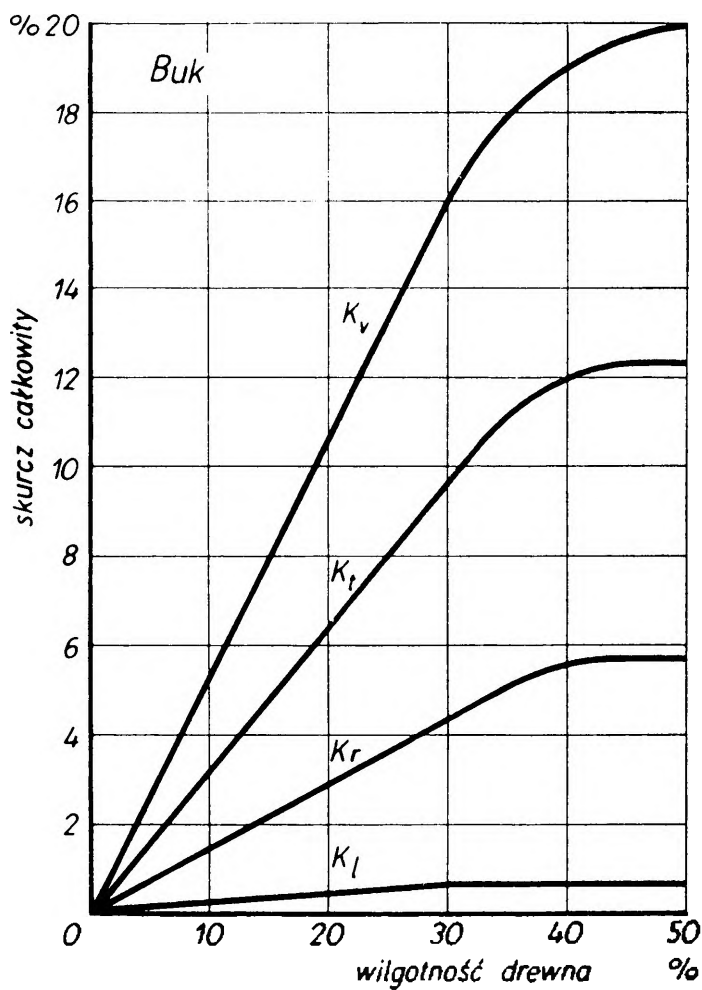
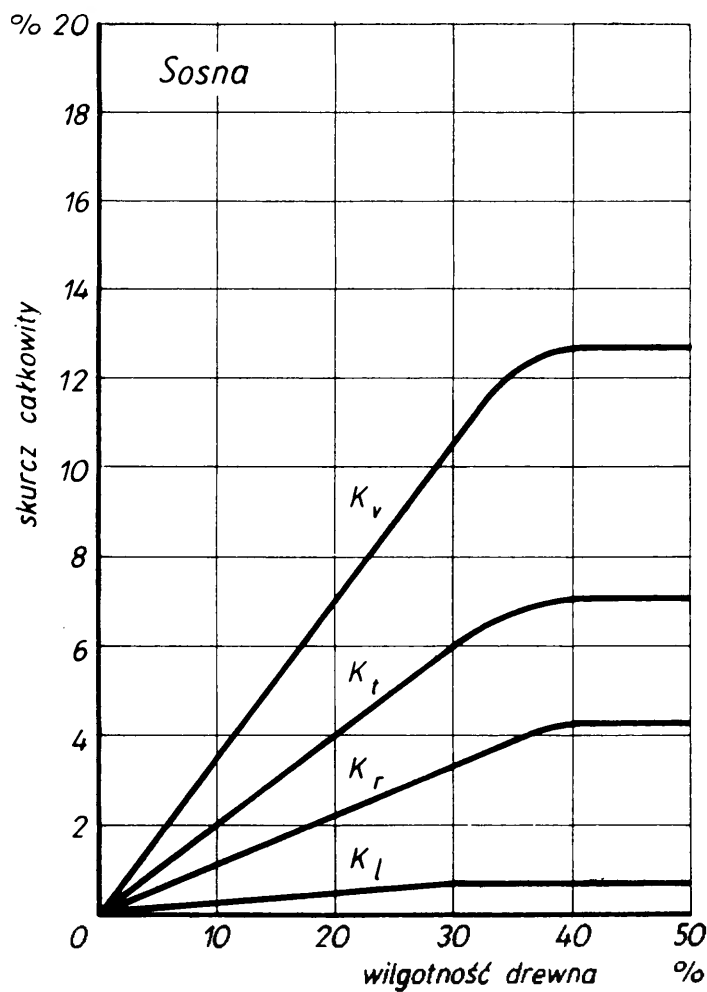
Ryc. 7. Równoważna wilgotność drewna; linie kreskowane pochodzą z ekstrapolacji

Ryc. 8. Zmiany wilgotności drewna w pomieszczeniu ogrzewanym centralnie na tle zmian parametrów powietrza. (W lipcu i pierwszych dniach sierpnia nie prowadzono obserwacji).



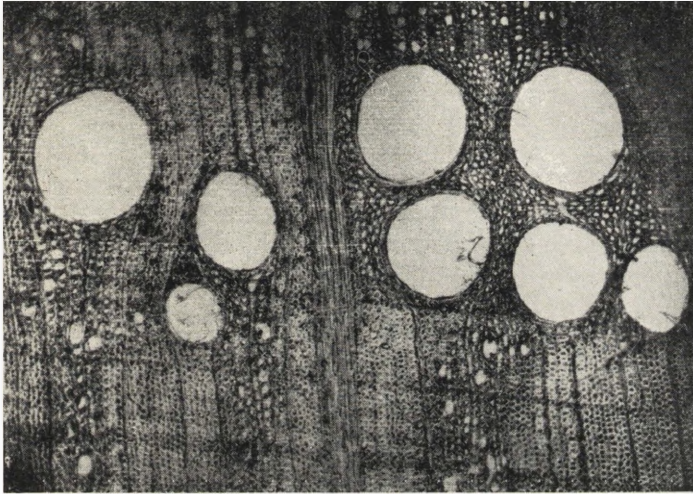
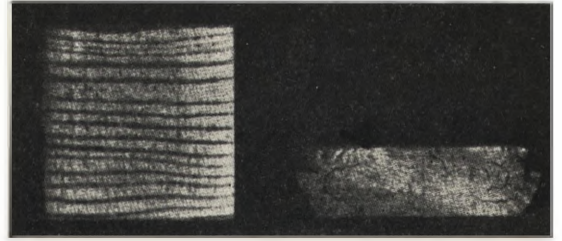


Ryc. 9. Nasiąkliwość w zależności od ciężaru właściwego drewna

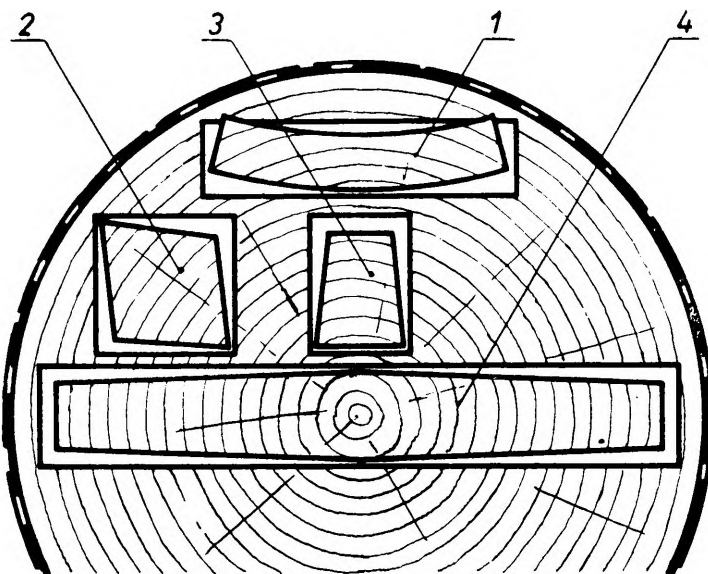


Ryc. 10. Całkowity skurcz drewna sosnowego i bukowego: K_v — skurcz objętościowy, K_t — skurcz styczny, K_r — skurcz promieniowy, K_l — skurcz wzdłuż włókien

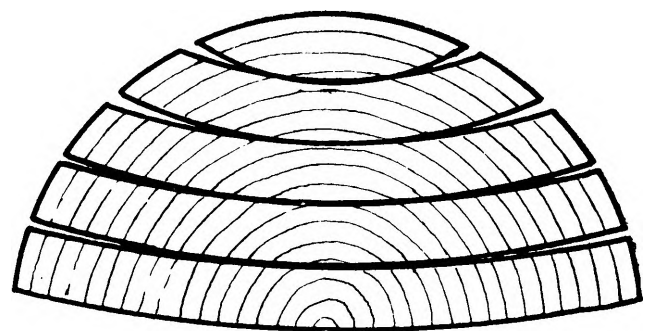
Ryc. 11. Bielaste drewno sosnowe w stanie pierwotnym oraz po sprasowaniu; zmniejszenie pierwotnego wymiaru o 63% na skutek zahamowania pęcznienia w kierunku promieniowym. Wg Perkitnego



Ryc. 12. Mikroskopowy obraz drewna dębowego, przekrój poprzeczny: a) drewno normalne, b) drewno sprasowane wewnątrz w kierunku promieniowym i stycznym. Wg Kordeckiego



Ryc. 13. Paczenie się tarcicy w zależności od umiejscowienia w kłodzie.



Ryc. 14. Paczenie się tarcicy w czasie wysychania.