

Maciej Ławniczak

BADANIA WPŁYWU ZMIAN WILGOTNOŚCI DREWNA
NA RELAKSACJĘ NAPRĘŻEŃ POWSTAŁYCH PODCZAS
JEGO UPRZEDNIEGO ZGIĘCIAИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ
НА РЕЛАКСАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ ВОЗНИКШИХ В ДРЕВЕСИНЕ
ПРИ ЕЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНОМ ИЗГИБЕINVESTIGATIONS ON EFFECTS OF MOISTURE CHANGES IN WOOD UPON
THE RELAXATION OF STRESSES DEVELOPED BY PRECEDING BENDING

WSTĘP

Najnowsze badania przeprowadzone przez Armstronga (1), Iwanowa (10, 22), Kollmanna (13), Leontiewa (22) wykazały, że drewno należy uznać za materiał posiadający częściowo cechy ciała sprężystego (elastycznego) oraz częściowo cechy ciała plastycznego (lepkiego).

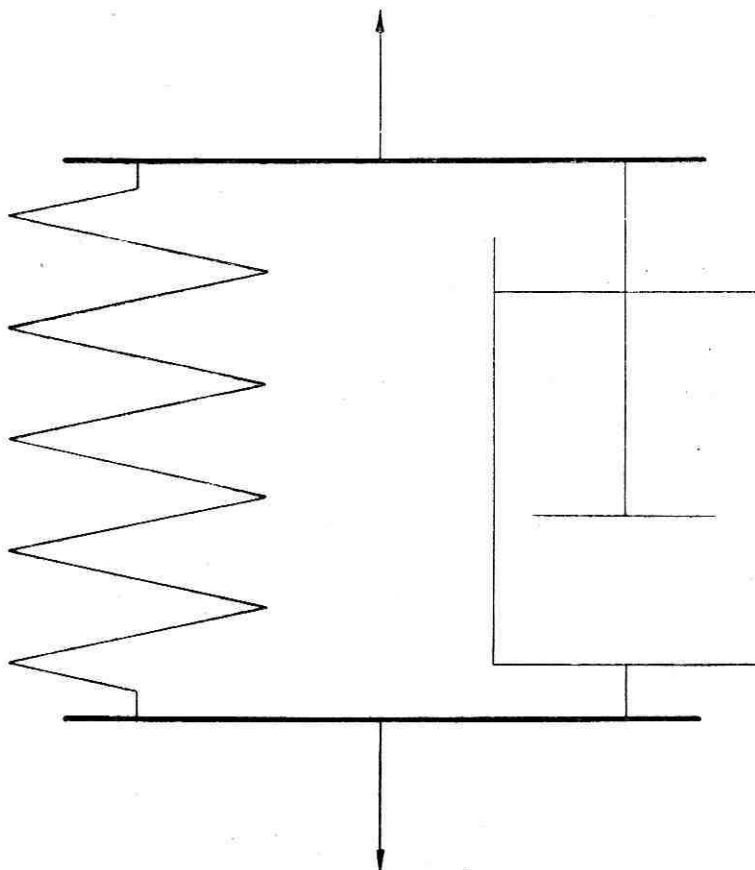
Przy rozpatrywaniu wzajemnie zalegających się w drewnie własności sprężystych i plastycznych na podstawie uproszczonej poglądowej metody schematów reologicznych (13, 19) stwierdzamy, że własnościom drewna najlepiej odpowiada model Voigta zawierający równolegle ze sobą sprzężone elementy sprężyste i elementy plastyczne (rys. 1).

Najogólniej można to sformułować tak, że w drewnie uporządkowane elementy szkieletu celulozowego odpowiadają elementom sprężystym, a bezpostaciowa substancja międzykomórkowa i odgrywająca rolę wypełniacza lignina — zespolonym z nimi równolegle elementom plastycznym.

Drewno jako materiał odznaczający się własnościami sprężysto-plastycznymi pod wpływem długotrwałego obciążenia odkształca się, inaczej mówiąc pełźnie. Natomiast przy zachowaniu odkształceń jako wielkości stałej, pod wpływem działania czasu występuje w drewnie relaksacja (spadek) naprężeń.

Pojęcie relaksacji naprężeń można zdefiniować następująco: relaksacja naprężeń jest to rozłożony w czasie t stopniowy spadek naprężeń

σ wywołanych w materiale przez obciążenie go siłą P , przy zachowaniu stałej wielkości odkształceń materiału ε . Ponieważ drewno jest materiałem higroskopijnym, przeto odnosząc wymienioną definicję relaksacji naprężeń do drewna należy przyjąć założenie, że wilgotność jego jest stała ($w = \text{const}$).



Rys. 1. Zespół symbolizujący materiał sprężysto-plastyczny (wg Voigta)

Z badań dotyczących wpływu czasu na relaksację naprężeń w drewnie o stałej wilgotności należy wymienić:

1. Badania Grossmana i Kingstona (7) z 1954 r. zmierzające do stwierdzenia, czy w drewnie zachodzi taka sama zależność liniowa pomiędzy relaksacją naprężeń a odkształceniami jak w tzw. materiałach elastyczno-lepkich.
2. Badania Grossmana (8) z 1954 r. zmierzające do wyrażenia wpływu czasu działania naprężeń na spadek ich wartości w drewnie o określonej wilgotności.

3. Badania Chuchrjanskiego (4) z 1955 r., w których stwierdzono, że relaksacja naprężeń w drewnie występuje zarówno poniżej, jak i powyżej tzw. umownej granicy proporcjonalności.

4. Badania Leontiewa (22) z 1956 r., w których stwierdzono, że znikome zmiany wilgotności drewna sprzyjają odkształcaniu się próbek.

Z badań Leontiewa wynika, że zjawisko relaksacji naprężeń będzie zachodzić w drewnie pod wpływem zmiany wilgotności drewna.

Zjawisko relaksacji naprężeń można najogólniej wytłumaczyć zdolnością przyjmowania przez strukturalne elementy materiału nowego stanu równowagi. Szybkość przyjmowania nowego stanu równowagi (położenia) przez te elementy materiału jest zależna od współczynnika tarcia wewnętrznego.

Fizyka nie ma dziś jeszcze jednolitego i wystarczająco jasnego poglądu na zjawisko tarcia wewnętrznego w materiałach sprężysto-plastycznych (11), do których zaliczamy również drewno. Współczynnik tarcia wewnętrznego uzależniony jest od struktury drewna, a przede wszystkim od jego wilgotności i temperatury.

Współczynnik tarcia wewnętrznego drewna będzie się zmniejszał szczególnie podczas jednoczesnego wzrostu wilgotności i temperatury drewna. Wzrost wilgotności i temperatury powoduje rozluźnienie struktury krystalicznej szkieletu celulozowego oraz zmiany w substancjach koloidalnych zawartych w błonie komórkowej, szczególnie w warstwach sklejających zbudowanych z ligniny i związków pektynowych. Następstwem tego jest osłabienie sił kohezji i rozluźnienie więzi międzykomórkowej, co prowadzi do wystąpienia zjawiska relaksacji naprężeń.

Zjawisko relaksacji naprężeń, jak wykazały doświadczenia zawarte w niniejszej pracy, występuje również w czasie suszenia drewna w podwyższonej temperaturze. Należy przypuszczać, że zasadniczą przyczyną powodującą relaksację naprężeń w czasie sztucznego suszenia drewna jest wzrost jego temperatury, który powoduje przejściowe zmniejszanie współczynnika tarcia wewnętrznego (zwiększanie plastyczności) oraz odparowanie wody, zawartej w drewnie, przy czym po ustaniu dopływu ciepła i obniżeniu się temperatury występuje trwałe utwardzenie naturalnego lepiszcza na skutek zmniejszenia się jego wilgotności.

Te próby wytłumaczenia zjawiska relaksacji naprężeń w czasie suszenia drewna mają charakter hipotetyczny. Szczegółowe bowiem wyjaśnienie występowania zjawiska relaksacji naprężeń w czasie suszenia drewna wymaga dodatkowych badań.

Z przytoczonych rozważań wynika, że wzrost wilgotności i temperatury drewna wywiera duży wpływ na relaksację naprężeń, gdyż ułatwia przemieszczanie się i przyjęcie nowego stanu równowagi przez strukturalne elementy drewna. Stąd wydaje się uzasadniona celowość przeprowadzenia badań zmierzających do stwierdzenia wpływu zmian wil-

gotności drewna na relaksację naprężeń. Przy tym za najważniejsze uznano badania dotyczące wpływu nawilżania i suszenia drewna na relaksację naprężeń powstałych w drewnie podczas jego uprzedniego zgięcia.

I. CEL PRACY

Celem pracy badawczej, którą wykonał autor w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna Wyższej Szkoły Rolniczej w Poznaniu, było zbadanie wpływu, jaki wywierają zmiany wilgotności drewna na naprężenia powstałe w czasie jego uprzedniego zgięcia. Za punkt wyjściowy przyjęto założenie, żeby przy zmniejszaniu się występujących w drewnie naprężeń strzałka ugięcia mimo zmian wilgotności nie ulegała zmianie.

Badania zmierzały do wyjaśnienia przebiegu relaksacji naprężeń powstałych w drewnie podczas jego uprzedniego zgięcia, zachodzącej pod wpływem zmiany wilgotności drewna i miały na celu określenie zakresu i dynamiki tej relaksacji przy nawilżaniu drewna w przedziale wilgotności higroskopijnej (0—30%) oraz przy wysychaniu drewna w przedziale od wilgotności odpowiadającej punktowi nasycenia włókien do stanu zupełnie suchego (30—0%).

Praktycznym celem pracy było stwierdzenie wpływu różnych zabiegów zmieniających wilgotność drewna na relaksację naprężeń powstałych w drewnie podczas jego uprzedniego zgięcia. Przez poznanie tego wpływu praca niniejsza zmierza pośrednio do ewentualnego wskazania takich zabiegów technologicznych, które w poszczególnych wypadkach będą mogły rozładować naprężenia w zgiętych elementach drewnianych.

II. METODYKA BADAŃ

Doświadczenia wchodzące w zakres niniejszej pracy wymagały wykonania następujących zasadniczych czynności:

- 1) zgięcia drewnianej beleczki przez obciążenie jej określoną siłą P_g powodującą wystąpienie naprężeń σ i strzałki ugięcia f ;
- 2) poddania uprzednio zgiętej drewnianej beleczki nawilżaniu lub suszeniu oraz stopniowemu zmniejszaniu siły obciążającej P_g w taki sposób, aby strzałka ugięcia beleczki f mimo zmian wilgotności drewna pozostała niezmienną;
- 3) obserwowania stopnia relaksacji naprężeń zachodzącej w czasie zmiany wilgotności drewna (poprzez pomiar malejącej siły obciążającej beleczkę).

Z tego zestawienia czynności wynikają następujące zadania metodyczne:

- 1) dobór materiału drzewnego i sposobu obciążenia siłą P_g badanej beleczki,

2) dobór zabiegów zmierzających do zmiany wilgotności badanego drewna,

3) dobór sposobu pomiaru relaksacji naprężeń.

Analizę tych zagadnień podano poniżej.

1. Dobór materiału drzewnego i sposobu obciążenia badanej beleczki

Dobór materiału drzewnego. Badania zdecydowano się przeprowadzić na dwóch typowych przedstawicielach drewna iglastego i liściastego, a mianowicie na drewnie sosnowym i bukowym.

Przy doborze wielkości próbek należało uwzględnić praktyczną użyteczność wyników doświadczeń. W celu uzyskania dostatecznie dużych odkształceń w postaci strzałki ugięcia, postanowiono do doświadczeń użyć beleczek o znacznej długości i przyjęto wymiary $20 \times 20 \times 700$ mm. Aby umożliwić ewentualne wykorzystanie wyników doświadczeń do celów praktycznych, część doświadczeń postanowiono wykonać na próbkach o wymiarach $40 \times 40 \times 1400$ mm.

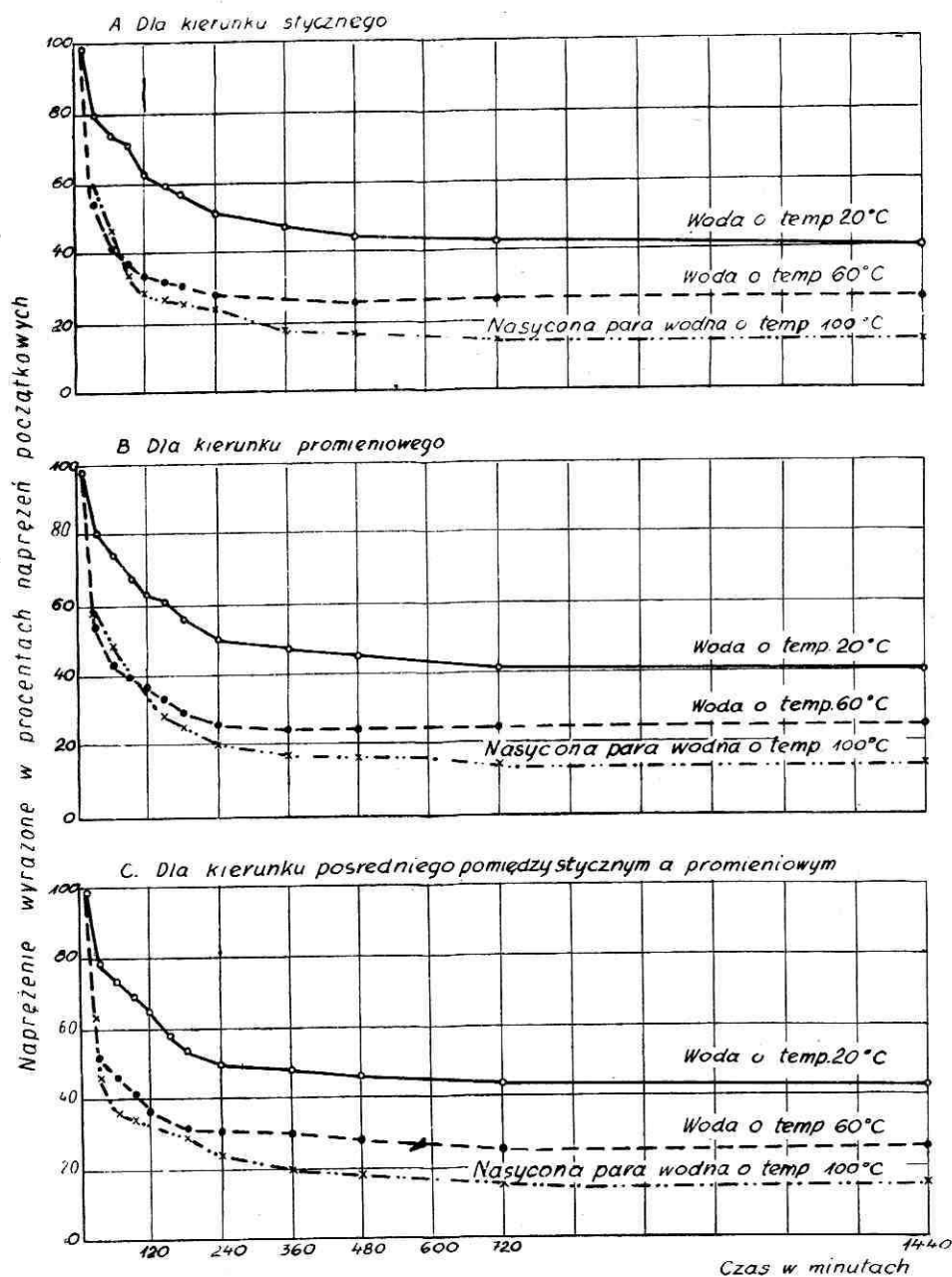
W celu stwierdzenia, jaki wpływ wywiera wzrost wilgotności drewna na relaksację naprężeń, zdecydowano się przeprowadzić doświadczenia na drewnie o wilgotności początkowej 0 i 15%. Natomiast dla stwierdzenia wpływu spadku wilgotności drewna na relaksację naprężeń, postanowiono przeprowadzić doświadczenia na drewnie o wilgotności początkowej zbliżonej do punktu nasycenia włókien, tzn. wynoszącej około 30%.

Oznaczanie wilgotności drewna przeprowadzono metodą suszarkowo-wagową.

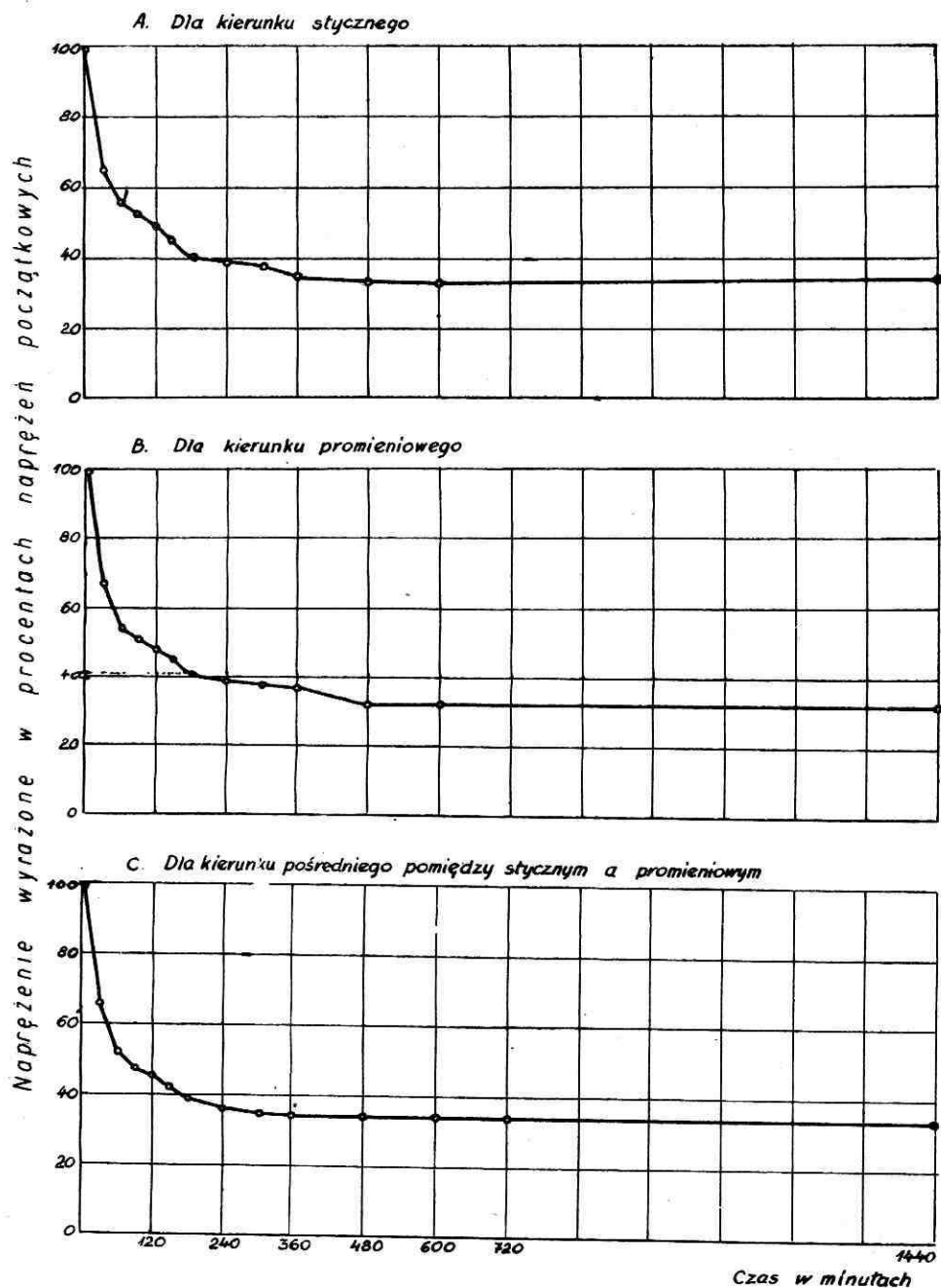
Dobór kierunku obciążania beleczek. Aby uzyskać odpowiedź na pytanie, czy obciążenie beleczki siłą P_g w kierunku stycznym lub promieniowym ma wpływ na relaksację naprężeń, postanowiono wykonać doświadczenia wstępne na drewnie sosnowym przy sile działającej prostopadle do przekroju promieniowego, stycznego oraz pośredniego pomiędzy przekrojem promieniowym a stycznym.

Wyniki doświadczeń wstępnych przedstawiono na rys. 2 i 3 (wartości średnie z trzech równorzędnych doświadczeń). Z rysunków tych wynika, że kierunek obciążania beleczek nie wywiera istotnego wpływu na przebieg relaksacji naprężeń występującej przy zmianie wilgotności beleczek. Wobec tego dalsze doświadczenia ograniczono do obciążania beleczek w kierunku prostopadłym do przekroju promieniowego.

Dobór sposobu zginania beleczek i obliczania naprężeń. Belecжки przeznaczone do badań swobodnie ułożono na dwóch podporach. Beleczkę obciążano odpowiednio dobraną siłą P_g w środku pomiędzy podporami.



Rys. 2. Relaksacja naprężeń zachodząca podczas nawilżania uprzednio zgiętych beleczek sosnowych o wilgotności początkowej 0%



Rys. 3. Relaksacja naprężeń zachodząca podczas suszenia uprzednio zgiętych beleczek sosnowych o wilgotności początkowej około 30%, w powietrzu o temperaturze 60°C i względnej wilgotności od 65 do 10%

Napężenia zginające obliczano według wzoru Naviera

$$R_{gw} = \frac{3P_g \cdot l}{2b \cdot h^2} \text{ kG/cm}^2.$$

Dobór wielkości początkowych naprężeń zginających. Aby ustalić najwłaściwsze napężenie początkowe, określono doświadczalnie wpływ różnej wielkości naprężeń początkowych na relaksację naprężeń zachodzącą podczas zmiany wilgotności drewna.

Doświadczenia wstępne przeprowadzono na drewnie sosnowym przy obciążeniach początkowych wynoszących 25, 50 i 75% napężenia niszczącego. Belecзки użyte do doświadczeń wstępnych miały wymiary $20 \times 20 \times 700$ mm. Rozstaw podpór wynosił 600 mm.

Wytrzymałość drewna sosnowego na zginanie statyczne, przy obciążaniu beleczek w kierunku promieniowym, wynosiła (wartość średnia z 10 próbek):

dla drewna o wilgotności 0% = 856 ± 45 kG/cm²,

dla drewna o wilgotności 30% = 716 ± 67 kG/cm².

Wobec tego dla drewna o wilgotności 0%

25% naprężeń niszczących = 214 kG/cm²,

50% naprężeń niszczących = 428 kG/cm²,

75% naprężeń niszczących = 642 kG/cm².

Natomiast dla drewna o wilgotności 30%

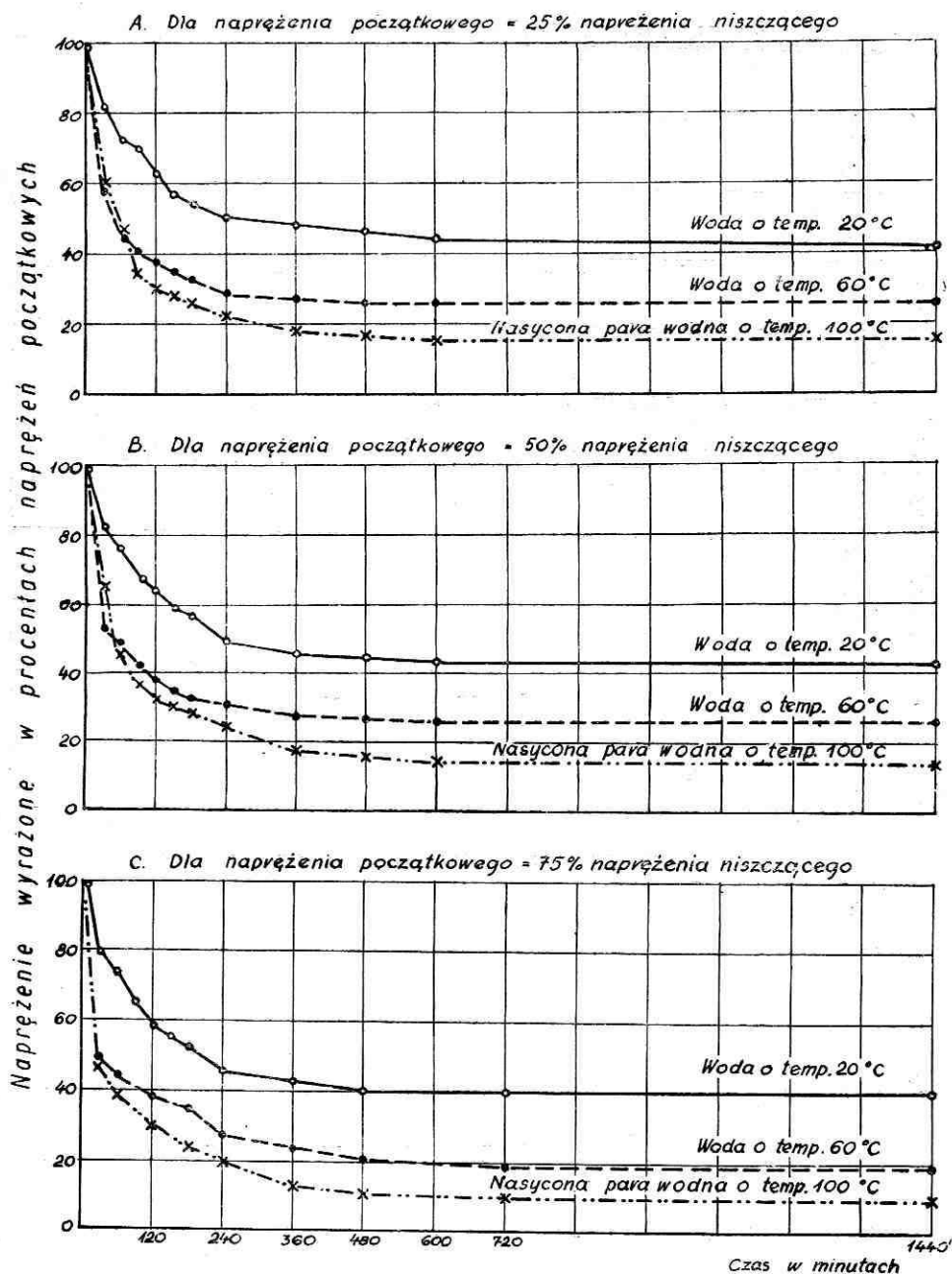
25% naprężeń niszczących = 179 kG/cm²,

50% naprężeń niszczących = 358 kG/cm²,

75% naprężeń niszczących = 537 kG/cm².

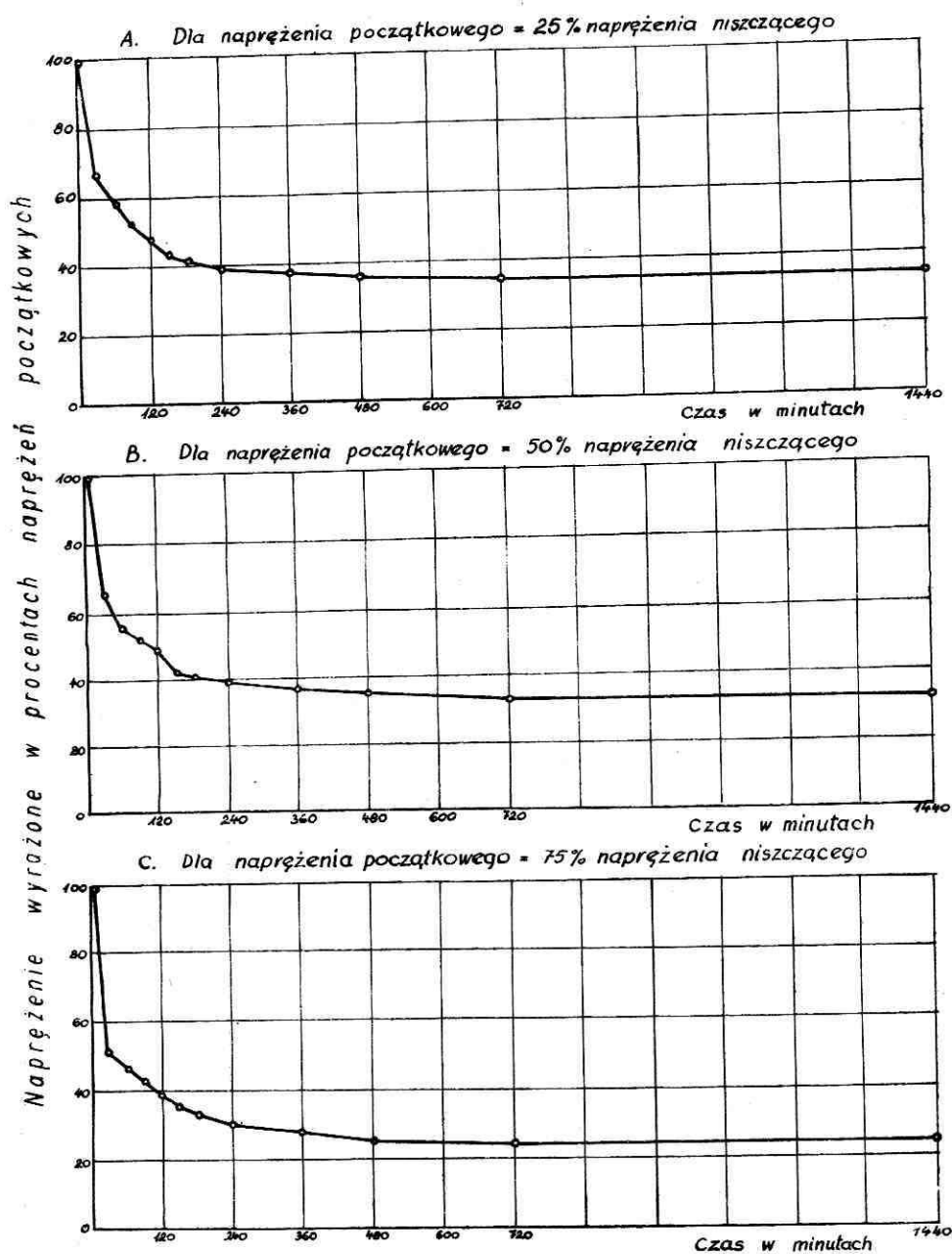
Wyniki doświadczeń dotyczące wpływu wielkości naprężeń początkowych na relaksację tych naprężeń zachodzącą podczas nawilżania i suszenia drewna zobrazowano na wykresach (rys. 4 i 5).

Krzywe przedstawione na wykresach wykreślono przyjmując wartości średnie z trzech równorzędnych doświadczeń. Wykazują one, że relaksacja naprężeń wyrażona w procentach naprężeń początkowych uzyskana przy naprężeniu początkowym 25 i 50% wytrzymałości drewna na zginanie statyczne jest w przybliżeniu jednakowa. Natomiast relaksacja naprężeń przy naprężeniu początkowym wynoszącym 75% wytrzymałości drewna na zginanie statyczne jest wyraźnie większa od wartości relaksacji naprężeń uzyskanej podczas obciążania beleczek siłą odpowiadającą 25 i 50% naprężeń niszczących. Wzrost relaksacji naprężeń przy obciążeniu wstępnym wynoszącym 75% naprężeń niszczących jest spowodowany najprawdopodobniej zwiększeniem się odkształceń plastycznych występujących wyraźnie po przekroczeniu tzw. granicy proporcjonalności. Granica proporcjonalności dla drewna użytego do doświadczeń wstępnych występowała podczas zginania statycznego przy naprężeniu wynoszącym około 65% naprężeń niszczących.



Rys. 4. Relaksacja naprężeń zachodząca podczas nawilżania beleczek sosnowych o wilgotności początkowej 0%

Na podstawie tych wyników doświadczeń wstępnych zdecydowano się przeprowadzić badania przy naprężeniu początkowym wynoszącym około 50% wytrzymałości drewna na zginanie statyczne. Przemawiał za tym



Rys. 5. Relaksacja naprężeń zachodząca podczas suszenia beleczek sosnowych o wilgotności początkowej około 30%, w powietrzu o temperaturze 60°C i względnej wilgotności od 65 do 10%

fakt, że przy naprężeniach wynoszących 25% naprężeń niszczących używano zbyt małą strzałkę ugięcia, natomiast przy naprężeniach wynoszą-

cych 75% naprężeń niszczących występował wzrost relaksacji naprężeń powodowany płynięciem drewna.

W celu zapewnienia porównywalności wyników badań drewna sosnowego i bukowego wszystkie dalsze doświadczenia wchodzące w zakres niniejszej pracy postanowiono wykonać przy naprężeniu początkowym wynoszącym 400 kG/cm^2 , tj. przy około 50% naprężenia niszczącego.

2. Dobór zabiegów zmierzających do zmiany wilgotności drewna

Przed wszystkim postanowiono zbadać wpływ wzrostu wilgotności drewna na relaksację naprężeń zawartych w drewnie uprzednio zgiętym.

Nawilżanie drewna można przeprowadzać przez działanie na drewno wilgotnego powietrza lub wody. Działanie nawilżające można zintensyfikować przez podwyższenie temperatury środowiska nawilżającego (11).

W związku z tym postanowiono stwierdzić, jaki wpływ na relaksację naprężeń wywierają następujące zabiegi nawilżające drewno o wilgotności początkowej 0 i 15%:

- a) nawilżanie wodą o temperaturze 20°C ,
- b) nawilżanie wodą o temperaturze 60°C ,
- c) nawilżanie nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C .

Z kolei zdecydowano się zbadać, jaki wpływ wywiera na relaksację naprężeń spadek wilgotności drewna. Suszenie drewna postanowiono przeprowadzić w powietrzu o stałej temperaturze wynoszącej 60°C , przy zmiennej wilgotności powietrza.

O doborze tych zabiegów zmierzających do zmiany wilgotności drewna zdecydował wzgląd wykorzystania ich w praktyce.

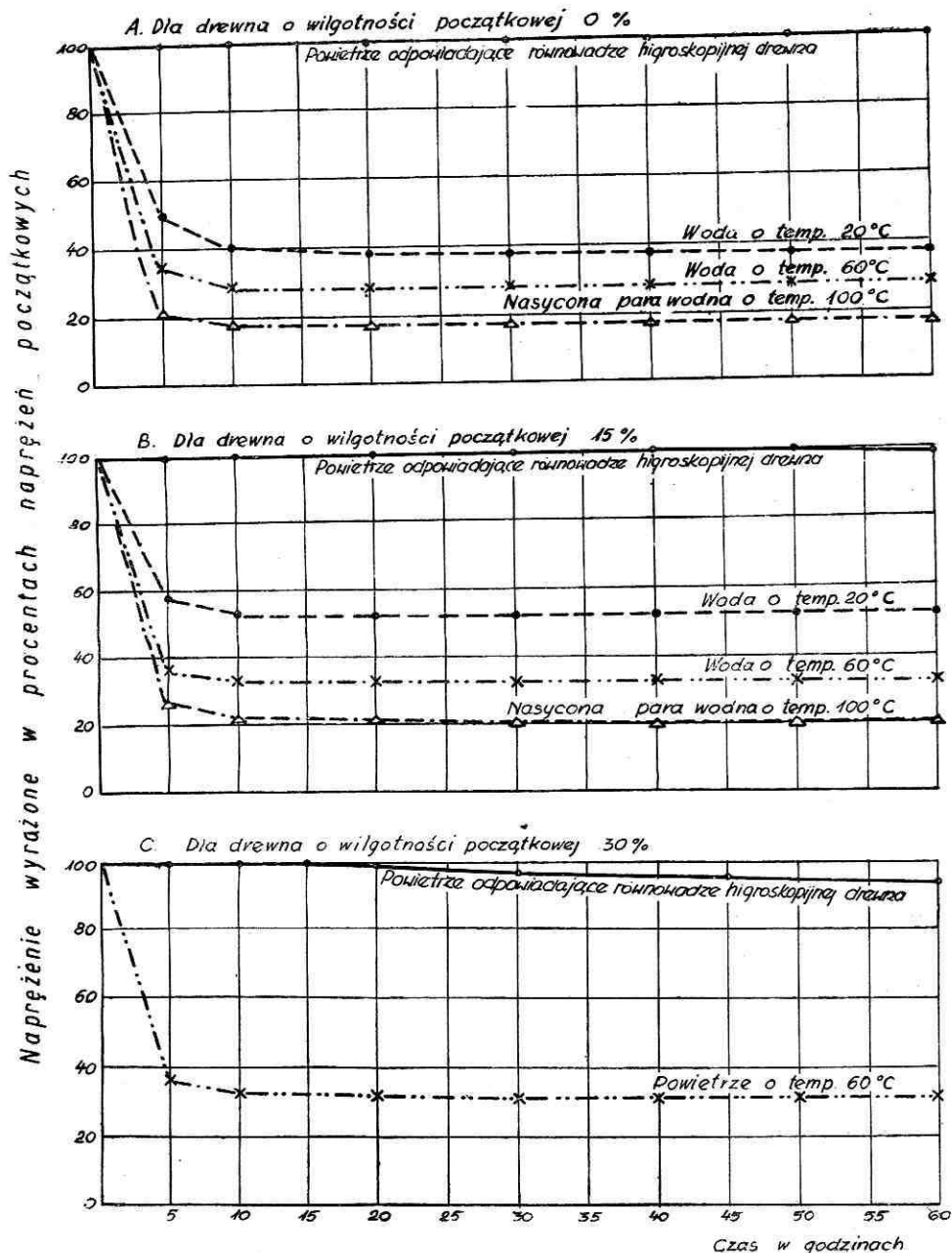
I wreszcie zdecydowano się przeprowadzić badanie zmierzające do ustalenia wpływu na relaksację naprężeń dwukrotnego kolejnego nawilżania i suszenia uprzednio zgiętego drewna. W związku z tym beleczki postanowiono kolejno przez okres 6 godzin nawilżać wodą o temperaturze 60°C i suszyć w powietrzu o temperaturze 60°C przy zmiennej wilgotności względnej.

Ze względu na to, że każdy z wymienionych zabiegów pociąga za sobą zmiany wilgotności drewna, śledzono nie tylko stopień relaksacji naprężeń, lecz także zmiany wilgotności badanego drewna.

Ponieważ badaną beleczkę umieszczono na dwóch podporach i obciążano, zachodziła pewna trudność w oznaczaniu jej wilgotności. Wobec tego postanowiono obserwować przebieg zmian wilgotności beleczki metodą pośrednią, polegającą na śledzeniu zmian wilgotności drewna na beleczce kontrolnej, pochodzącej z tej samej partii drewna, z jakiej pochodzi beleczka właściwa, przy poddaniu jej całkowicie identycznym zabiegom zmieniającym wilgotność drewna. Można bowiem przyjąć, że dwie beleczki pochodzące z bezpośredniego sąsiedztwa, czyli tzw. beleczki

blizniacze, poddane identycznym zabiegom będą w przybliżeniu tak samo zmieniały swą wilgotność.

Dla określenia czasu doświadczeń przeprowadzono doświadczenia orientacyjne, których wyniki przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Wpływ czasu nawilżania i suszenia beleczek sosnowych na relaksację naprężeń
A i B — podczas nawilżania, C — podczas suszenia

Krzywe przedstawione na rys. 6 wykreślono na podstawie wartości średnich uzyskanych z trzech równorzędnych doświadczeń.

Z rys. 6 wynika, że podczas nawilżania i suszenia beleczek występuje relaksacja naprężeń. Osiąga ona najwyższą wartość w czasie pierwszych 5 godzin trwania doświadczenia, w dalszym okresie natomiast coraz bardziej słabnie i w zasadzie ustala się w czasie do 24 godzin. Nie jest to równoznaczne ze stwierdzeniem, że relaksacja naprężeń w ciągu 24 godzin jest już całkowicie zakończona, jednakże dalsze jej wartości są niewspółmiernie małe i praktycznie biorąc równe 0. Należy w tym miejscu dodać, co już uprzednio uzasadniono we wstępie, że całkowita relaksacja naprężeń nie jest osiągalna.

Na podstawie wyników doświadczenia orientacyjnego uznano za wystarczające przeprowadzanie obserwacji relaksacji naprężeń w okresie do 24 godzin.

Zaznaczyć należy, że z teoretycznego punktu widzenia zmiany relaksacyjne widoczne na rys. 6 spowodowane są współdziałaniem zmian wilgotności drewna i czasu trwania obciążeń.

Stąd wynika konieczność określenia udziału czynnika czasu w kształtowaniu i przebiegu relaksacji naprężeń podczas zmiany wilgotności drewna.

Aby uzyskać odpowiedź na to pytanie, przeprowadzono doświadczenia pomocnicze, które wykazały, że działanie czynnika czasu w okresie do 24 godzin jest praktycznie nieistotne. Wobec tego w dalszych obserwacjach czynnik czasu pominięto. Stanowisko to uzasadnia rys. 6, na którym zobrazowano przebieg relaksacji naprężeń w drewnie o wilgotności 0% bez nawilżania (linia prosta równoległa do osi odciętych). Natomiast drewno o wilgotności 15 i 30% wykazuje nieznaczną, praktycznie biorąc nieistotną relaksację naprężeń.

3. Sposób pomiaru relaksacji naprężeń

W związku z opisanymi założeniami metodycznymi relaksację naprężeń spowodowaną zmianą wilgotności uprzednio zgiętej beleczki postanowiono określać przez wykonanie następujących czynności:

- utrzymanie uzyskanej podczas obciążenia beleczki strzałki ugięcia f jako wielkości stałej, przez bieżące zmniejszanie siły obciążającej P_g ,
- dokładny pomiar co 30 minut malejącej siły obciążającej P_g ,
- obliczanie relaksacji naprężeń na podstawie malejącej wartości siły obciążającej P_g , przy założeniu, że wymiary beleczki pozostają niezmiennie.

Aby stwierdzić zależność zachodzącą pomiędzy wzrostem i spadkiem wilgotności drewna a relaksacją naprężeń wyrażoną w procentach naprężeń początkowych, postanowiono wartość relaksacji naprężeń odnieść do zmiany wilgotności drewna o jeden procent.

Wartość relaksacji naprężeń wyrażoną w procentach naprężeń początkowych przy zmianie wilgotności drewna o jeden procent (podczas nawilżania drewna od 0 do 30% i podczas suszenia drewna od 30 do 10%) postanowiono określać nazwą „współczynnik relaksacji naprężeń”.

Współczynnik relaksacji naprężeń obliczano według wzoru

$$W_r = \frac{\sigma_p - \sigma_b}{\sigma_p \cdot \Delta_w} 100\%,$$

gdzie

W_r — współczynnik relaksacji naprężeń w %,

σ_p — naprężenie początkowe w kG/cm^2 ,

σ_b — naprężenie bieżące w kG/cm^2 przy wilgotności w ;

Δ_w — różnica wilgotności.

Do przeprowadzenia badań omówionej metodyki skonstruowano specjalną aparaturę badawczą.

III. OPIS PRZEPROWADZONYCH DOŚWIADCZEŃ

1. Przygotowanie materiału drzewnego

W celu otrzymania do doświadczeń jak najbardziej jednorodnego materiału drzewnego przetarto metodą ćwiartkową dłużycę sosnową oraz dłużycę bukową na bale grubości 50 mm. Ćwiartki przecierano w kierunku promieniowym.

Z otrzymanych bali, z tej samej strefy przyrostów rocznych, wycięto przy użyciu tarczówki część beleczek o wymiarach $50 \times 50 \times 2830$ mm oraz część o wymiarach $22 \times 22 \times 1430$ mm przestrzegając zasady, ażeby przebieg słoików był równoległy do jednego z boków przekroju poprzecznego elementu. Belecзки oznaczone symbolem A , B , C , jako bezpośrednio sąsiadujące ze sobą, przeznaczono do trzech równorzędnych doświadczeń. Belecзки z desek sosnowych wyrobiono z przyobwodowej partii twardełowej przylegającej bezpośrednio do bielu. Następnie belecзки sosnowe i bukowe doprowadzono przez klimatyzowanie do wilgotności wymaganej na początku doświadczenia, po czym obrobiono je na strugarce grubościowej do wymiarów: pierwszą partię — $20 \times 20 \times 1430$ mm, drugą partię — $40 \times 40 \times 2830$ mm.

Z przygotowanych w ten sposób beleczek wyrobiono: z pierwszej partii — po dwie belecзки bliźniacze o długości 700 mm, z drugiej partii — po dwie belecázky bliźniacze o długości 1400 mm, przy czym jedną przeznaczono do badania relaksacji naprężeń, drugą do określania zmian wilgotności drewna.

Z drewna sosnowego wyrobiono 220 beleczek o wymiarach $20 \times 20 \times 700$ mm (z czego 96 zużyto do doświadczeń wstępnych) oraz 120 beleczek o wymiarach $40 \times 40 \times 1400$ mm.

Dla każdej serii równorzędnych doświadczeń przeznaczono 3 beleczki (A, B, C) do badania relaksacji naprężeń oraz 3 beleczki (A_1, B_1, C_1) do określania zmian wilgotności drewna.

Użycie do doświadczeń beleczek wyrobionych z jednej dłuźnicy i z tych samych stref przyrostów rocznych miało na celu wyeliminowanie wpływu różnorodności struktury materiału drzewnego na wyniki doświadczeń.

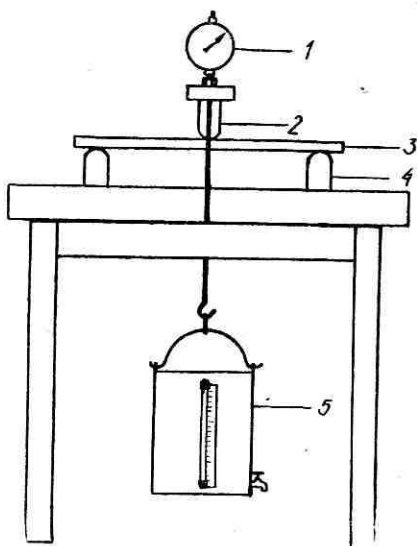
Średni ciężar właściwy drewna użytego do doświadczeń wynosił przy wilgotności 15%: dla drewna sosnowego — $0,54 \text{ G/cm}^3$, dla drewna bukowego — $0,61 \text{ G/cm}^3$.

Beleczki doprowadzono do wilgotności 0, 15 i 30% w sposób następujący.

Beleczki o wilgotności 0% otrzymywano przez suszenie w ciągu 16 godzin w powietrzu o temperaturze 60°C , a następnie aż do chwili ustalenia się ciężaru — w temperaturze $100 \pm 5^\circ\text{C}$ w suszarce elektrycznej z automatyczną termoregulacją.

Beleczki o wilgotności 15% otrzymano przez sezonowanie w okresie 6 tygodni w atmosferze pracowni oraz przez klimatyzowanie przez 120 dni w komorze, w której względna wilgotność powietrza wynosiła 80% przy temperaturze 20°C . Powietrze doprowadzono do względnej wilgotności 80% przy użyciu kwasu siarkowego o ciężarze właściwym $1,21 \text{ G/cm}^3$, tzn. o koncentracji 28,5%.

Beleczki o wilgotności 30% uzyskano przez podsuszenie do wilgotności zbliżonej do 30% w atmosferze pracowni oraz przez umieszczenie na okres 60 dni w komorze klimatyzacyjnej, w której znajdowało się powietrze o względnej wilgotności około 98%.



Rys. 7. Schemat urządzenia do badania relaksacji naprężeń

1 — mikromierz tarczowy, 2 — napora, 3 — beleczka, 4 — podpory, 5 — obciążenie w postaci zbiornika z wodą

2. Zginanie beleczek

Zginanie beleczek przeprowadzono na urządzeniu (przedstawionym schematycznie na rys. 7) w sposób następujący. Beleczkę umieszczano swobodnie na dwóch podporach o rozstawie 600 lub 1200 mm. W środku

odległości między podporami obciążano beleczkę siłą P_g , co powodowało ugięcie się beleczki o strzałkę f . Wielkość siły obciążającej P_g regulowano ilością wody zawartej w zbiorniku obciążającym, co umożliwiało zmiany wielkości siły w sposób ciągły.

3. Działanie na beleczkę czynnikami zmieniającymi wilgotność drewna

W celu wywołania zmian w wilgotności drewna urządzenie wraz ze zgiętą beleczką umieszczano w odpowiednio zbudowanej komorze w ten sposób, że górna część napory wraz z mikromierzem tarczowym znajdowała się na zewnątrz komory. Podczas nawilżania beleczek komorę napełniano wodą ogrzaną do wymaganej temperatury (utrzymanie stałej temperatury odbywało się za pomocą termostatu) lub nasyconą parą wodną doprowadzaną bieżąco z generatora pary.

W czasie suszenia beleczek do komory wmontowano urządzenie grzejne z termoregulacją, które ogrzewało powietrze do temperatury 60°C . Względna wilgotność powietrza w czasie suszenia beleczek była nieregulowana. Beleczki wprowadzono do komory po ogrzaniu powietrza do 60°C .

4. Obserwacja przebiegu relaksacji naprężeń i zmian wilgotności drewna

W czasie trwania doświadczeń obserwowano relaksację naprężeń oraz wzrost albo spadek wilgotności beleczek.

Relaksację naprężeń powstałą w drewnie pod wpływem zmiany jego wilgotności stwierdzano w sposób następujący. Odkształcenie powstałe pod wpływem obciążenia beleczek siłą P_g w postaci strzałki ugięcia f w czasie trwania doświadczeń utrzymywano jako wielkość stałą. O występującej zmianie wielkości strzałki ugięcia beleczki dawał znać umieszczony ponad beleczką mikromierz tarczowy. Przy wychyleniu się mikromierza tarczowego o 0,005 mm, niezwłocznie zmniejszano siłę obciążającą P_g przez odprowadzenie ze zbiornika obciążającego takiej ilości wody, po której usunięciu mikromierz tarczowy powracał do położenia wyjściowego. Ubytek wody oznaczano wagowo. Następnie każdorazowo obliczano pozostałą siłę obciążającą P_{gn} przez obliczenie różnicy pomiędzy ciężarem wody zawartej poprzednio w zbiorniku a ciężarem wody doprowadzonej w danym okresie czasu ze zbiornika obciążającego. Uzyskane wartości siły obciążającej P_{gn} przeliczano na naprężenia w kG/cm^2 za pomocą wzoru Naviera zakładając, że wymiary beleczki są wartością stałą.

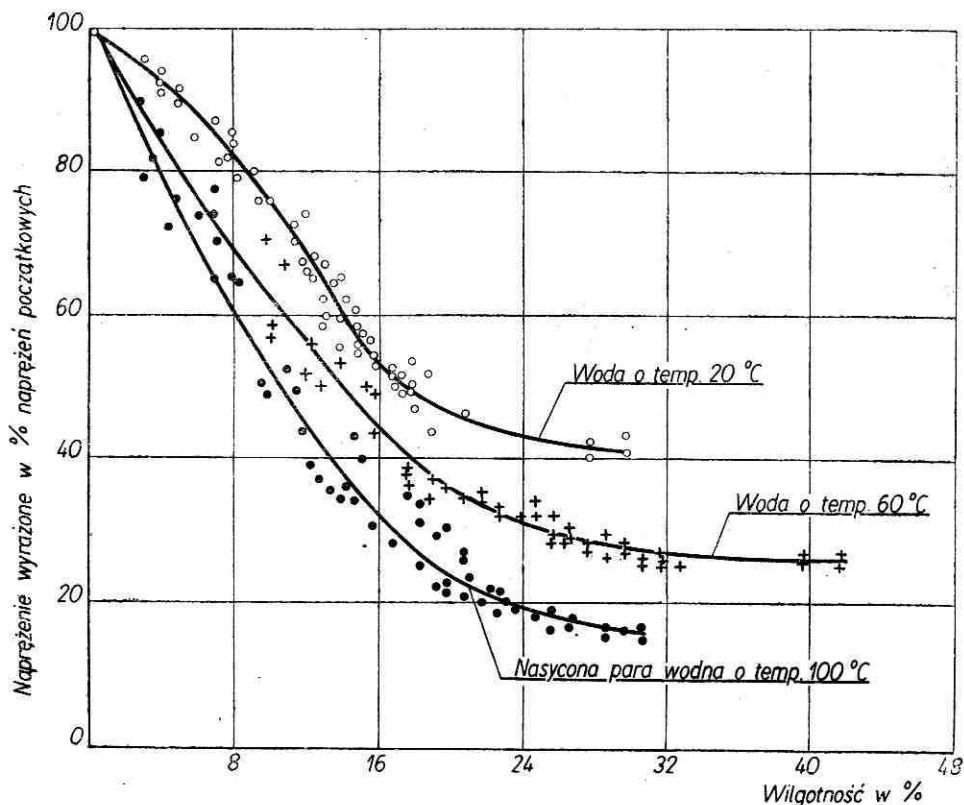
Zmiany zachodzące w wilgotności badanych beleczek stwierdzano pośrednio na kontrolnych beleczkach bliźniaczych, które znajdowały się

w identycznych warunkach co beleczki właściwe. Wilgotność poszczególnych warstw przekroju poprzecznego beleczek określano metodą suszarkowo-wagową.

IV. WYNIKI DOŚWIADCZEŃ I ICH ANALIZA

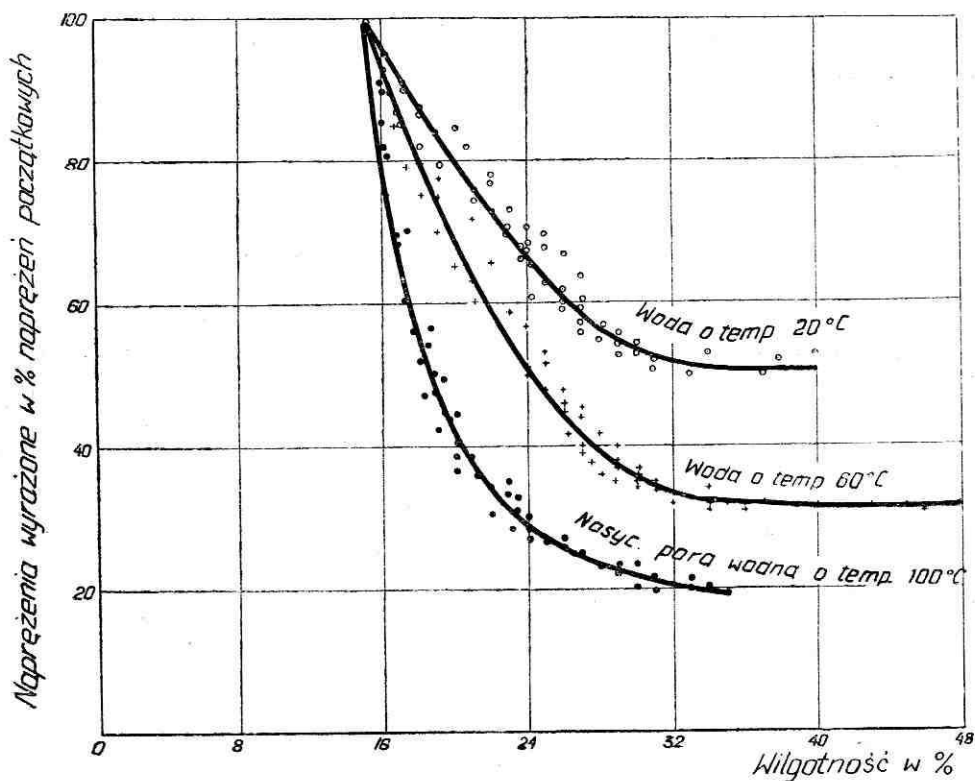
1. Wpływ nawilżania drewna na relaksację naprężeń powstałych podczas jego zgięcia

Wyniki doświadczeń zmierzających do stwierdzenia zależności pomiędzy wzrostem wilgotności drewna a relaksacją naprężeń zobrazowano na rys. 8 i 9.



Rys. 8. Zależność pomiędzy wilgotnością drewna a relaksacją naprężeń zachodząca w beleczkach o wilgotności początkowej 0%

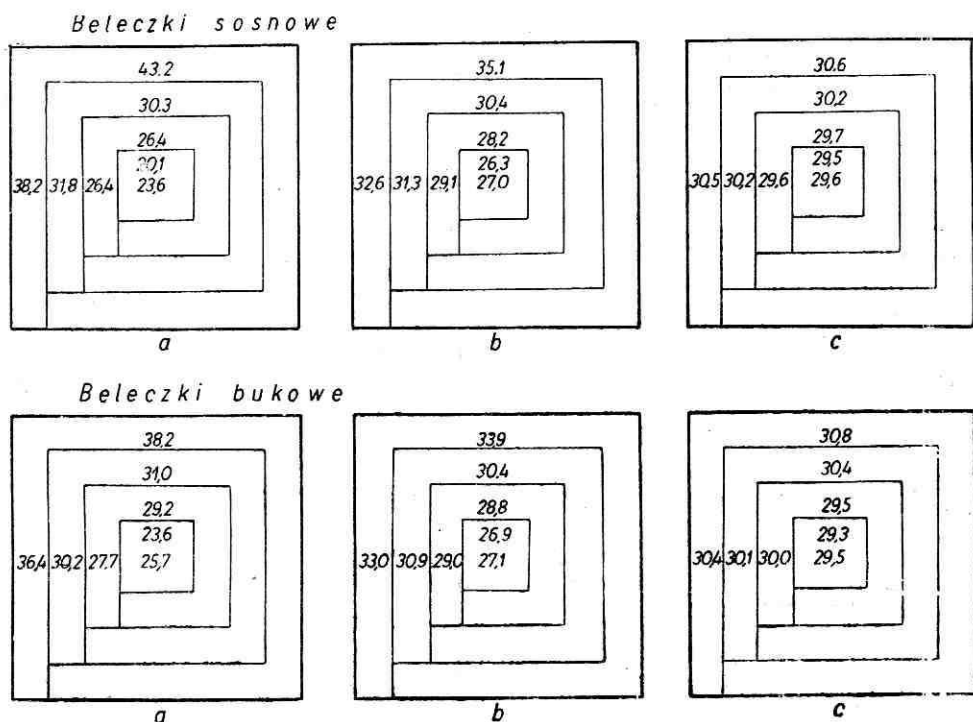
Z rysunków tych wynika, że podczas nawilżania drewna do wilgotności średniej około 30% naprężenia zawarte w drewnie ulegają relaksacji. Osiągnięta podczas doświadczeń średnia wilgotność 30% nie odpowiada jednakże punktowi nasycenia włókien. Przy nawilżaniu beleczek przez zanurzenie ich w wodzie występowało jednocześnie adsorbowanie wody



Rys. 9. Zależność pomiędzy wilgotnością drewna a relaksacją naprężeń zachodząca w beleczkach o wilgotności początkowej 15%

higroskopijnej i wchłanianie wody wolnej. W związku z tym rozpatrzono dodatkowo rozkład wilgotności na przekroju poprzecznym beleczek w chwili osiągnięcia przez nie średniej wilgotności około 30% (rys. 10). Z rys. 10 wynika, jak było do przewidzenia, że gdy beleczki osiągnęły średnią wilgotność około 30%, zewnętrzne warstwy beleczek wykazywały wilgotność wyższą od wilgotności odpowiadającej punktowi nasycenia włókien, a warstwy środkowe wilgotność niższą od 30%.

Rozkład wilgotności na przekroju poprzecznym beleczek jest uzależniony od temperatury wody i rodzaju środowiska użytego do nawilżania; im wyższa temperatura wody, tym równomierniejszy jest rozkład wilgotności. Najmniejsze zróżnicowanie wilgotności wystąpiło w beleczkach nawilżanych nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C. Porównując rozkład wilgotności na przekroju poprzecznym beleczek sosnowych i beleczek bukowych oraz beleczek o wilgotności początkowej 0 i 15% stwierdzamy, że przy średniej wilgotności beleczek 30% bardziej równomierny rozkład wilgotności występuje w beleczkach bukowych i w beleczkach o wilgotności początkowej 15% niż w beleczkach sosnowych

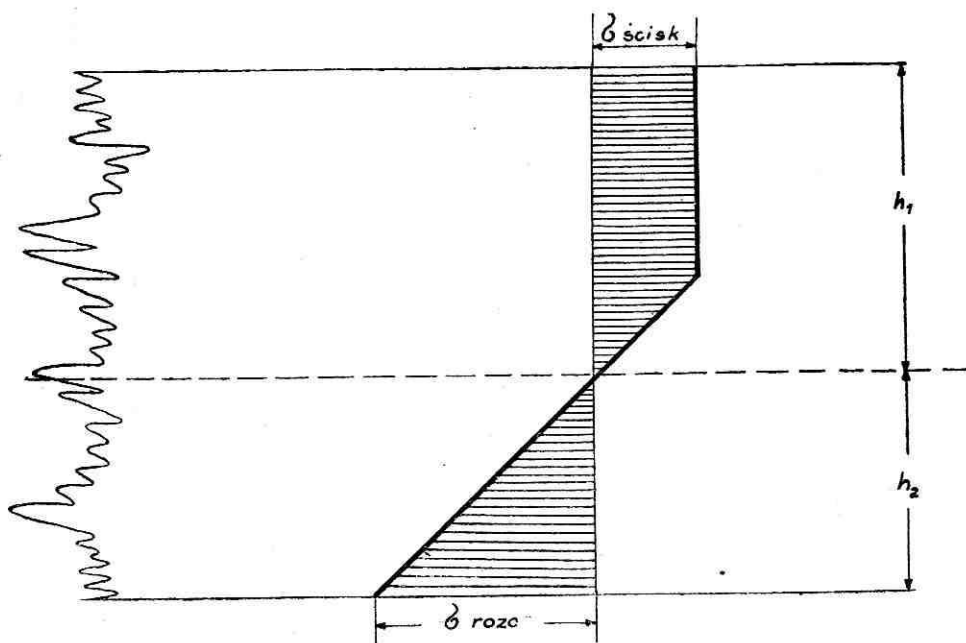


Rys. 10. Rozkład wilgotności w beleczkach o wymiarach $40 \times 40 \times 1400$ mm w chwili osiągnięcia przez nie średniej wilgotności 30% i nawilżanych
 a — wodą o temperaturze 20°C , b — wodą o temperaturze 60°C , c — nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C (pionowo oznaczono wartości rozkładu wilgotności dla drewna o wilgotności początkowej 0%, poziomo — dla drewna o wilgotności początkowej 15%)

i w beleczkach o wilgotności początkowej 0%. Największe zróżnicowanie wilgotności na przekroju poprzecznym występuje w beleczkach nawilżanych wodą o temperaturze 20°C . W tym przypadku relaksacja naprężeń trwała również do chwili osiągnięcia przez drewno średniej wilgotności 30%.

W celu wyjaśnienia tego faktu należy ponadto rozpatrzyć rozkład naprężeń występujący na przekroju poprzecznym podczas zginania drewna (rys. 11). Rozpatrując zależność zachodzącą pomiędzy rozkładem wilgotności na przekroju poprzecznym beleczek a rozkładem naprężeń dochodzimy do wniosku, że decydujący wpływ na relaksację naprężeń wywiera wzrost wilgotności warstw zewnętrznych beleczek, które znajdują się pod działaniem największych naprężeń rozciągających i ściskających.

Wpływ wilgotności drewna na relaksację naprężeń. Przy analizie wpływu wilgotności drewna na relaksację naprężeń za kryterium porównawcze przyjęto współczynnik relaksacji naprężeń.



Rys. 11. Rozkład naprężeń normalnych występujących podczas zginania drewna (wg Seunsona)

Tabela 1

Wartość współczynnika relaksacji naprężeń dla poszczególnych przedziałów wilgotności
(wilgotność początkowa 0%)

Rodzaj środowiska nawilżającego drewno	Gatunek drewna	Wymiar beleczek w mm	Przedziały wilgotności w %						
			0—5	6—10	11—15	16—20	21—25	26—30	31—35
			współczynnik relaksacji naprężeń w % naprężeń początkowych						
Woda o temp. 20°C	sosna	20×20×700	1,40	2,89	4,90	2,75	0,20	0,00	
		40×40×1400	1,60	2,96	3,96	2,88	0,44	0,00	
	buk	20×20×700	1,86	2,81	4,15	2,80	0,20	0,00	
		40×40×1400	1,60	2,92	3,87	2,66	0,60	0,00	
Woda o temp. 60°C	sosna	20×20×700	4,20	4,42	2,76	1,60	1,02	0,80	0,00
		40×40×1400	3,90	4,62	2,00	2,20	0,60	1,20	0,00
	buk	20×20×700	3,96	4,90	2,20	2,00	0,73	0,74	0,00
		40×40×1400	3,64	4,65	2,33	1,66	0,91	0,77	0,00
Nasycona para wodna o temp. 100°C	sosna	20×20×700	4,48	4,30	3,10	2,60	1,95	0,70	0,00
		40×40×1400	4,65	4,22	2,66	2,72	2,14	0,36	0,00
	buk	20×20×700	4,73	4,20	2,74	2,35	1,11	0,00	0,00
		40×40×1400	4,62	4,05	2,78	2,10	0,82	0,00	0,00

Na podstawie tego kryterium porównawczego obliczono dla poszczególnych przedziałów wilgotności drewna wartości średnie z trzech równorzędnych doświadczeń. Wartości te zestawiono w tab. 1 i 2.

Tabela 2

Wartość współczynnika relaksacji naprężeń dla poszczególnych przedziałów wilgotności
(wilgotność początkowa 15%)

Rodzaj środowiska nawilżającego drewno	Gatunek drewna	Wymiar beleczek w mm	Przedziały wilgotności w %			
			15—20	21—25	26—30	31—35
			współczynnik relaksacji naprężeń w % naprężeń początkowych			
Woda o temp. 20°C	sosna	20×20×700	3,16	4,60	1,25	0,00
		40×40×1400	3,24	4,03	2,50	0,00
	buk	20×20×700	3,68	3,90	2,50	0,00
		40×40×1400	3,06	4,04	2,51	0,00
Woda o temp. 60°C	sosna	20×20×700	7,63	3,45	2,40	0,00
		40×40×1400	6,25	2,70	2,85	0,00
	buk	20×20×700	7,15	2,54	2,94	0,00
		40×40×1400	6,46	2,90	3,53	0,00
Nasycona para wodna o temp. 100°C	sosna	20×20×700	11,90	2,64	0,81	0,00
		40×40×1400	11,00	3,68	1,15	0,00
	buk	20×20×700	11,92	4,00	1,20	0,00
		40×40×1400	12,75	2,89	0,91	0,00

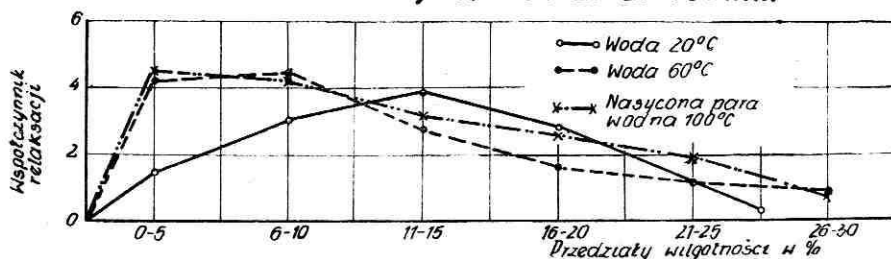
Z tabel 1 i 2 wynika, że wartości współczynnika relaksacji naprężeń są szczególnie uzależnione od wilgotności początkowej drewna oraz od rodzaju i temperatury środowiska nawilżającego drewno.

Rys. 12 i 13 charakteryzują wpływ wilgotności oraz rozkładu wilgotności na przekroju poprzecznym beleczek na relaksację naprężeń. Obrazują one, w zależności od rodzaju środowiska nawilżającego drewno, wartości współczynnika relaksacji naprężeń dla poszczególnych przedziałów wilgotności oraz zawierają dane dotyczące rozmieszczenia wilgotności w strefach przekroju poprzecznego beleczek.

Z wykresów tych wynika, że dla drewna o wilgotności początkowej 0% współczynnik relaksacji naprężeń osiągnął maksymalne wartości dla beleczek nawilżanych: wodą o temperaturze 20°C — w przedziale wilgotności 11—15%, wodą o temperaturze 60°C — w przedziale wilgotności 6—10%, nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C — w przedziale wilgotności 0—5%.

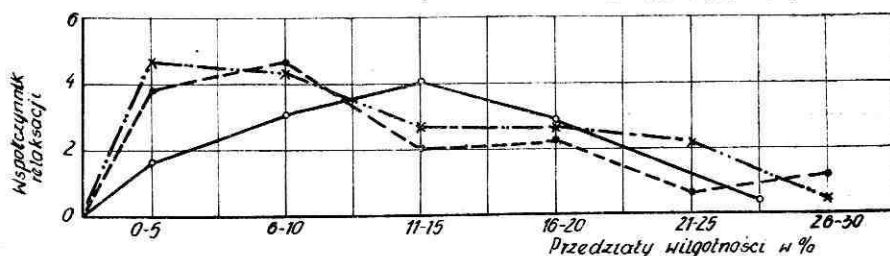
Natomiast dla drewna o wilgotności początkowej 15% współczynnik relaksacji naprężeń osiągnął najwyższe wartości dla beleczek nawilżanych: wodą o temperaturze 20°C — w przedziale wilgotności 21—25%,

A. Beleczki sosnowe o wymiarach 20×20×700 mm



Woda 20°C	11,7	1,5	0,6	0,2	218	15,5	2,1	0,6	266	20,3	18,8	4,3	296	23,0	16,2	11,2	32,6	21,0	23,0	17,4	318	32,0	28,0	22,2
Woda 60°C	8,1	7,0	5,6	0,1	13,8	10,7	8,6	6,9	19,8	17,6	13,9	6,7	25,9	23,0	18,8	13,2	20,6	27,8	24,8	17,8	33,2	30,2	29,4	27,4
Para 100°C	7,5	6,8	4,7	1,0	13,0	11,8	9,8	5,4	18,8	16,2	15,2	9,8	24,8	20,6	18,4	16,2	28,9	28,0	23,0	20,1	30,5	30,3	29,8	29,4
Średnia wilgotność	5%				10%				15%				20%				25%				30%			

B. Beleczki sosnowe o wymiarach 40×40×1400 mm

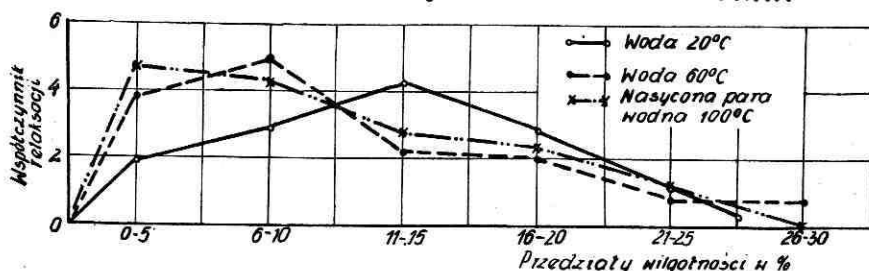


Woda 20°C	13,0	6,2	0,8	0,0	20,9	15,7	3,1	0,3	27,8	18,9	10,7	3,2	30,3	22,1	17,8	9,8	33,8	26,8	22,8	10,6	43,2	50,3	26,4	20,1
Woda 60°C	10,0	7,1	2,9	0,0	18,0	12,8	5,6	3,8	20,2	19,0	16,8	4,0	26,6	24,1	18,2	11,1	30,2	29,0	25,0	17,8	35,1	30,4	28,2	20,3
Para 100°C	8,0	7,3	3,7	1,0	14,8	12,2	10,0	3,0	20,1	17,8	15,8	8,2	24,0	21,0	18,8	16,2	29,0	27,8	23,8	19,4	30,8	30,2	29,7	29,5
Średnia wilgotność	5%				10%				15%				20%				25%				30%			

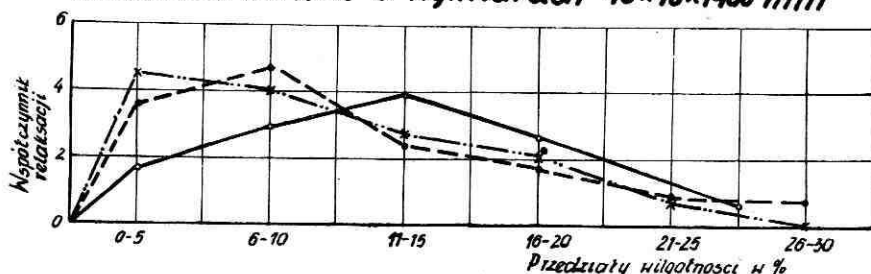
Rys. 12a. Zależność między współczynnikiem relaksacji naprężeń a stopniem wilgotności drewna i jej rozkładem w nawilżanych beleczkach sosnowych o wilgotności początkowej 0%

wodą o temperaturze 60°C i nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C — w przedziale wilgotności 15—20%.

Przystępując do stwierdzenia zależności pomiędzy maksymalnymi wartościami współczynnika relaksacji naprężeń a rozmieszczeniem wilgotności na przekroju poprzecznym beleczek należy uwzględnić to, że wilgotność drewna poszczególnych warstw jest wynikiem sumarycznej zawartości wody higroskopijnej i wody wolnej i że na relaksację naprężeń w czasie nawilżania drewna ma szczególnie wpływ wzrost zawartości wody higroskopijnej.

C. Beleczki bukowe o wymiarach 20×20×700mm

Woda 20°C	11,3	1,8	0,7	0,2	20,2	17,1	2,3	0,6	26,9	20,9	8,3	3,9	29,9	24,0	15,0	11,1	31,2	24,6	26,0	17,2	33,9	31,9	28,4	25,8
Woda 60°C	7,8	7,2	4,0	1,0	13,9	11,6	8,5	0,0	19,0	17,2	14,4	9,4	25,0	24,0	18,0	13,0	28,9	26,9	22,9	21,6	31,3	31,0	29,9	27,8
Para 100°C	1,3	7,0	4,7	1,0	12,0	11,3	10,2	0,5	18,6	16,0	14,8	10,6	24,2	20,8	19,0	16,0	29,0	21,8	23,1	20,1	30,6	30,5	29,7	29,2
Średnia wilgotność	5%		10%		15%		20%		25%		30%													

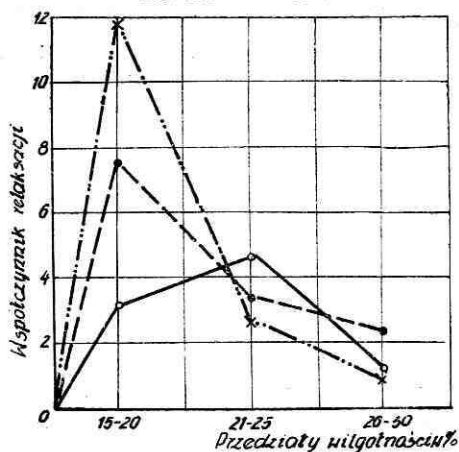
D. Beleczki bukowe o wymiarach 40×40×1400mm

Woda 20°C	17,8	1,8	0,4	0,0	19,1	15,9	3,0	2,0	24,0	20,0	5,5	4,5	27,0	24,1	18,0	10,9	32,8	27,8	22,6	16,8	38,2	31,0	27,2	23,0
Woda 60°C	17,2	1,5	1,3	0,0	17,1	13,5	5,5	3,9	19,9	18,8	25,2	5,1	28,2	24,8	18,8	14,2	30,2	27,6	25,1	17,1	33,9	30,4	28,8	26,9
Para 100°C	1,8	1,5	3,2	1,5	14,2	12,8	9,8	3,4	19,0	17,8	13,0	10,2	23,6	21,8	19,0	15,6	29,2	28,1	24,0	18,7	30,8	30,4	29,5	29,3
Średnia wilgotność	5%		10%		15%		20%		25%		30%													

Rys. 12b. Zależność między współczynnikiem relaksacji naprężeń a stopniem wilgotności drewna i jej rozkładem w nawilżanych beleczkach bukowych o wilgotności początkowej 0%

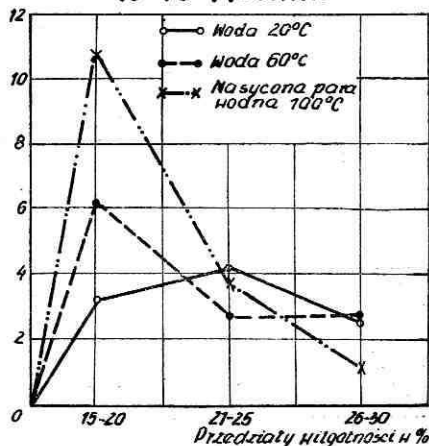
Wilgotność drewna w poszczególnych warstwach beleczek oraz stosunek ilości wody higroskopijnej do wody wolnej, zwłaszcza w pierwszym okresie nawilżania, będzie zależny od rodzaju i temperatury środowiska nawilżającego.

Badania wykazały, że podczas nawilżania drewna wodą o temperaturze 60°C oraz nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C, wilgotność warstw wewnętrznych beleczek, przy danej średniej wilgotności, jest wyższa niż podczas nawilżania drewna wodą o temperaturze 20°C.

**A. Bełeczki sosnowe o wymiarach
20×20×700 mm**


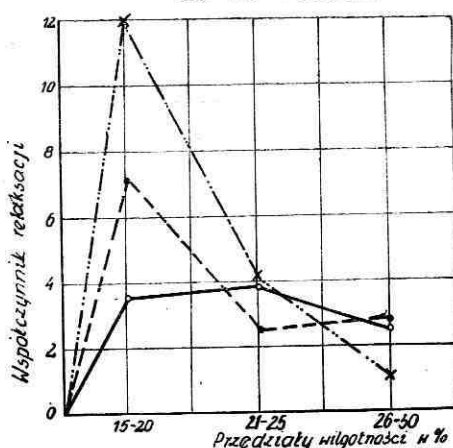
Woda 20°C	28,8	20,4	15,8	15,0	31,8	28,9	22,3	20,9	33,9	32,0	28,3	25,8
Woda 60°C	24,0	21,2	18,2	16,2	21,8	26,2	24,6	21,2	32,0	30,7	29,3	28,0
Para 100°C	23,1	21,1	18,8	17,0	21,0	28,0	24,5	22,5	30,6	30,3	29,8	29,9

Srednia wilgotność	20%	25%	30%
--------------------	-----	-----	-----

**B. Bełeczki sosnowe o wymiarach
40×40×1400 mm**


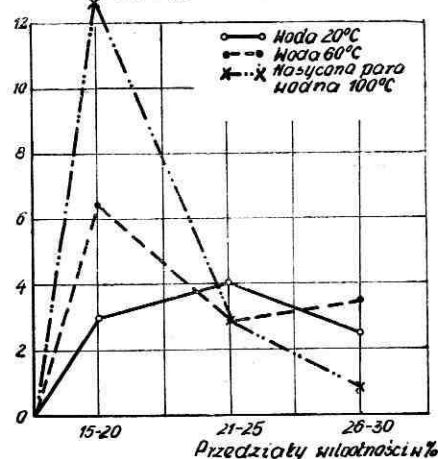
28,0	21,2	15,8	15,0	30,9	26,6	22,7	19,8	38,2	31,8	26,4	23,6
24,2	22,0	18,0	15,8	28,1	27,0	24,0	20,9	32,0	31,3	29,1	27,0
24,2	22,2	11,6	16,0	28,0	26,8	24,2	22,0	30,5	30,2	29,6	29,6

20%	25%	30%
-----	-----	-----

**C. Bełeczki bukowe o wymiarach
20×20×700 mm**


Woda 20°C	27,2	21,0	16,2	15,0	33,8	24,8	21,0	20,4	35,4	30,2	28,0	26,4
Woda 60°C	24,0	21,2	18,2	16,2	27,7	26,3	24,6	21,4	31,8	30,7	29,4	28,1
Para 100°C	23,0	21,2	18,6	17,2	27,2	25,9	24,6	22,3	30,3	30,2	30,0	29,5

Srednia wilgotność	20%	25%	30%
--------------------	-----	-----	-----

**D. Bełeczki bukowe o wymiarach
40×40×1400 mm**


28,5	21,0	15,5	15,0	33,2	27,0	21,8	18,0	36,4	30,2	27,7	25,7
23,8	22,4	17,8	16,0	28,0	27,2	23,8	21,0	33,0	30,9	29,0	27,1
23,8	22,4	17,4	16,4	27,8	26,0	24,0	22,2	30,4	30,1	30,0	29,5

20%	25%	30%
-----	-----	-----

Rys. 13. Zależność zachodząca podczas nawilżania drewna między współczynnikiem relaksacji naprężeń a stopniem wilgotności i jej rozkładem w bełeczkach o wilgotności początkowej 15%

Z literatury wiadomo, że w początkowym okresie nawilżania drewna wodą o temperaturze 20°C występuje duże wchłanianie wody wolnej (15). Szybkość przemieszczania się wody w drewnie jest uzależniona od temperatury wody, a mianowicie ze wzrostem temperatury wody szybkość ta zwiększa się. Dlatego też współczynnik relaksacji naprężeń podczas nawilżania beleczek wodą o temperaturze 60°C i nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C osiągnął swoją wartość maksymalną w niższym przedziale wilgotności niż podczas nawilżania beleczek wodą o temperaturze 20°C .

Po osiągnięciu maksymalnej wartości współczynnik relaksacji naprężeń w dalszych przedziałach wilgotności ulega w zasadzie stopniowemu spadkowi. Wyjątek stanowią wartości współczynnika relaksacji naprężeń uzyskane w przedziale wilgotności drewna 26—30% dla beleczek sosnowych o wilgotności początkowej 0% i o wymiarach $40 \times 40 \times 1400$ mm oraz dla beleczek bukowych o wilgotności początkowej 15%. W tym wypadku wartości współczynnika relaksacji naprężeń są wyższe od wartości uzyskanych dla przedziałów wilgotności 21—25%.

Z rys. 8 i 9 wynika, że między wzrostem wilgotności drewna a relaksacją naprężeń w określonych przedziałach wilgotności drewna zachodzi w przybliżeniu zależność liniowa.

Zależność ta zachodzi dla drewna o wilgotności początkowej 0% w przedziale wilgotności 5—20%, natomiast dla drewna o wilgotności początkowej 15% — w przedziale wilgotności 18—25%. O stopniu liniowej zależności między relaksacją naprężeń a wilgotnością drewna, w wymienionych przedziałach wilgotności, świadczą obliczone współczynniki korelacji.

Bezwzględna ich wartość wynosi:

podczas nawilżania drewna o wilgotności początkowej 0%

wodą o temperaturze 20°C $r = -0,806$,

wodą o temperaturze 60°C $r = -0,965$,

nasyconą parą wodną
o temperaturze 100°C $r = -0,946$;

podczas nawilżania drewna o wilgotności początkowej 15%

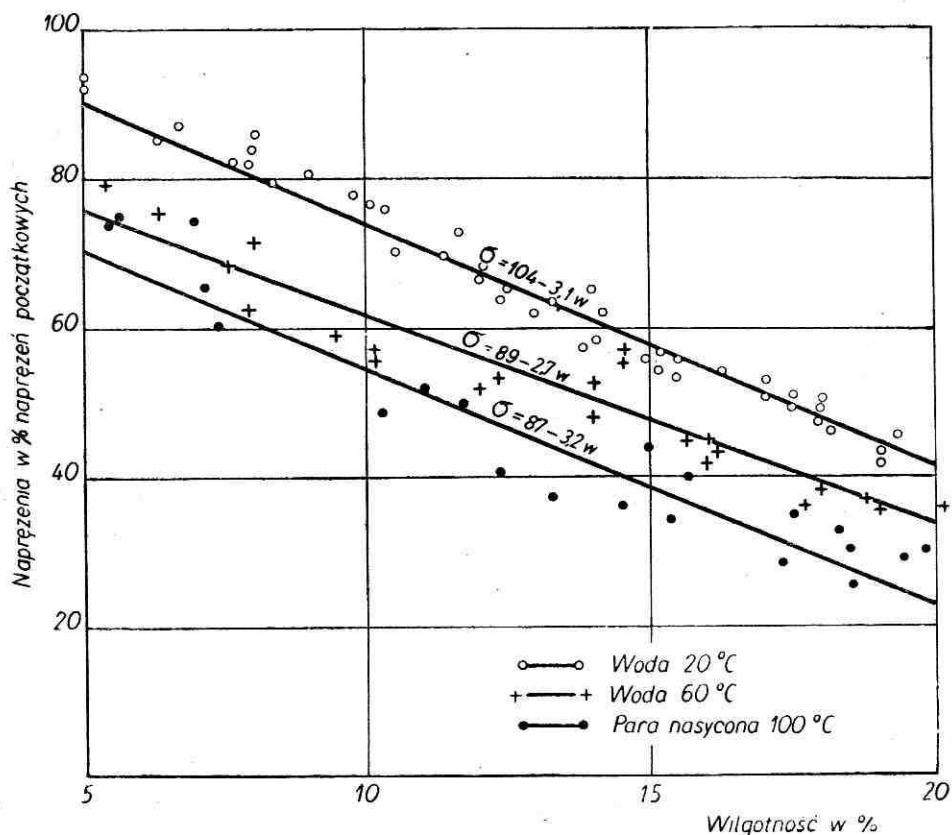
wodą o temperaturze 20°C $r = -0,872$,

wodą o temperaturze 60°C $r = -0,931$,

nasyconą parą wodną
o temperaturze 100°C $r = -0,909$.

Odpowiednie proste regresji przedstawia rys. 14.

W celu stwierdzenia wpływu wilgotności początkowej drewna na relaksację naprężeń, obliczono współczynnik relaksacji naprężeń dla całego przedziału wilgotności, w którym występowała relaksacja naprężeń, tzn. dla przedziału wilgotności 0—30% oraz 15—30%. Wartości te zestawiono w tab. 3.

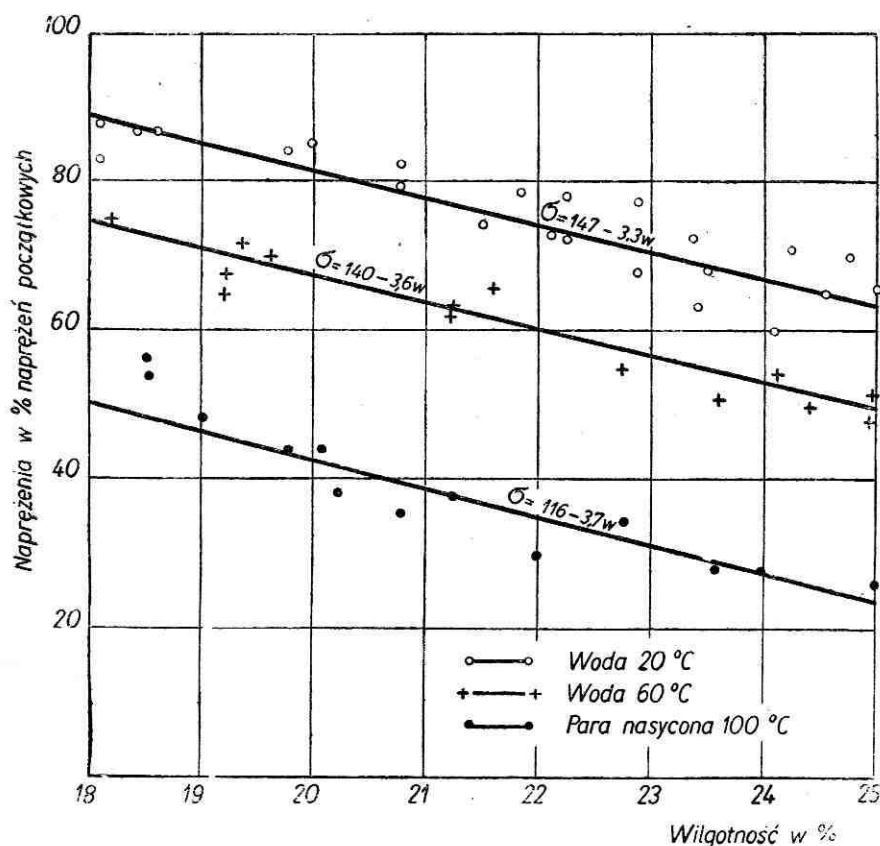


Rys. 14a. Proste regresji ilustrujące zależność pomiędzy wilgotnością drewna a relaksacją naprężeń w drewnie o wilgotności początkowej 0%

Z tabeli 3 wynika, że współczynnik relaksacji naprężeń dla drewna o wilgotności początkowej 15% jest średnio mniej więcej 60% większy od współczynnika relaksacji naprężeń uzyskanego dla drewna o wilgotności początkowej 0%. Spowodowane to jest tym, że podczas nawilżania drewna o wilgotności początkowej 15% występuje bardziej równomierne przemieszczanie się wilgoci w beleczkach niż podczas nawilżania drewna o wilgotności początkowej 0%.

Tabela 3 wykazuje, że wartości współczynnika relaksacji naprężeń zwiększają się wraz z wzrostem temperatury środowiska nawilżającego drewno. Średnia wartość współczynnika relaksacji naprężeń wynosiła:

podczas nawilżania drewna o wilgotności początkowej 0%	
wodą o temperaturze 20°C	$W_r = -2,02\%$,
wodą o temperaturze 60°C	$W_r = -2,44\%$,
nasyconą parą wodną	
o temperaturze 100°C	$W_r = -2,76\%$.



Rys. 14b. Proste regresji ilustrujące zależność pomiędzy wilgotnością drewna a relaksacją naprężeń w drewnie o wilgotności początkowej 15%

podczas nawilżania drewna o wilgotności początkowej 15%

wodą o temperaturze 20°C	$W_r = -3,07\%$,
wodą o temperaturze 60°C	$W_r = -4,11\%$,
nasyconą parą wodną	
o temperaturze 100°C	$W_r = -5,14\%$.

Wzrost współczynnika relaksacji naprężeń podczas nawilżania drewna wodą o podwyższonej temperaturze spowodowany jest tym, że oprócz nawilżania występuje ogrzewanie drewna. Jednoczesne nawilżanie i ogrzewanie drewna zwiększa jego plastyczność i zmniejsza współczynnik tarcia wewnętrznego.

Z zestawienia tego wyniku, że podczas nawilżania drewna o wilgotności początkowej 0% wzrost temperatury środowiska nawilżającego od 20 do 60°C oraz od 60 do 100°C powoduje przyrost współczynnika relaksacji naprężeń odpowiednio o 0,42 i 0,32% (czyli o 21 i 13%). Natomiast

Tabela 3

Wartości współczynnika relaksacji naprężeń dla poszczególnych wilgotności początkowych drewna

Rodzaj środowiska nawilżającego drewno	Gatunek drewna	Wymiar beleczek w mm	Wilgotność początkowa drewna w %	
			0	15
			współczynnik relaksacji naprężeń w % naprężeń początkowych dla przedziału wilgotności od 0–30%	
Woda o temp. 20°C	sosna	20×20×700	1,96	3,03
		40×40×1400	2,07	3,12
	buk	20×20×700	2,14	3,08
		40×40×1400	1,90	3,04
Woda o temp. 60°C	sosna	20×20×700	2,44	4,04
		40×40×1400	2,45	4,00
	buk	20×20×700	2,41	4,15
		40×40×1400	2,45	4,25
Nasycona para wodna o temp. 100°C	sosna	20×20×700	2,78	5,00
		40×40×1400	2,71	5,30
	buk	20×20×700	2,85	5,33
		40×40×1400	2,71	5,06

podczas nawilżania drewna o wilgotności początkowej 15% ten sam wzrost temperatury powoduje przyrost współczynnika relaksacji naprężeń wynoszący 1,04 i 1,03% (czyli 34 i 25%).

Z danych zawartych w tab. 3 wynika, że wartości współczynnika relaksacji naprężeń obliczone dla całego przedziału wilgotności, w którym występowała relaksacja naprężeń, są w przybliżeniu takie same, zarówno dla drewna sosnowego i bukowego, jak również dla beleczek o wymiarach 20×20×700 mm i 40×40×1400 mm. Wyjątek stanowi pewien wzrost współczynnika relaksacji naprężeń w czasie nawilżania drewna bukowego o wilgotności początkowej 15% wodą o temperaturze 60°C i nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C.

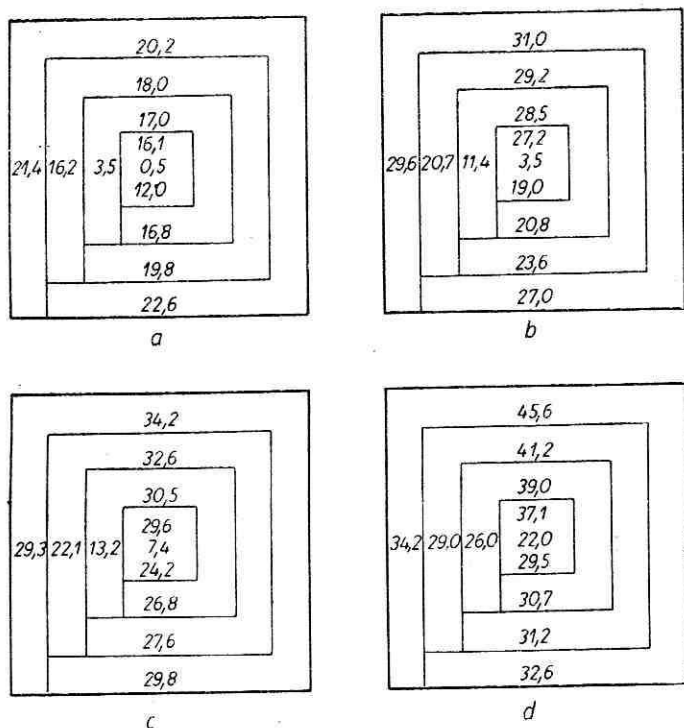
Wpływ czasu nawilżania drewna na relaksację naprężeń. Dla stwierdzenia wpływu czasu nawilżania drewna na relaksację naprężeń zestawiono tab. 4.

Tabela 4 wykazuje, że nie ma wyraźnej zależności pomiędzy relaksacją naprężeń wyrażoną w procentach naprężeń początkowych i obliczoną dla poszczególnych okresów nawilżania drewna a gatunkiem drewna i wymiarami beleczek.

Ogólnie można stwierdzić, że wartości relaksacji naprężeń wyrażone w procentach naprężeń początkowych są zależne od wilgotności początkowej drewna oraz od rodzaju i temperatury środowiska nawilżającego beleczki, a niezależne od gatunku drewna i wymiarów beleczek.

Tabela 4
Zestawienie wartości relaksacji naprężeń występujących w poszczególnych okresach nawilżania drewna

Wilgotność początkowa w %	Gatunek drewna	Wymiary beleczek w mm	Okres nawilżania drewna w minutach											
			0—120		120—360				360—720				720—1440	
			średowisko nawilżające beleczki											
			woda o temp.		nasycona para wodna o temp.		woda o temp.		nasycona para wodna o temp.		woda o temp.		nasycona para wodna o temp.	
			20°C	60°C	100°C	20°C	60°C	20°C	60°C	100°C	20°C	60°C	20°C	60°C
relaksacja naprężeń wyrażona w procentach naprężeń początkowych														
0	sosna	20×20×700 40×40×1400	32	66	69	15	8	11	10	1	4	2	0	1
			30	62	65	16	9	14	8	2	4	6	0	1
	buk	20×20×700 40×40×1400	33	66	63	14	6	15	11	3	6	2	0	0
			32	62	62	12	8	12	6	3	8	7	0	0
15	sosna	20×20×700 40×40×1400	28	55	56	14	10	11	5	1	6	0	0	0
			29	54	56	11	12	19	7	3	5	0	0	0
	buk	20×20×700 40×40×1400	30	56	60	13	12	14	7	0	6	0	0	0
			29	52	58	11	16	15	8	0	8	0	0	0

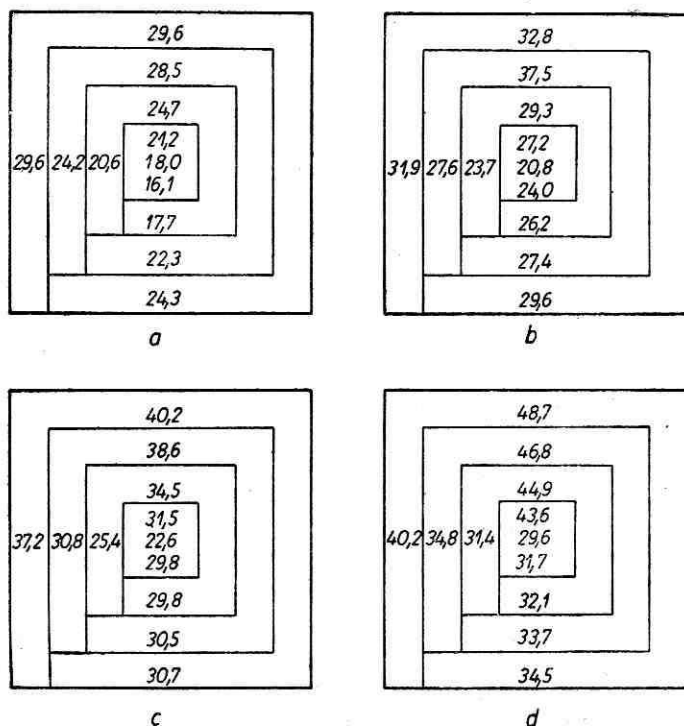


Rys. 15a. Rozkład wilgotności w beleczkach sosnowych o wilgotności początkowej 0% po okresie nawilżania
 a — 120-minutowym, b — 360-minutowym, c — 720-minutowym, d — 1440-minutowym (dla beleczek nawilżanych wodą o temperaturze 20°C liczby podano poziomo, wodą o temperaturze 60°C — pionowo od góry, a nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C — pionowo od dołu)

Występujące w ostatnich dwóch okresach nawilżania stosunkowo duże wahania pomiędzy wartościami relaksacji naprężeń, uzyskanymi dla drewna sosnowego i bukowego oraz dla beleczek o wymiarach $20 \times 20 \times 700$ mm i $40 \times 40 \times 1400$ mm, ze względu na małe wartości bezwzględne nie mają znaczenia praktycznego. Dlatego też dalszą analizę wpływu czasu na relaksację naprężeń ograniczono do stwierdzenia wpływu poszczególnych okresów nawilżania drewna w zależności od jego wilgotności początkowej oraz od rodzaju i temperatury środowiska nawilżającego.

Średnie wartości relaksacji naprężeń dla poszczególnych okresów nawilżania drewna zestawiono w tab. 5. Ponadto w tab. 5 podano wartości relaksacji naprężeń wyrażone w procentach relaksacji całkowitej.

Na podstawie tab. 5 można stwierdzić, że 54% (20°C) do 86% (60°C) całkowitej relaksacji przypada na dwie pierwsze godziny nawilżania



Rys. 15b. Rozkład wilgotności w beleczkach sosnowych o wilgotności początkowej 15% po okresie nawilżania
 a — 120-minutowym, b — 360-minutowym, c — 720-minutowym, d — 1440-minutowym (dla beleczek nawilżanych wodą o temperaturze 20°C liczby podano poziomo, wodą o temperaturze 60°C — pionowo od góry, a nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C — pionowo od dołu)

drewna. Pozostałe 11% (60°C) do 25% (20°C) relaksacji całkowitej przypada na dalsze cztery godziny nawilżania drewna.

Aby wyjaśnić wpływ poszczególnych okresów nawilżania drewna na relaksację naprężeń, zbadano rozkład wilgotności w beleczkach sosnowych o wymiarach 40 × 40 × 1400 mm po 120-, 360-, 720- i 1440-minutowym nawilżaniu (rys. 15). Rysunek ten wskazuje wyraźnie, że w pierwszym okresie nawilżania największy przyrost wilgotności zachodził w strefach zewnętrznych beleczek, w których występowały najwyższe naprężenia rozciągające i ściskające. Wskutek tego większość naprężeń uległa relaksacji w początkowym okresie nawilżania beleczek.

W pierwszym okresie nawilżania beleczek naprężenia ulegały relaksacji w większym stopniu w drewnie o wilgotności początkowej 0% niż w drewnie o wilgotności początkowej 15%. Wyjaśnia to fakt, że w tym

Tabela 5

Zestawienie średnich wartości relaksacji naprężeń dla poszczególnych okresów nawilżania drewna

Wilgot- ność po- czątkowa w %	Okres nawilżania drewna w minu- tach	Środowisko nawilżające drewno					
		woda o temperaturze				nasycona para wodna o temperaturze	
		20°C		60°C		100°C	
		relaksacja naprężeń wyrażona w %					
		naprężeń począt- kowych	całkowi- tej relak- sacji na- prężeń	naprężeń począt- kowych	całkowi- tej relak- sacji na- prężeń	naprężeń począt- kowych	całkowi- tej relak- sacji na- prężeń
0	0—120	32	54	64	86	65	77
	120—360	14	24	8	11	13	15
	360—720	9	15	2	3	6	7
	720—1440	4	7	0	0	1	1
	suma	59	100	74	100	85	100
15	0—120	29	60	54	77	57	72
	120—360	12	25	12	17	15	20
	360—720	7	15	4	6	6	8
	720—1440	0	0	0	0	0	0
	suma	48	100	70	100	78	100

okresie nawilżania beleczek o wilgotności początkowej 0% przyrost wilgotności w strefach zewnętrznych jest również większy w beleczkach o wilgotności początkowej 15%.

W dalszych okresach nawilżania drewna, tj. w czasie od 360—720 minut, relaksacja naprężeń wynosi od 2 do 9% naprężeń początkowych. Natomiast w czasie nawilżania drewna w okresie od 720—1440 minut relaksacji ulegały naprężenia w beleczkach o wilgotności początkowej 0%, nawilżanych wodą o temperaturze 20°C i nasyconą parą wodną o temperaturze 100°C. W pozostałych wypadkach relaksacja naprężeń zakończyła się po 720-minutowym nawilżaniu drewna, gdyż w okresie tym poszczególne strefy beleczek osiągnęły wilgotność zbliżoną do punktu nasycenia włókien lub nawet wyższą.

Z wykresów przedstawionych na rys. 16 wynika, że naprężenia wykazują początkowo szybki zanik, a następnie zbliżają się do wartości granicznej. Wartość graniczna naprężeń, które nie uległy relaksacji, jest uzależniona od temperatury i rodzaju środowiska nawilżającego oraz od wilgotności początkowej drewna. Wzrost temperatury środowiska nawilżającego drewno zmniejsza wartość graniczną naprężeń, które nie uległy relaksacji, natomiast wzrost wilgotności początkowej zwiększa tę wartość. Powodem tego jest fakt, że drewno o wilgotności początkowej 15% w tym samym czasie nawilżania wchłania mniej wody od drewna o wilgotności początkowej 0%.

2. Wpływ suszenia drewna na relaksację naprężeń powstałych podczas jego uprzedniego zgięcia

Wyniki doświadczeń dotyczące wpływu suszenia drewna na relaksację naprężeń zobrazowano na rys. 17.

Z rysunku tego wynika, że podczas suszenia drewna relaksacja naprężeń występowała w przedziale wilgotności od 30 do około 10%. Dalsze suszenie drewna poniżej 10% wilgotności nie wywarło żadnego wpływu na pozostałe w drewnie naprężenia. Wiadomo, że podczas suszenia drewna w gorącym powietrzu w największym stopniu wysychają oraz ogrzewają się strefy zewnętrzne suszonych elementów, w których podczas zginania powstają najwyższe naprężenia normalne. Dlatego należy dodatkowo rozpatrzyć rozkład wilgotności w suszonej beleczce w momencie zakończenia zjawiska relaksacji naprężeń (rys. 18).

Z rysunku 18 wynika, że w beleczce uprzednio suszonej w powietrzu o temperaturze 60°C strefa zewnętrzna ma wilgotność około 8%, natomiast środek beleczki wykazuje wilgotność około 11%. Stąd nasuwa się przypuszczenie, że zahamowanie się relaksacji naprężeń przy wilgotności średniej około 10% jest spowodowane tym, że podczas suszenia drewna uległa desorpcji woda związana z drewnem przez adsorpcję fizyczną, a woda związana z drewnem chemisorpcją pozostała w drewnie. Podczas desorpcji wody związanej z drewnem przez chemisorpcję od grup hydroksylowych odrywają się cząsteczki wody (17). Zjawisko to powoduje wzrost sił kohezji, a tym samym wzrost współczynnika tarcia wewnętrznego, który przeciwdziała relaksacji naprężeń.

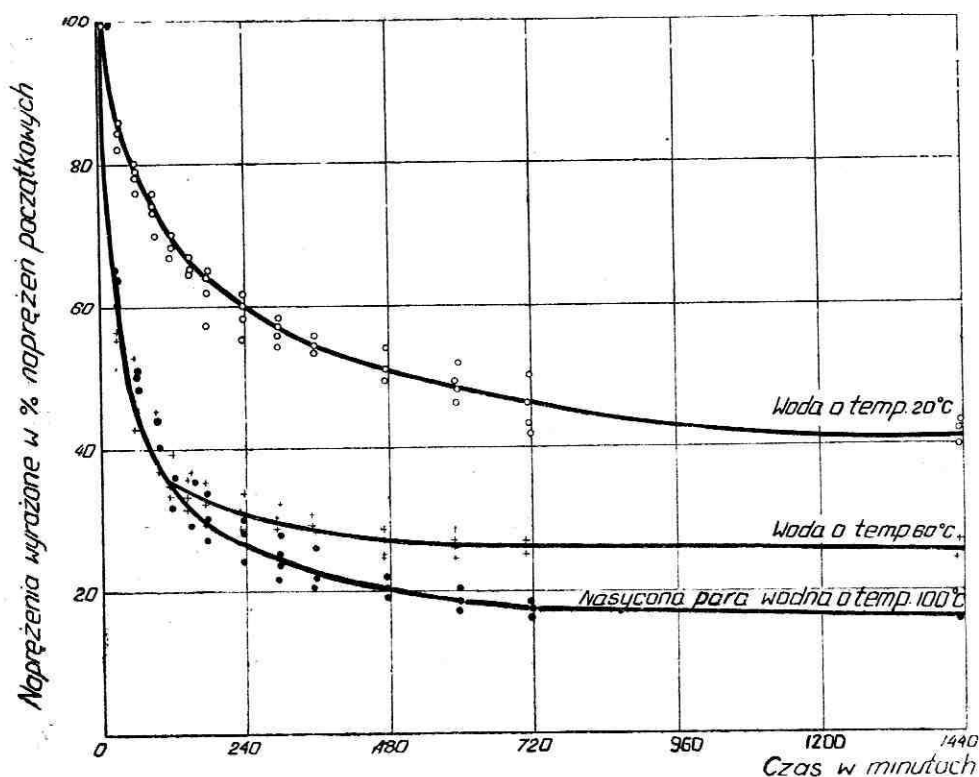
Ponadto z rys. 17 wynika, że między relaksacją naprężeń a wilgotnością drewna w przedziale od 20 do 30% zachodzi w przybliżeniu zależność liniowa.

Wpływ wilgotności drewna na relaksację naprężeń. Przy analizie wpływu wilgotności drewna na relaksację naprężeń za kryterium porównawcze przyjęto również współczynnik relaksacji naprężeń.

Dla stwierdzenia wpływu wilgotności drewna obliczono wartości średnie z trzech równorzędnych doświadczeń, które zestawiono w tab. 6.

Z tabeli 6 wynika, że wartości współczynnika relaksacji naprężeń, obliczone dla poszczególnych przedziałów wilgotności drewna, są uzależnione od gatunku drewna użytego do doświadczeń. Współczynnik relaksacji naprężeń dla drewna sosnowego jest w przedziale wilgotności o 30—25% wyższy niż dla drewna bukowego, natomiast w niższych przedziałach wilgotności wyższe wartości wykazuje współczynnik dla drewna bukowego.

Zależność pomiędzy wartościami współczynnika relaksacji naprężeń w danym przedziale wilgotności drewna a rozmieszczeniem wilgotności



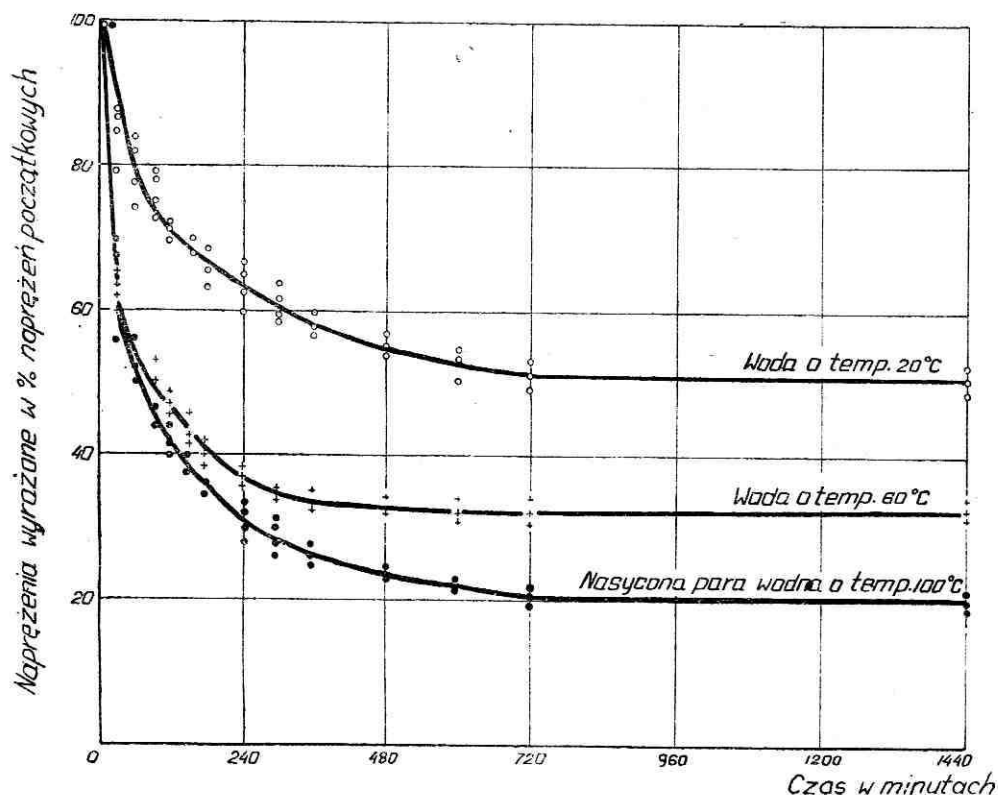
Rys. 16a. Zależność pomiędzy czasem nawilżania drewna o wilgotności początkowej 0% a relaksacją naprężeń

Tabela 6

Wartość współczynnika relaksacji naprężeń dla poszczególnych przedziałów wilgotności drewna suszonego w powietrzu o temperaturze 60°C (wilgotność początkowa 30%)

Rodzaj środowiska suszącego	Gatunek drewna	Wymiar beleczek w mm	Przedziały wilgotności w %				
			30—25	25—20	20—15	15—10	10—5
			współczynnik relaksacji naprężeń w % naprężeń początkowych				
Powietrze o temp. 60°C przy względnej wilgotności od 65 do 10%	sosna	20×20×700	5,20	4,00	2,00	1,60	0,00
		40×40×1400	5,41	3,81	2,08	1,54	0,00
	buk	20×20×700	4,80	5,02	4,36	1,80	0,00
		40×40×1400	4,38	5,00	4,55	3,00	0,00

w beleczkach wykazują wykresy na rys. 19. Podano na nich wartości współczynnika relaksacji naprężeń w poszczególnych przedziałach wilgotności drewna oraz dane dotyczące rozmieszczenia wilgotności w po-



Rys. 16b. Zależność pomiędzy czasem nawilżania drewna o wilgotności początkowej 15% a relaksacją naprężeń

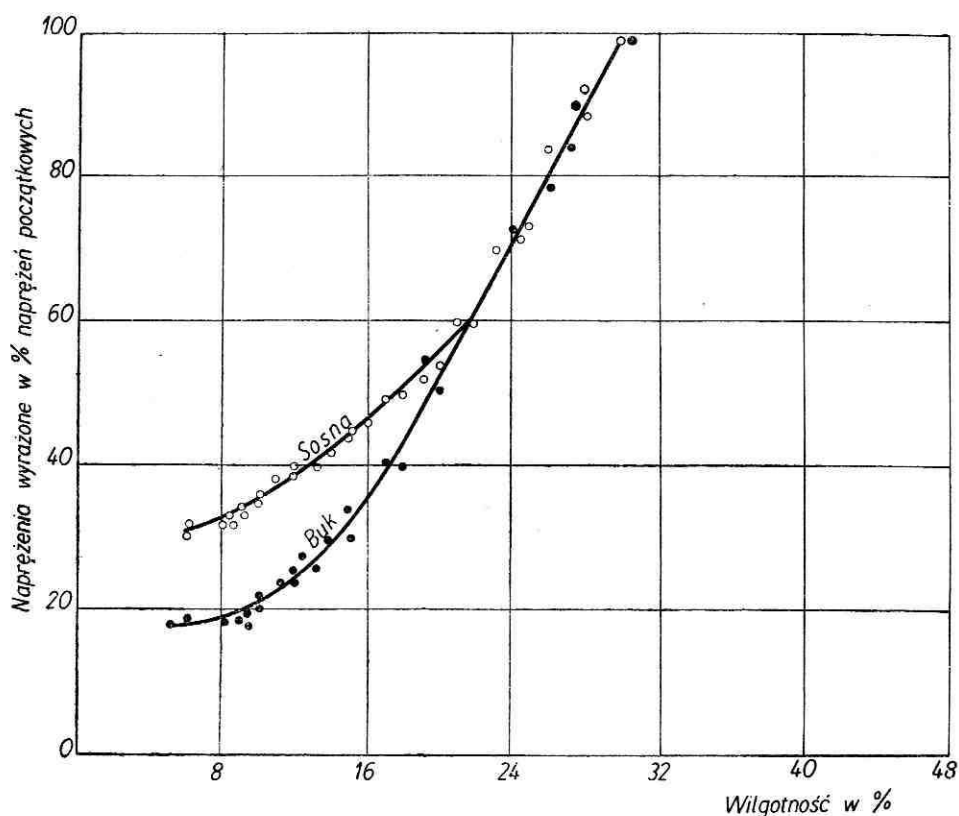
szczególnych strefach beleczek przy danej średniej wilgotności drewna.

Z wykresów widać, że współczynnik relaksacji naprężeń osiągnął najwyższą wartość dla drewna sosnowego w pierwszej fazie spadku wilgotności drewna, a mianowicie w przedziale 30—25%, natomiast dla drewna bukowego w przedziale 25—20%.

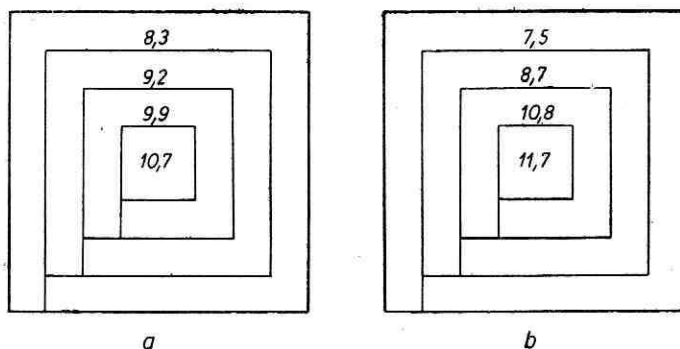
Rozpatrując rozkład wilgotności drewna w beleczkach stwierdzamy, że w beleczkach sosnowych strefy wewnętrzne wysychały szybciej niż w beleczkach bukowych. Natomiast strefy zewnętrzne szybciej wysychały w beleczkach bukowych.

W beleczkach o wymiarach 20×20×700 mm rozkład wilgotności jest bardziej równomierny niż w beleczkach o wymiarach 40×40×1400 mm.

Wpływ gatunku drewna i wymiarów beleczek na relaksację naprężeń. Wpływ gatunku drewna i wymiarów beleczek na relaksację naprężeń stwierdzono przez obliczenie wartości współczynnika relaksacji naprężeń dla całego przedziału wilgotności, w którym występowała relaksacja naprężeń (tab. 7).

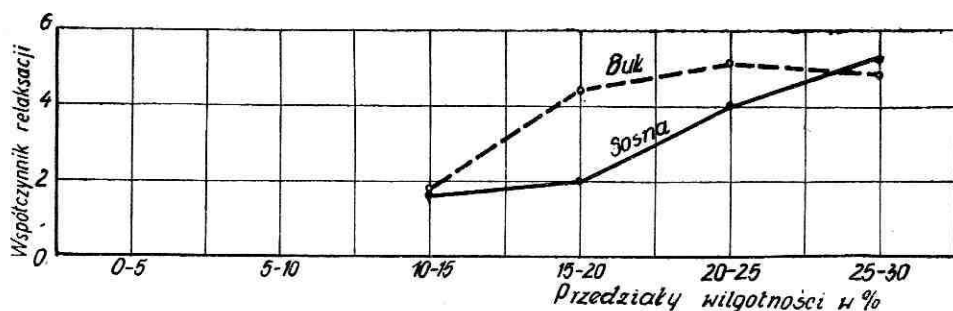


Rys. 17. Zależność pomiędzy wilgotnością drewna a relaksacją naprężeń podczas suszenia beleczek w powietrzu o temperaturze 60°C



Rys. 18. Rozkład wilgotności na przekroju poprzecznym beleczek o wymiarach 40×40×1400 mm, przy średniej wilgotności około 10%: a — dla drewna sosnowego, b — dla drewna bukowego

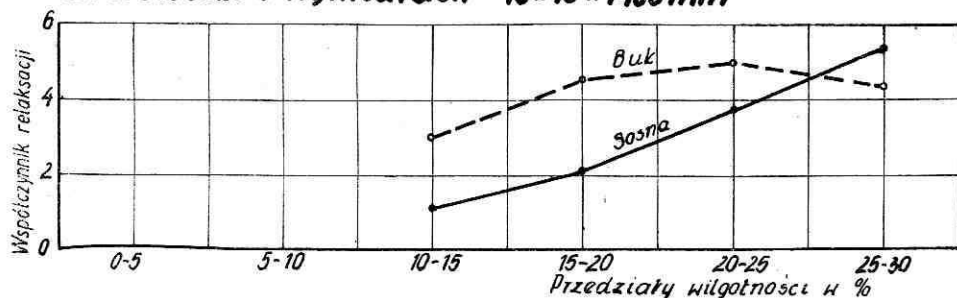
A. Bełeczki o wymiarach 20×20×700 mm



Sosna	—	—	—	—	7.8	8.9	10.6	12.7	11.2	13.8	16.8	18.2	17.6	19.0	20.4	23.0	21.0	23.2	27.3	28.5
Buk	—	—	—	—	8.0	9.0	11.0	12.0	13.0	14.1	15.8	17.0	18.2	19.2	19.6	23.0	21.8	23.6	26.1	28.4

Srednia wilgotność	5%	10%	15%	20%	25%
--------------------	----	-----	-----	-----	-----

B. Bełeczki o wymiarach 40×40×1400 mm



Sosna	—	—	—	—	8.4	9.3	10.9	11.4	13.1	14.3	15.6	17.0	16.7	18.5	21.2	23.6	19.7	22.6	27.9	29.8
Buk	—	—	—	—	8.0	9.4	10.9	11.7	13.8	14.0	15.4	16.8	17.3	19.2	20.2	23.3	21.7	23.5	25.9	28.9

Srednia wilgotność	5%	10%	15%	20%	25%
--------------------	----	-----	-----	-----	-----

Rys. 19. Zależność zachodząca podczas suszenia drewna pomiędzy współczynnikiem relaksacji naprężeń a stopniem wilgotności i jej rozkładem w bełeczkach o wymiarach A — 20×20×700 mm i B — 40×40×1400 mm

Z tabeli 7 wynika, że współczynnik relaksacji naprężeń drewna bukowego jest w przybliżeniu o 25% wyższy niż drewna sosnowego. Wytlumaczyć to można tym, że podczas suszenia drewna bełeczki bukowe pod wpływem ciepła uplastyczniały się w większym stopniu niż bełeczki sosnowe. Wzrost plastyczności drewna powodował zmniejszenie współczynnika tarcia wewnętrznego drewna, wskutek czego nastąpił wzrost relaksacji naprężeń.

Tabela 7

Wpływ gatunku drewna i wymiarów beleczek na relaksację naprężeń zachodzącą podczas suszenia drewna w powietrzu o temperaturze 60° C

Gatunek drewna	Wymiary beleczek w mm	
	20×20×700	40×40×1400
	współczynnik relaksacji naprężeń w % naprężeń początkowych dla przedziału wilgotności 30–10%	
Sosna	3,10	3,18
Buk	3,92	3,96

Wartości współczynnika relaksacji naprężeń uzyskane dla beleczek o wymiarach 20×20×700 mm oraz 40×40×1400 mm są do siebie bardzo zbliżone. Powodem tego jest prawdopodobnie zbyt małe zróżnicowanie wymiarów beleczek. W związku z tym dalszą analizę wyników doświadczeń dotyczących wpływu suszenia drewna na relaksację naprężeń przeprowadzono wspólnie dla obydwóch wymiarów beleczek.

Wpływ czasu suszenia drewna na relaksację naprężeń. Aby stwierdzić wpływ czasu suszenia drewna na relaksację naprężeń, obliczono wartości spadku naprężeń przypadające na poszczególne okresy trwania doświadczeń. Wartości te zestawiono w tab. 8.

Dla poszczególnych okresów suszenia drewna obliczono dodatkowo relaksację naprężeń wyrażoną w procentach relaksacji całkowitej.

Na podstawie tab. 8 dochodzimy do wniosku, że podczas suszenia drewna większa część naprężeń uległa relaksacji w pierwszym okresie suszenia drewna. Dalsze okresy suszenia drewna wykazywały coraz to mniejszy wpływ na relaksację naprężeń.

Tabela 8

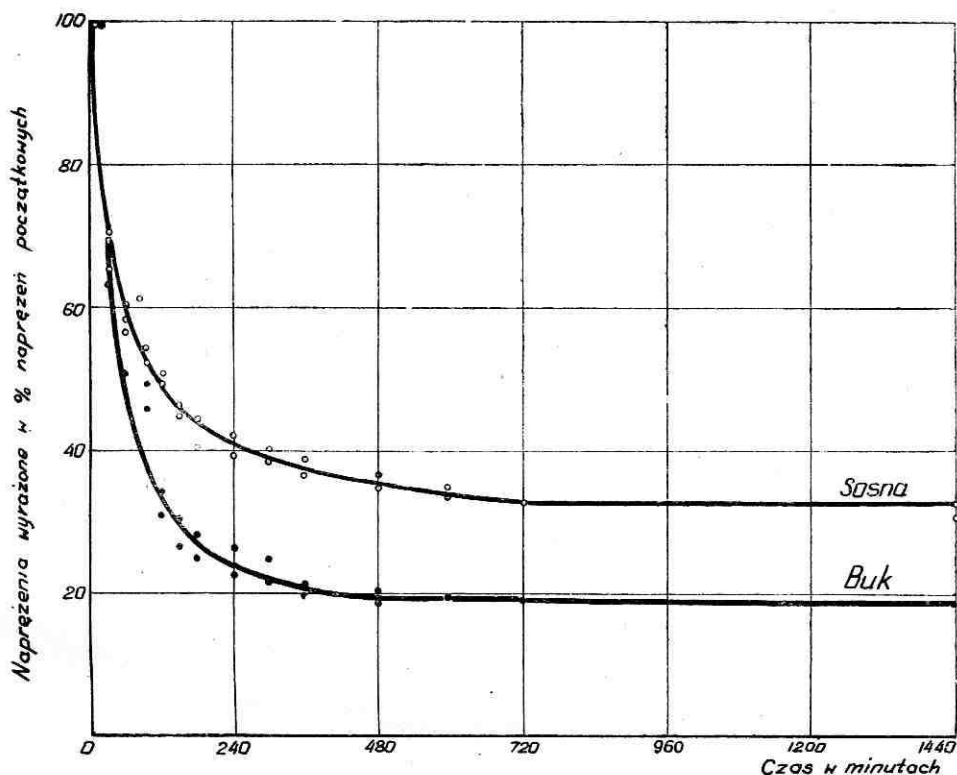
Wartości relaksacji naprężeń uzyskane w poszczególnych okresach suszenia drewna w powietrzu o temperaturze 60° C

Okres suszenia drewna w minutach	Gatunek drewna			
	sosna		buk	
	relaksacja naprężeń wyrażona w %			
	naprężeń początkowych	całkowitej relaksacji naprężeń	naprężeń początkowych	całkowitej relaksacji naprężeń
0—120	50	74	68	88
120—360	12	18	9	12
360—720	5	7	0	0
720—1440	1	1	0	0
Suma	68	100	77	100

Graniczna wartość relaksacji naprężeń dla drewna bukowego jest większa od granicznej wartości dla drewna sosnowego.

Wykres przedstawiony na rys. 20 wykazuje wpływ czasu suszenia drewna na relaksację naprężeń. Na wykresie tym na osi odciętych przedstawiono czas suszenia w minutach, na osi rzędnych natomiast naprężenia wyrażone w procentach naprężeń początkowych.

Z wykresu tego wynika, że w czasie suszenia drewna naprężenia w po-



Rys. 20. Wpływ czasu suszenia drewna w temperaturze 60°C na relaksację naprężeń

czątkowym okresie szybko zanikają, podobnie jak podczas nawilżania drewna, a następnie zbliżają się asymptotycznie do wartości granicznej. W tym wypadku szybkość relaksacji naprężeń jest większa dla drewna bukowego niż dla drewna sosnowego. Wartość graniczna naprężeń, które nie uległy relaksacji w czasie suszenia, jest wyższa dla drewna sosnowego niż dla drewna bukowego.

3. Wpływ kolejnego nawilżania i suszenia drewna na relaksację naprężeń

W tabeli 9 zestawiono wartości współczynnika relaksacji naprężeń występujące podczas dwukrotnego kolejnego nawilżania drewna w wodzie o temperaturze 60°C i suszenia w powietrzu o temperaturze 60°C przy względnej wilgotności 65—20%.

Dane zawarte w tab. 9 dowodzą, że relaksacja naprężeń występowała tylko podczas pierwszego okresu nawilżania i suszenia drewna. Podczas wtórnego nawilżania i suszenia, naprężenia występujące w drewnie nie ulegały już relaksacji.

Tabela 9

Wartości współczynnika relaksacji naprężeń uzyskane podczas kolejnego 360-minutowego nawilżania drewna wodą o temperaturze 60° C i suszenia go w powietrzu o tej samej temperaturze

Wilgotność początkowa w %	Gatunek drewna	Wymiary beleczek w mm	Rodzaj zabiegu			
			pierwszy okres nawilżania	pierwszy okres suszenia	drugi okres nawilżania	drugi okres suszenia
			współczynnik relaksacji naprężeń w % naprężeń początkowych			
0	sosna	20×20×700	2,44	0,33	0	0
		40×40×1400	2,38	0,76	0	0
	buk	20×20×700	2,56	0,46	0	0
		40×40×1400	2,62	0,61	0	0
15	sosna	20×20×700	3,98	0,35	0	0
		40×40×1400	4,26	0,59	0	0
	buk	20×20×700	3,98	0,40	0	0
		40×40×1400	4,10	0,37	0	0

Opisane zjawisko można wytłumaczyć niejednorodną budową drewna. Pod wpływem wzrostu wilgotności i temperatury drewna część elementów jego budowy, które normalnie wykazują własności sprężyste, ulega uplastycznieniu. Na skutek tego w beleczce obciążonej siłą P_g , przy zachowaniu stałych odkształceń, będzie wzrastała relaksacja naprężeń do momentu przejęcia wszystkich naprężeń wewnętrznych przez elementy budowy drewna zachowujące cechy ciał sprężystych. Stąd wniosek, że podczas pierwszego kolejnego nawilżania i suszenia drewna wszystkie naprężenia wewnętrzne zostały przejęte przez elementy budowy drewna wykazujące cechy sprężyste, gdyż dalsze nawilżanie i suszenie drewna nie powodowało już relaksacji naprężeń.

Brak relaksacji naprężeń przy wtórnym nawilżaniu i suszeniu według Krzysika (17) można również tłumaczyć hipotetycznie nieodwracalnym utwardzeniem naturalnego lepiszcza w czasie pierwszego nagrzewania i suszenia, analogicznie jak w klejach syntetycznych.

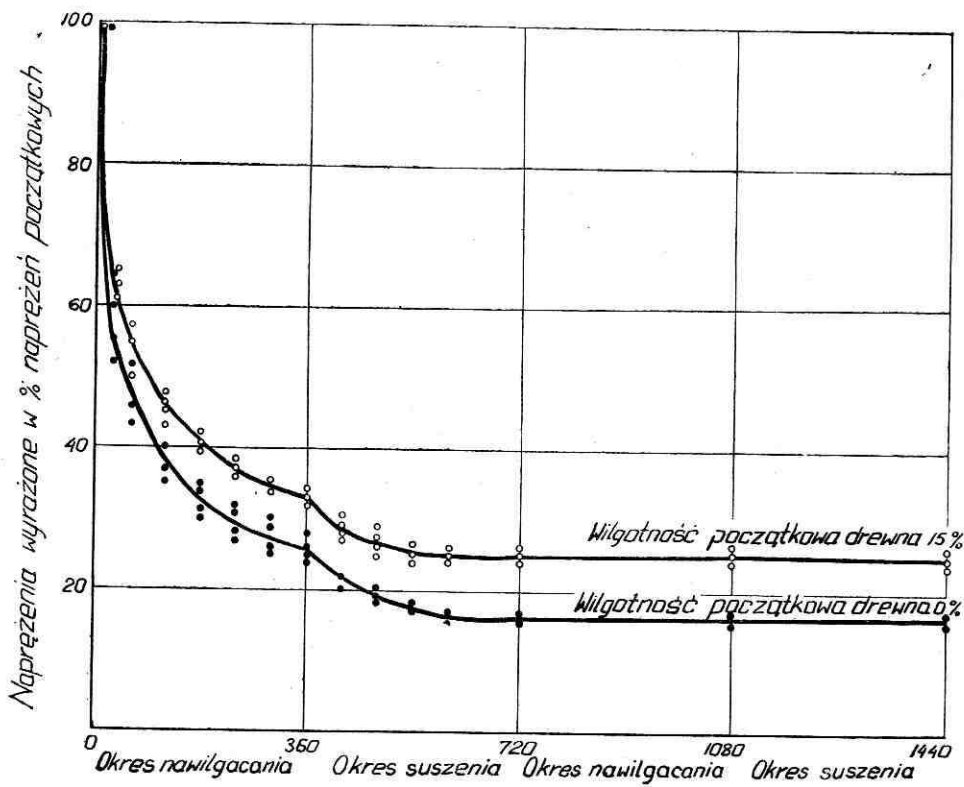
Dla stwierdzenia wpływu poszczególnych okresów nawilżania i suszenia drewna na relaksację naprężeń wyrażoną w procentach naprężeń początkowych, obliczono wartości zestawione w tab. 10.

Z tabeli 10 wynika, że w pierwszym okresie nawilżania beleczek relaksacja naprężeń wynosi: dla drewna o wilgotności początkowej 0% — 72 do 76% naprężeń początkowych, a dla drewna o wilgotności początkowej 15% — 66 do 68% naprężeń początkowych. Natomiast podczas pierwszego okresu suszenia drewna wartość ta waha się w granicach od 8 do 13% naprężeń początkowych. Stąd wynika, że decydujący wpływ na relaksację naprężeń miało nawilżanie drewna.

Tabela 10

Wartości relaksacji naprężeń wyrażone w procentach naprężeń początkowych uzyskane podczas kolejnego 360-minutowego nawilżania drewna wodą o temperaturze 60°C i suszenia w powietrzu o tej samej temperaturze

Wilgotność początkowa w %	Gatunek drewna	Wymiary beleczek w mm	Rodzaje zabiegu			
			pierwszy okres na-wilżania	pierwszy okres suszenia	drugi okres na-wilżania	drugi okres suszenia
			relaksacja naprężeń w % naprężeń początkowych			
0	sosna	20×20×700	76	7	0	0
		40×40×1400	72	13	0	0
	buk	20×20×700	75	9	0	0
		40×40×1400	74	11	0	0
15	sosna	20×20×700	67	7	0	0
		40×40×1400	66	10	0	0
	buk	20×20×700	67	8	0	0
		40×40×1400	68	8	0	0



Rys. 21. Wpływ na relaksację naprężeń kolejnego nawilżania drewna w wodzie o temperaturze 60°C i suszenia w powietrzu o temperaturze 60°C

Dalsze kolejne zmiany wilgotności drewna, jak już wspomniano, nie wykazały żadnego wpływu na naprężenia powstałe w drewnie podczas jego zginania.

Aby zobrazować wpływ czasu na relaksację naprężeń zachodzącą podczas dwukrotnego kolejnego nawilżania i suszenia drewna, wykonano wykres przedstawiony na rys. 21. Krzywe przedstawiające relaksację naprężeń w zależności od czasu trwania doświadczeń wykreślono wspólnie dla beleczek z drewna sosnowego i bukowego.

Z wykresu tego wynika, że podczas nawilżania i suszenia drewna relaksacja naprężeń przypadająca na jednostkę czasu trwania doświadczeń jest wyższa dla drewna o wilgotności początkowej 0% niż dla drewna o wilgotności 15%, z wyjątkiem krótkiego okresu początkowego, w którym wartość ta jest w przybliżeniu równa dla drewna o wilgotności początkowej 0 i 15%.

4. Kształtowanie się relaksacji naprężeń w zgiętych elementach podczas jednoczesnego nawilżania strefy rozciąganej i suszenia strefy ściskanej

Biorąc pod uwagę fakt, że w czasie zginania beleczek na stronie wklęsłej następuje ściskanie, a na stronie wypukłej rozciąganie włókien, wykonano doświadczenia dodatkowe nie objęte dotąd opisaną metodyką badań. W doświadczeniach tych stronę wklęsłą zgiętego elementu ogrzewano promieniami podczerwonymi w ten sposób, że temperatura na powierzchni deski wynosiła około 50° C. Stronę wypukłą natomiast nawilżano wodą przez pokrycie zewnętrznej płaszczyzny zgiętej deski mokrą watą.

Doświadczenia dotyczące wpływu jednoczesnego suszenia i nawilżania drewna na relaksację naprężeń przeprowadzono na deskach o wymiarach 45×200×4000 mm, przy wilgotności początkowej około 15 i 30%.

Deski zginano w sposób analogiczny jak beleczki w badaniach poprzednich, z tym że wielkość siły obciążającej zmieniano tak, by uzyskać każdorazowo strzałkę ugięcia wynoszącą 100 mm. Rozstaw podpór wynosił 3600 mm.

Po zakończeniu obserwacji relaksacji naprężeń deski odciążano, a pozostała po odciążeniu desek strzałka ugięcia przyjęto jako trwałe odkształcenie plastyczne. Wyniki doświadczeń jako wartości średnie z 10 równorzędnych powtórzeń zestawiono w tab. 11 i 12.

Dane zawarte w tab. 11 wykazują, że podczas jednoczesnego suszenia i nawilżania desek o wilgotności początkowej około 15% relaksacja naprężeń jest większa niż dla desek o wilgotności początkowej 30%.

Zjawisko to można wytłumaczyć tym, że dodatkowe nawilżanie strefy włókien rozciąganych w deskach o wilgotności początkowej 30% miało

Tabela 11

Wpływ suszenia strefy ściskanej oraz jednoczesnego nawilżania strefy rozciąganej zgiętych desek na relaksację naprężeń

Czas trwania doświadczenia w min	Wilgotność początkowa desek w %					
	15			30		
	średnia arytmetyczna naprężeń w		kwadratowe odchylenie $\pm \sigma$	średnia arytmetyczna naprężeń w		kwadratowe odchylenie $\pm \sigma$
	kG/cm ²	%		kG/cm ²	%	
0	291	100	16,6	275	100	17,8
30	260	90	16,6	247	90	13,2
60	239	82	17,0	237	86	15,2
120	216	75	11,9	226	82	12,3
180	195	67	14,6	210	76	16,0
240	181	62	15,7	205	75	15,4
300	167	58	13,6	195	71	18,0
360	154	53	13,6	190	69	18,1
480	143	49	19,0	181	66	20,2
600	137	47	18,2	175	64	16,2
720	130	45	19,0	167	60	17,3
960	124	43	20,9	160	58	16,9
1200	119	41	22,8	154	56	13,7
1440	114	39	21,8	147	53	12,1
2880	111	38	20,2	141	51	10,9
4320	105	36	21,8	139	50	12,1

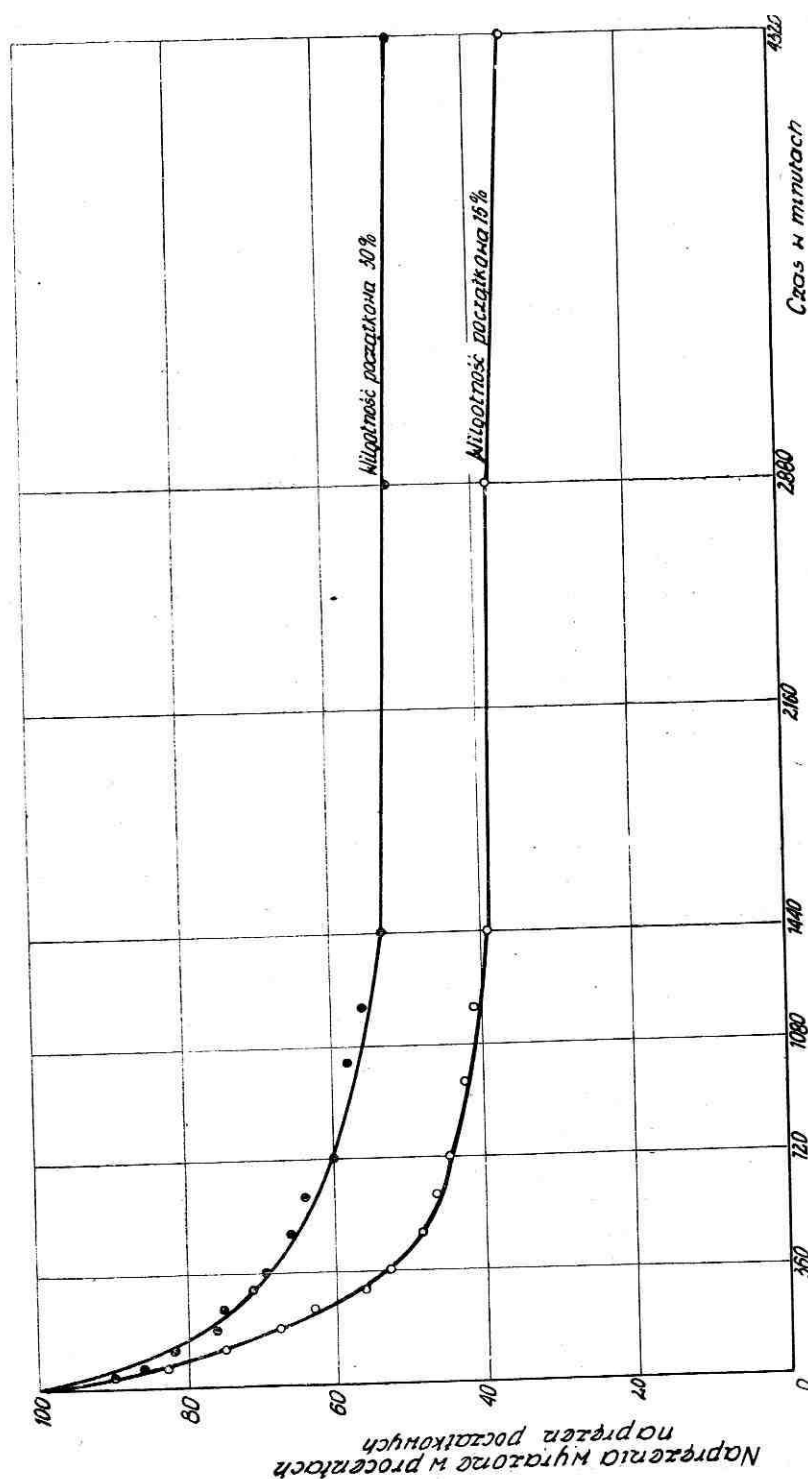
minimalny wpływ na relaksację naprężeń. Natomiast w deskach o wilgotności początkowej 15% dodatkowe nawilżanie włókien rozciąganych wpłynęło na relaksację naprężeń dodatnio na skutek tego, że pęcznienie drewna w strefie rozciąganej sprzyjało przyjęciu nowego stanu równowagi przez składowe elementy budowy drewna (24). Suszenie włókien poddanych ściskaniu sprzyjało natomiast kurczeniu się drewna (23) i utrwalaeniu kształtu, jaki został nadany desce w procesie zginania.

Na podstawie wyników zawartych w tab. 11 wykonano wykres (rys. 22), z którego wynika, że krzywe obrazujące relaksację naprężeń zachodzącą pod wpływem suszenia strefy ściskanej oraz nawilżania strefy rozciąganej są podobne do krzywych relaksacji naprężeń powstałych w czasie samego nawilżania lub suszenia drewna.

Tabela 12

Wpływ relaksacji naprężeń na trwałe odkształcenia zgiętych desek po zakończeniu suszenia strefy ściskanej i nawilżania strefy rozciąganej

Wilgotność początkowa desek w %	Trwałe odkształcenia wyrażone w procentach odkształceń powstałych po okresie 30-minu- towym od chwili odciążenia	Relaksacja naprężeń wyrażona w procentach naprężeń początkowych
15	66	64
30	52	50



Rys. 22. Wpływ czasu suszenia zgietych desek w strzefie włókien ściskanych oraz jednoczesnego nawilżania w strzefie włókien rozciąganych na relaksację naprężeń

Z tabeli 12 wynika, że istnieje wyraźna zależność między relaksacją naprężeń wyrażoną w procentach naprężeń początkowych a trwałymi odkształceniami plastycznymi wyrażonymi w procentach odkształceń całkowitych. Ogólnie można stwierdzić, że zależność ta jest w przybliżeniu proporcjonalna. Podobną zależność stwierdzono dla uprzednio parowanych beleczek bukowych poddanych procesowi suszenia (18).

WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników doświadczeń można sformułować następujące wnioski.

1. Wszelkie zmiany wilgotności drewna w granicach od stanu całkowicie suchego do punktu nasycenia włókien powodują w zasadzie relaksację naprężeń, powstałych w drewnie pod wpływem działania siły obciążającej.

2. Podczas nawilżania drewna zależność między relaksacją naprężeń a wzrostem wilgotności drewna w określonym przedziale wilgotności ma przebieg zbliżony do prostoliniowego, a mianowicie dla drewna o wilgotności początkowej 0% — w przedziale wilgotności 5 do 20%, a dla drewna o wilgotności początkowej 15% — w przedziale wilgotności 18 do 25%.

Wartość współczynnika relaksacji naprężeń obliczona dla całego przedziału wilgotności, w którym występowała relaksacja naprężeń, uzależniona jest od wilgotności początkowej drewna oraz od rodzaju i temperatury środowiska nawilżającego. Wzrost wilgotności początkowej drewna i temperatury środowiska nawilżającego zwiększa tę wartość współczynnika relaksacji naprężeń.

Wartość graniczna naprężeń, które podczas nawilżania drewna nie uległy relaksacji, jest niższa dla drewna o wilgotności początkowej 0% niż dla drewna o wilgotności początkowej 15%.

3. Podczas suszenia drewna relaksacja naprężeń występuje do wilgotności około 10%. W przedziale wilgotności od 30 do 20% między spadkiem wilgotności i relaksacją naprężeń zachodzi w przybliżeniu zależność liniowa.

Współczynnik relaksacji naprężeń obliczony dla całego przedziału wilgotności, w którym w czasie suszenia drewna występowała relaksacja naprężeń, jest uzależniony od gatunku drewna. Współczynnik relaksacji naprężeń dla drewna bukowego jest w przybliżeniu o około 25% wyższy niż dla drewna sosnowego. W czasie suszenia drewna w jednakowych warunkach szybkość relaksacji naprężeń jest wyższa dla drewna bukowego niż dla drewna sosnowego.

4. Podczas kolejnego okresowego nawilżania i suszenia drewna relaksacja naprężeń występuje tylko w pierwszym okresie nawilżania i suszenia. Wtórne nawilżanie i suszenie nie wywiera żadnego wpływu na spadek występujących w drewnie naprężeń.

5. Podczas suszenia strefy ściskanej oraz jednoczesnego nawilżania strefy rozciąganej uprzednio zgiętych elementów drewnianych relaksacja naprężeń jest również uzależniona od początkowej wilgotności drewna. W tym wypadku wzrost początkowej wilgotności drewna powoduje zmniejszenie relaksacji naprężeń.

6. Trwałe odkształcenia plastyczne w postaci strzałki ugięcia pozostałe po zakończeniu procesu relaksacji naprężeń są w przybliżeniu proporcjonalne do wartości relaksacji naprężeń, wyrażonej w procentach naprężeń początkowych. Wniosek ten potwierdza tezę, że relaksacji ulegają tylko naprężenia przejęte w czasie obciążania drewna przez te elementy jego budowy, które mają własności plastyczne, oraz że nie ulegają relaksacji naprężenia przejęte przez elementy budowy drewna, zachowujące podczas zmian wilgotności drewna własności sprężyste.

7. Dla utrwalenia kształtu nadanego drewnianym elementom podczas gięcia, oprócz dotychczas stosowanego w praktyce procesu suszenia, można stosować również nawilżanie lub kolejne nawilżanie i suszenie, lub też suszenie strefy ściskanej oraz jednoczesne nawilżanie strefy rozciąganej uprzednio zgiętych elementów w zależności od ich wilgotności początkowej i użytkowej.

Praca doktorska wykonana w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna Wyższej Szkoły Rolniczej w Poznaniu. Praca wpłynęła do Komitetu Redakcyjnego 12 czerwca 1958 r.

LITERATURA

1. Armstrong L. D.: Creep in Wood. „Timber Technology” 1956; nr 2208, s. 527.
2. Bielajew M. M.: Wytrzymałość materiałów. Warszawa 1956.
3. Brown H. O., Panshin A. J., Forsait L. C. C.: Textbook of wood technology. New York 1949.
4. Chuchrjanski P. Ch.: Proczność dREWIESINY. Goslesbumizdat 1955.
5. Draffin J. O., Mühlenbruch C. N.: Transactions of the American Society of Tering Materials. Bull. 96; 1937.
6. Frey-Wyssling A.: „Naturwissenschaft” 1940; Bd. 28, s. 385.
7. Grossman P. U. A., Kingston P. S. T.: Creep and stress relaxation in wood during wendeng. Manuscript received July 9, 1954 (fotokopia).
8. Grossman P.: Stress relaxation in wood. „Nature” 1954; nr 4392, s. 42.
9. Hübner H.: Plastische Formung und Spannungsbesichtigung bei Hölzer, unter besonderer Berücksichtigung der Holztrocknung. „Holz als Roh- u. Werkstoff” 1956; nr 11, s. 442.
10. Iwanow J. M.: Dwie oblasti dieformirowanija dREWIESINY i priediel plasticzeskogo tieczenia. „Trudy Instituta Lesa” 1953, T. 9, s. 431.
11. Kaliski S.: Techniczne problemy dynamicznej teorii sprężystości. „Zeszyty Problemowe Nauki Polskiej”, 1957; t. XI, s. 31.
12. Kollmann F.: Vorgänge und Änderungen von Holzeigenschaften beim Dämpfen. „Holz als Roh- u. Werkstoff” 1939; nr 1, s. 1.
13. Kollmann F.: Über die Abhängigkeit einiger mechanischer Eigen-

schaften der Hölzer von der Zeit, von Kerben und von der Temperatur. „Holz als Roh- u. Werkstoff“ 1952; nr 5, s. 187.

14. Kollmann F., Narayana-murti: Studien über die Plastifizierung von Holz. „Holz als Roh- u. Werkstoff“ 1955; nr 3, s. 91.

15. Kollmann F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Berlin 1951.

16. Krieczetow I.: Suszenie drewna. Warszawa 1955.

17. Krzysik F.: Nauka o drewnie Warszawa 1957.

18. Ławniczak M.: Badania nad odkształceniami i relaksacją naprężeń w parowanym drewnie bukowym. „Prace Instytutu Technologii Drewna” 1958; zeszyt 1 (14), s. 61.

19. Mark H., Tobolsky A. V. Chemia fizyczna polimerów. Warszawa 1957.

20. Meredith R.: Mechanical properties of wood and paper. Amsterdam 1953.

21. Michniewicz W.: Konstrukcje drewniane. Warszawa 1957.

22. Praca zbiorowa: Issledowanie procznosti i dieformativnosti dreviesiny. Moskwa 1956.

23. Perkitny T., Stefaniak J.: Wpływ naprężeń rozciągających na pęcznienie i kurczenie się drewna. Rękopis.

24. Perkitny T., Stefaniak J., Rudnicki E.: Wpływ naprężeń ściskających na pęcznienie i kurczenie się drewna. „Prace Instytutu Technologii Drewna” 1957; zeszyt 4, s. 52.

25. Tomaszczyk W.: Pełzanie metali. Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze, 1956.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ НА РЕЛАКСАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ ВОЗНИКШИХ В ДРЕВЕСИНЕ ПРИ ЕЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНОМ ИЗГИБЕ

Краткое содержание

Исследования касались влияния изменений влажности древесины и температуры увлажняющей среды на релаксацию напряжений.

Целью работы было выяснение хода релаксации напряжений возникших в древесине в течение ее сгибания, происходящей под влиянием изменений влажности древесины, а также — определение предела и динамики этой релаксации при увлажнении древесины в интервале гигроскопической влажности а также при высыхании древесины в интервале от влажности соответствующей точке насыщения до абсолютно сухой древесины.

Результаты произведенных опытов можно вкратце представить следующим образом:

1. Во время увлажнения предварительно согнутой древесины от абсолютно сухого состояния до влажности соответствующей точке насыщения волокон выступает релаксация напряжений.

Между влажностью древесины и релаксацией напряжений в определенных интервалах влажности существует приблизительно линейная зависимость, а именно: для древесины с начальной влажностью 0% в интервале влажности 5—20%, а для древесины с начальной влажностью 15% — в интервале влажности 15—20%.

Коэффициент релаксации напряжений, вычисленный для всего интервала влажности, в котором выступала релаксация напряжений, является для древесины с начальной влажностью 15% примерно на 60% выше, чем для древесины с начальной влажностью 0%.

Рост температуры среды увлажняющей древесину с начальной влажностью 0%, от 20 до 60° С а также от 60 до 100° вызывает прирост коэффициента релаксации напряжений соответственно 21% и 13%. Однако во время увлажнения древесины с начальной влажностью 15% такой же самый рост температуры вызывает прирост коэффициента релаксации напряжений на 34% и 25%.

Во время увлажнения древесины не установлено отчетливого влияния породы древесины (сосна, бук) и размера брусков (20 × 20 × 700 мм и 40 × 40 × 1400 мм) на величину коэффициента релаксации напряжений.

Между определенными периодами времени увлажнения и релаксацией напряжений, выраженной в процентах общей релаксации, установлена следующая зависимость:

на период 0 — 120 минут	приходится	54 — 86%	общей релаксации		
„ „ 120 — 360	„ „	11 — 24%	„ „		
„ „ 360 — 720	„ „	3 — 15%	„ „		
„ „ 720 — 1440	„ „	0 — 7%	„ „		

Релаксация напряжений, выраженная в процентах начальных напряжений, приходящихся на тот же самый период увлажнения древесины, достигла более высокой величины для древесины с начальной влажностью 0%, чем для древесины с начальной влажностью 15%. Общая релаксация напряжений была также выше для древесины с начальной влажностью 0%.

2. Во время сушки древесины с начальной влажностью в 30% до средней влажности около 10%, каждому снижению влажности древесины сопутствовала релаксация напряжений.

Величина релаксации напряжений, выступающей во время сушки древесины в воздушном пространстве с температурой в 60° С при относительной влажности воздуха от 65 до 10% зависела от породы древесины, а именно коэффициент релаксации напряжений для всего интервала, в котором выступала релаксация, составлял для буковой древесины 3,94% а для сосновой 3,19%.

Во время сушки древесины не установлено существенного влияния размера брусков (20 × 20 × 700 мм и 40 × 40 × 1400 мм) на величину релаксации напряжений.

В определенных периодах времени древесины установлено, что релаксация напряжений, выраженная в процентах общей релаксации, достигла следующей величины:

В период 0 — 120 минут в интервале	74 — 84%	общей релаксации
„ „ 120 — 360 „ „	12 — 18%	„ „
„ „ 360 — 720 „ „	0 — 7%	„ „
„ „ 720 — 1440 „ „	0 — 1%	„ „

Релаксация напряжений, выраженная в процентах начальных напряжений, выступающая в тех же самых периодах времени сушки, была выше для буковой древесины, чем для сосновой, вследствие чего общая релаксация напряжений достигла более высокой величины, чем для буковой древесины.

3. Во время двухкратного поочередного 6-часового увлажнения древесины в воде с температурой в 60°C и сушки древесины в воздушном пространстве при температуре 60°C и относительной влажности 65 до 20%, релаксация напряжений выступала только в период первого увлажнения и сушки брусков. Во время вторичного увлажнения и сушки древесины релаксация напряжений не выступала.

Во время первого периода увлажнения коэффициент релаксации напряжений составлял для древесины с начальной влажностью 0% от 2,38 до 2,62%, а для древесины с начальной влажностью 15% от 3,98 до 4,30.%

Во время первого периода сушки древесины коэффициент релаксации составлял всего лишь от 0,33 до 0,76%. Отсюда следует, что решающее влияние на релаксацию напряжений имеет увлажнение древесины. Релаксация напряжений, выступающая во время первого периода увлажнения и сушки древесины, выраженная в процентах начальных напряжений, была выше для древесины с начальной влажностью 0%, чем для древесины с начальной влажностью в 15%.

4. Во время одновременной сушки инфракрасными лучами (температура около 50°C) сжимаемой зоны и увлажнения водой с температурой 20°C растягиваемой зоны (доски предварительно согнутые, размером $45 \times 200 \times 4000$ мм) после 72-часового периода наблюдений релаксация напряжений для досок с начальной влажностью 15% составляла 64% начальных напряжений, а для досок с начальной влажностью 30%—50% начальных напряжений.

Остаточные деформации, — возникшие после окончания одновременной сушки и увлажнения досок а также после удаления действия остальной силы нагрузки, — были в основном пропорциональны величине релаксации напряжений. Этот факт служит подтверждением тезиса, что релаксации подлежат лишь напряжения, возникшие во время нагрузки древесины в элементах ее строения, имеющих пластические свойства, а также, что не подлежат релаксации напряжения, возникшие в элементах строения древесины, сохраняющих упругие свойства, во время изменений влажности древесины.

INVESTIGATIONS ON EFFECTS OF MOISTURE CHANGES IN WOOD UPON THE RELAXATION OF STRESSES DEVELOPED BY

PRECEDING BENDING

Summary

The investigations were carried out in order to explain the relaxation of stresses developed in wood during its preceding bending, resulting from changes in the moisture of wood. The performed investigations aimed to determine the range and dynamics of that relaxation in the interval of hygroscopic moisture of wood.

The investigation results are given below in brief:

1. The relaxation of stresses occurs in time of soaking previously bent wood from completely dry state up to the (moisture adequate to) fibre saturation point.

In definite intervals of moisture there is approximately a linear relationship between the moisture of wood and the relaxation of stresses, namely for wood at the initial moisture 0% in the interval of moisture 5—20% and for wood at the initial moisture 15% — in the interval of moisture 18—25%.

Relaxation coefficient of stresses calculated for the whole interval of moisture, where the relaxation of stresses occurred, was for wood at the initial moisture 15% higher of about 60% than for wood at the initial moisture 0%.

The rise of temperature from 20 to 60°C and from 60—100°C of the soaking surroundings of wood at the initial moisture 0%, causes the increase of relaxation coefficient of stresses by 21% and 13% respectively. On the other hand in time of soaking wood at the initial moisture 15%, the same rise of temperature causes the increase of relaxation coefficient of stresses by 34% and 25%.

During the soaking process of wood the value of relaxation coefficient of stresses was not distinctly affected by species (pine, beech) and dimensions of the samples (20 × 20 × 700 mm and 40 × 40 × 400 mm).

Between the individual periods of time of soaking and the relaxation of stresses, expressed in percentage of total relaxation, following relation was stated:

0 — 120 min	— 54 —	86% total relaxation		
120 — 360	„ — 11 —	24%	„	„
360 — 720	„ — 3 —	15%	„	„
720 — 1440	„ — 0 —	7%	„	„

In the same period of moistening the relaxation of stresses expressed in percentage of initial stresses, reached higher value for wood at the

initial moisture 0% than for wood at the initial moisture 15%. Total relaxation of stresses was also higher for wood at the initial moisture 0%.

2. Every decrease of wood moisture occurring during drying wood at 30% of the initial moisture up to 10% of the average moisture, was accompanied by the relaxation of stresses. Magnitude of stress relaxation occurring in air-drying wood at temperature of 60°C and 65—10% relative atmospheric humidity was dependent upon wood species.

Relaxation coefficient of stresses for total interval, in which the relaxation occurred, amounted for beech-wood to 3,94% and for pine-wood to 3,19%.

In drying process of wood there were stated no significant differences in magnitude of stress relaxation, which appeared in samples of dimensions $20 \times 20 \times 700$ mm and $40 \times 40 \times 1400$ mm. It was found that in the individual periods of drying wood the stress relaxation expressed as percentage of the total relaxation obtained the value:

in time	0 — 120 min	74 — 88%	in range of total relaxation				
	120 — 360 „	12 — 18%	„	„	„	„	„
	360 — 720 „	0 — 7%	„	„	„	„	„
	720 — 1440 „	0 — 1%	„	„	„	„	„

Relaxation of stresses expressed as percentages of initial stresses occurring in the same periods of drying time, was higher for beech-wood than for pine-wood. In consequence of this, total relaxation of stresses obtained higher value for beech-wood.

3. At two successive soaking of wood in water for six hours under temperature of 60°C and air-drying at temp. of 60°C, in relative humidity 65 — 20%, relaxation of stresses occurred only during the first period of soaking and drying the samples. It did not appear at secondary moistening and drying period. During the first moistening period the relaxation coefficient of stresses amounted for wood by initial moisture 0% to 2,38—2,62% and for wood by initial moisture 15% to 3,98—4,30%.

In the first period of drying wood the relaxation coefficient of stresses amounted only to 0,33—0,76%.

This permit to draw the conclusion that the decisive effect on relaxation of stresses belongs to the moistening process of wood. Relaxation of stresses occurring in time of the first period of moistening and drying wood expressed as percentages of initial stresses was higher for wood by initial moisture 0%, than for that by 15%.

4. At the same time the compression area was dried with infra-red rays (under temp. of about 50°C) and the tension area (the samples of dimensions $45 \times 200 \times 4000$ mm were previously bent) was moistened in water at 20°C. After 72 hours of observations relaxation of stresses

of samples by 15% of initial moisture amounted to 64% of initial stresses and for samples by 30% of initial moisture to 50% of initial stresses.

Permanent deflections, arisen after the simultaneous process of drying and moistening the samples was completed and the loading power was removed, were in general proportional to the value of relaxation stresses. This fact is a corroboration of the statement, that only stresses acquired by plastic elements of wood structure are subject to relaxation when under load and also that stresses acquired by resilient elements of wood structure under variable moisture conditions are not subject to relaxation.

TREŚĆ

Wstęp	103
I. Cel pracy	106
II. Metodyka badań	106
1. Dobór materiału drzewnego i sposobu obciążenia badanej beleczki	107
2. Dobór zabiegów zmierzających do zmiany wilgotności drewna	113
3. Sposób pomiaru relaksacji naprężeń	115
III. Opis przeprowadzonych doświadczeń	116
1. Przygotowanie materiału drzewnego	116
2. Zginanie beleczek	117
3. Działanie na beleczkę czynnikami zmieniającymi wilgotność drewna	118
4. Obserwacja przebiegu relaksacji naprężeń i zmian wilgotności drewna	118
IV. Wyniki doświadczeń i ich analiza	119
1. Wpływ nawilżania drewna na relaksację naprężeń powstałych podczas jego zgięcia	119
2. Wpływ suszenia drewna na relaksację naprężeń powstałych podczas jego uprzedniego zgięcia	135
3. Wpływ kolejnego nawilżania i suszenia drewna na relaksację naprężeń	141
4. Kształtowanie się relaksacji naprężeń w zgiętych elementach podczas jednoczesnego nawilżania strefy rozciąganej i suszenia strefy ściskanej	144
Wnioski	147
Literatura	148
Краткое содержание	149
Summary	152