F O L I A F O R E S T A L I A P O L O N I C A
SERIA B, ZESZYT 6 1965

Aleksander Korzeniowski

BADANIA NAD MODUŁEM SPRĘŻYSTOŚCI WARSTWOWEGO UKŁADU DREWNO-KLEJ MOCZNIKOWY

ИССЛЕДОВАНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ СЛОИСТОЙ СИСТЕМЫ ДРЕВЕСИНА — МОЧЕВИННЫЙ КЛЕЙ

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DEN ELASTIZITÄTSMODUL DER SCHICHTANORDNUNG HOLZ-HARNSTOFFLEIM

WSTĘP

Układ warstwowy drewno — klej jest stosowany w produkcji tworzyw drzewnych klejonych z fornirów (np. sklejka, lignofol lub inne rodzaje drewna warstwowego), oraz w produkcji płyt stolarskich i kształtowych elementów konstrukcyjnych z tarcicy lub forniru. Rodzaj użytego półfabrykatu drzewnego i rodzaj kleju zależą od zastosowania produkowanych elementów. Spośród coraz szerzej używanych klejów syntetycznych największe zastosowanie — zwłaszcza w produkcji tworzyw drzewnych oraz w produkcji wyrobów meblarskich — mają obecnie kleje mocznikowe. Obserwacje praktyczne, poczynione podczas wieloletniego stosowania tych klejów, nasuwają przypuszczenie, że sprężystość utworzonej z nich skleiny zależy w znacznym stopniu od rodzaju i ilości wypełniaczy, które dodaje się do kleju w celu ułatwienia sklejenia oraz polepszenia właściwości skleiny. Przesłanki dla postawienia takiej hipotezy wynikają również z fizycznego charakteru działania tych wypełniaczy. Pośrednie sprawdzenie eksperymentalne tej hipotezy poprzez określenie sprężystości warstwowego układu drewno — klej jest zasadniczym celem niniejszej pracy.

Punktem wyjścia dla ustalenia metodyki badania było założenie, iż przy małej grubości warstw drewna (forniru) sprężystość sklein powinna w znacznym stopniu wpływać na ogólną sprężystość układu, która może tym samym stanowić wskaźnik sprężystości sklein.

Dotychczasowe badania nad mechanicznymi właściwościami układu drewno — klej obejmują w większości wytrzymałość na ścinanie lub rzadziej — wytrzymałość na rozciąganie skleiny prostopadle do płaszczyzny skle-

jenia; badano również zależność wytrzymałości od szeregu technologicznych parametrów procesu klejenia oraz zależność wytrzymałości od czynników klimatycznych, na których działanie mogą być wystawione złącza konstrukcyjne. Oprócz tego powszechnie prowadzone były badania nad wytrzymałością klejonych tworzyw drzewnych, np. sklejki, płyt stolarskich, niezgęszczonego drewna warstwowego, lignofolu i płyt wiórowych.

Badania wytrzymałościowe mają charakter niszczący i uniemożliwiają powtórzenie oznaczenia na tym samym materiale; dlatego przy badaniu wpływu czynników działających w czasie konieczne jest korzystanie z próbek analogicznych, co wskutek dość znacznej dyspersji otrzymywanych wyników wymaga dużej liczby powtórzeń oznaczenia i poważnie zwiększa pracochłonność badań oraz obliczeń.

W odróżnieniu od badań wytrzymałościowych, oznaczanie właściwości sprężystych odbywa się w sposób nie niszczący badanego materiału, co umożliwia przeprowadzenie dowolnej liczby powtórzeń badania na tym samym, całkowicie porównywalnym materiale. Zmniejsza to pracochłonność badań i wpływa korzystnie na dokładność otrzymywanych wyników. Mając to na uwadze w niniejszej pracy wybrano sprężystość jako wskaźnik mechanicznych właściwości układu drewno — klej.

Sprężystość materiału można scharakteryzować za pomocą modułu sprężystości podłużnej E, czyli modułu Younga, oraz za pomocą modułu ścinania G, zwanego również modułem odkształcenia postaciowego. Wartości liczbowe tych modułów mają zastosowanie w obliczeniach konstrukcyjnych oraz mogą być użyte do oszacowania wytrzymałości materiału.

I. PRZEGLĄD LITERATURY

1. ROLA WYPEŁNIACZY W KLEJU MOCZNIKOWYM

Ciekłe kleje mocznikowe są wodnym roztworem żywicy syntetycznej, otrzymanej przez kondensację mocznika $NH_2—CO—NH_2$ z formaldehydem (aldehydem mrówkowym) $HCOH$; właściwości produktu kondensacji zależą w głównej mierze od ilościowego stosunku obu tych składników wyjściowych, od odczynu i temperatury środowiska oraz od czasu trwania reakcji, którą przerywa się w chwili osiągnięcia żądanego stopnia kondensacji.

W procesie klejenia należy stworzyć warunki dla ostatecznej i szybkiej kondensacji żywicy; kondensacja ta prowadzi do zmiany stanu skupienia żywicy z ciekłego na stały poprzez dalsze powiększenie cząsteczek polikondensatu i utworzenie pomiędzy nimi przestrzennych wiązań. Utwardzenie zawartej w kleju żywicy uzyskuje się przez obniżenie pH środowiska za pomocą kwasów lub soli o kwaśnym odczynie albo za pomocą ich mieszanin. Utwardzanie odbywa się w normalnej temperaturze otoczenia

około 20° C lub w temperaturze podwyższonej do 90 . . . 120° C, co wydatnie przyspiesza reakcję. Przy zmianie stanu skupienia żywica silnie się kurczy, wydzielając jednocześnie znaczną ilość wody kondensacyjnej. Utwardzona żywica mocznikowa nie rozpuszcza się w wodzie, jednak dość silnie w niej pęcznieje, zwłaszcza przy podwyższeniu temperatury.

Kleje o małym stężeniu żywicy mają zazwyczaj małą lepkość, w związku z czym łatwo wnikają w pory drewna; wskutek tego ilość kleju może stać się niewystarczająca dla pokrycia ciągłą warstewką całej sklejanej powierzchni i wytrzymałość spoiny obniża się. Wydzielająca się w trakcie utwardzania kleju woda kondensacyjna może nadmiernie nawilżać klejone drewno, co przedłuża proces klejenia. Aby zapobiec obu tym niekorzystnym zjawiskom, stosuje się wypełniacze w postaci sproszkowanych substancji organicznych lub nieorganicznych, które dodane do kleju zwiększają jego lepkość. Wypełniacze organiczne, np. mąki skrobiowe, mąki skrobiowo-białkowe lub mąka drzewna, odznaczają się znaczną higroskopijnością i zdolnością pęcznienia, co z jednej strony umożliwia ich stosowanie w niezbyt znacznych ilościach, z drugiej zaś powoduje szybkie wchłanianie wody kondensacyjnej. Prękość pęcznienia wypełniaczy i związana z tym zdolność zwiększania lepkości kleju wzrasta ze stopniem rozdrobnienia wypełniaczy i z podwyższaniem temperatury kleju. Pod działaniem kwaśnego utwardzacza i podwyższonej temperatury mąki skrobiowo-białkowe ulegają częściowej hydrolizie, tworząc roztwory koloidowe o właściwościach klejących. W związku z tym tej grupie wypełniaczy nadaje się nazwę aktywnych w odróżnieniu od wypełniaczy pasywnych, które nie wykazują zdolności klejenia; do wypełniaczy pasywnych należą substancje nieorganiczne oraz niektóre substancje organiczne, jak mąka drzewna, lignina, mąka ze zmineralizowanych produktów roślinnych (np. z łupin, pestek lub orzechów), sproszkowane żywice sztuczne itp.

Przy klejeniu w temperaturze około 20° C, gdy utwardzanie przebiega stosunkowo wolno, mogą mieć zastosowanie zarówno wypełniacze aktywne, jak pasywne; przy klejeniu w temperaturze podwyższonej (zwłaszcza powyżej 100° C) wobec szybkiego wydzielania się wody kondensacyjnej najlepsze okazały się wypełniacze aktywne, jak mąka żytnia, pszenna, ziemniaczana, łubinowa, sojowa, rącznikowa i inne mąki skrobiowe lub skrobiowo-białkowe. W Polsce praktyczne zastosowanie ma przede wszystkim mąka żytnia lub ziemniaczana.

Wypełniacze — zwłaszcza wypełniacze o strukturze włóknistej, np. mąka drzewna — zmniejszają kurczenie się kleju podczas utwardzania i obniżają więc tym samym naprężenia powstające w skleinie. Wypełniacze higroskopijne dodane w znacznej ilości zmniejszają wytrzymałość skleiny oraz jej wodoodporność; dlatego zawartość ich ustala się na zmiennym poziomie, zależnym od wymaganych właściwości skleiny. Optymalna zawartość wypełniacza nie jest zazwyczaj jednakowa dla różnych mecha-

nicznych i fizycznych właściwości skleiny; w zastosowaniu przemysłowym znaczną rolę odgrywają też względy ekonomiczne, wynikające z różnicy w cenie kleju oraz wypełniaczy.

Na podstawie obserwacji praktycznych utarło się przekonanie, że dodatek wypełniaczy pęczniejących zwiększa odkształcalność i sprężystość skleiny kleju mocznikowego; przekonanie to nie znalazło jednak dotychczas potwierdzenia w postaci wyników systematycznego badania eksperymentalnego. Liczne są natomiast dane dotyczące innych właściwości kleju mocznikowego. Technologię klejenia i zjawiska zachodzące podczas utwardzania kleju mocznikowego omawiają szczegółowo F. Kollmann (22), A. Rivat-Lahousse (35), N. A. de Bruyne i R. Houwink (8), E. Plath (33), R. Z. Tiemkina, G. P. Płotnikowa i R. A. Mirkowicz (41), N. Arnoldt (4, 5) oraz inni autorzy. Metodyczne badania nad pęcznieniem skrobiowych wypełniaczy kleju oraz ich lepkością w zawiesinie wodnej przeprowadził H. Neusser (30); inne właściwości mąk skrobiowych, obejmujące głównie wpływ pH, temperatury i wilgotności mąki na jej hydrolityczną odbudowę badali M. Krajčinović i J. Djukić-Jovanović (25), S. J. Pirt i W. J. Whelan (32) oraz B. Acena (1). Laboratoryjne metody oznaczania fizycznych właściwości oraz chemicznej analizy skrobi i produktów pochodnych podaje R. W. Fetzer (14).

Badania wytrzymałości sklein kleju mocznikowego, uwzględniające głównie wpływ rodzaju wypełniacza i jego zawartości na wytrzymałość na ścinanie lub na wodoodporność skleiny, przeprowadzili m. in. J. S. Sodhi (39), Cz. Rowiński (36), B. Dalewski i A. Lendzion (12), R. F. Blomquist i W. Z. Olson (7) oraz A. Korzeniowski i K. Piłatówna (24); dwie ostatnie prace obejmują także wpływ czasu przebywania skleiny w zróżnicowanych warunkach otoczenia na jej wytrzymałość, co pozwala wnioskować o prędkości starzenia się skleiny. W dostępnej autorowi literaturze brak natomiast danych co do zmian modułu sprężystości warstwowego układu drewno — klej w zależności od czasu; wobec stosowania drewna warstwowego w konstrukcjach przewidzianych do długotrwałego użytkowania praktyczna przydatność takich danych wydaje się niewątpliwa.

2. METODY OKREŚLANIA MODUŁÓW SPRĘŻYSTOŚCI

Pomiar modułu sprężystości podłużnej E i modułu ścinania G można przeprowadzić różnymi metodami, które dadzą się zaliczyć do dwu zasadniczych grup badań — statycznych lub dynamicznych.

Metody statyczne opierają się na pomiarze przyrostu odkształcenia materiału przy statycznym (ściślej — quasistatycznym) powolnym przyroście obciążenia. Zależność pomiędzy naprężeniem i odkształceniem ciała dosko-

nale sprężystego jest liniowa, a tangens kąta nachylenia prostej — obrazującej tę zależność — do osi odkształceń wyraża wartość modułu:

przy ściskaniu lub rozciąganiu: $E_s = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ .....(1)

przy zginaniu: $E_s = \frac{M\varrho}{J}$ .....(2)

przy ścinaniu: $G_s = \frac{\tau}{\beta}$ .....(3)

gdzie E_s — statyczny moduł sprężystości podłużnej,
G_s — statyczny moduł ścinania,
σ — naprężenie normalne,
τ — naprężenie styczne,
M — moment zginający,
J — moment bezwładności przekroju,
ε — względne odkształcenie liniowe,
β — względne odkształcenie postaciowe,
ϱ — promień krzywizny osi odkształconej.

Zarówno drewno, jak klej nie są ciałami sprężystymi, lecz wykazują właściwości ciał lepkosprężystych lub sprężystoplastycznych, wobec czego przyrosty ich odkształcenia nie są wprost proporcjonalne do przyrostów naprężeń, a współzależność tych wielkości tym bardziej odbiega od prostoliniowej, im większy przedział naprężeń rozpatrujemy. Wskutek tego wartość pomierzonych modułów sprężystości lub modułów ścinania nie jest stała, lecz maleje ze wzrostem wartości naprężenia końcowego; za moduł przyjmuje się bowiem każdorazowo tangens kąta nachylenia kolejnej siecznej, przeprowadzonej przez początek układu współrzędnych i coraz to bardziej od niego odległy punkt leżący na krzywej wykresu zależności odkształcenia od naprężenia. Ze względu na ograniczoną dokładność tensometrów służących do pomiaru odkształcenia, stosowanie dowolnie małych naprężeń końcowych nie jest możliwe; w związku z tym statyczne pomiary modułów E_s i G_s drewna warstwowego obarczone są pewnym błędem metodycznym. W przypadku oznaczania modułu sprężystości E_s przy zginaniu dodatkowe błędy mogą być spowodowane działaniem naprężeń ścinających, wywołanych przez siły poprzeczne.

Metody statycznego pomiaru modułu sprężystości podłużnej i modułu ścinania drewna litego oraz drewna warstwowego omawiają między innymi F. Kollmann (22), F. Krzysik (26), A. X. Schmidt i Ch. A. Marlies (38), W. A. Bażenow (6) i R. Keylwerth (18).

Metody dynamiczne opierają się na pomiarach wielkości fizycznych albo mechanicznych, zależnych od modułu sprężystości lub modułu ścinania, przy czym próbki materiału wprowadza się w drgania. Kierunek drgań może być równoległy do osi próbki (drgania podłużne) albo prostopadły do niej (drgania poprzeczne, czyli giętne); można też jednocześnie

wzbudzać w próbce drgania podłużne i poprzeczne lub też drgania skrętne. Opracowano kilka metod, różniących się rodzajem drgań i mierzonych wielkości. Wspólną ich cechę stanowi zastosowanie elektronicznych generatorów (zazwyczaj typu RC), wzbudzających niegasnące drgania próbki za pomocą elektromagnesu. Pomiary przeprowadza się miernikami elektrycznymi lub oscylografem katodowym, transformując mierzone wielkości fizykomechaniczne na wielkości elektryczne za pośrednictwem przemienników elektromechanicznych (np. indukcyjnych, oporowych czy piezoelektrycznych). Generator drgań i przyrządy pomiarowe łączy się w układ liniowy albo mostkowy; układy mostkowe zapewniają większą dokładność pomiaru. Częstotliwość stosowanych drgań zawiera się w granicach częstotliwości dźwiękowej lub ultradźwiękowej.

Obliczenie wartości dynamicznych modułów E_d i G_d można przeprowadzić na podstawie pomiarów prędkości dźwięku przewodzonego, tłumienia lub częstotliwości drgań własnych rzędu podstawowego albo kolejnych harmonicznych tejże częstotliwości (czyli drgań o częstotliwościach rezonansowych, a ściślej — blisko rezonansowych); jednocześnie mierzy się ciężar właściwy materiału. Badania opierające się na pomiarze częstotliwości blisko rezonansowej są najprostsze w wykonaniu, najmniej pracochłonne i wskutek tego stosunkowo najbardziej rozpowszechnione; dla pomiarów tego typu zachodzą następujące zależności:

przy drganiach podłużnych: $$E_d = \frac{4\,l^2}{n} f^2 \frac{\gamma}{g} \quad \ldots\ldots (4)$$

przy drganiach poprzecznych (dla pręta o przekroju prostokątnym): $$E_d = \frac{48\,\pi^2\,l^4}{h^2\,m^4} f^2 \frac{\gamma}{g} \quad \ldots\ldots (5)$$

przy drganiach skrętnych: $$G_d = D\gamma f^2 \quad \ldots\ldots (6)$$

gdzie
- E_d — dynamiczny moduł sprężystości podłużnej,
- G_d — dynamiczny moduł ścinania,
- l — długość próbki,
- h — wysokość przekroju próbki,
- γ — ciężar właściwy materiału,
- g — przyspieszenie ziemskie,
- f — częstotliwość drgań blisko rezonansowych,
- n — liczba drgań (cykli),
- m — pierwiastek równania: $\cos m \cdot \cos hm = 1$,
- D — współczynnik zależny od wymiarów próbki i sposobu wzbudzenia drgań.

W porównaniu z modułem statycznym E_s moduł dynamiczny E_d należy traktować jako średni sieczny moduł sprężystości. Wartość liczbowa E_d pomierzona przy drganiach poprzecznych jest mniejsza od wartości rzeczywistej, którą można obliczyć uwzględniając dosyć skomplikowany wpływ naprężeń stycznych, wywołanych działaniem sił poprzecznych, wy-

nikających z bezwładności drgającego pręta. W przypadku niedoskonale sprężystych ciał rzeczywistych należy również uwzględnić wpływ histerezy sprężystej podczas kolejnych cyklów obciążenia dynamicznego, który może mieć znaczenie przy pomiarach wymagających znacznej dokładności.

Przegląd dynamicznych (dźwiękowych) metod określania mechanicznych właściwości ciał stałych podają C. E. Kesler i T. S. Chang (20) oraz A. X. Schmidt i Ch. A. Marlies (38); metodę pomiaru kompleksowego modułu sprężystości materiałów izolacyjnych opisuje H. Andres (3). Dynamiczne metody pomiaru modułu sprężystości drewna omawiają F. Kollmann (22), I. G. D. Lee (28), C. G. Tickle (40), W. A. Bażenow (6), F. F. Sadowskij (37), J. Wroński (42), R. Dobrowolski (13) oraz F. Kollmann i H. Krech (23). Dwaj ostatni autorzy przeprowadzili szczegółową analizę teoretyczną dynamicznego pomiaru modułu sprężystości, modułu ścinania, prędkości dźwięku przewodzonego oraz tłumienia, popartą wynikami pomiarów tych wielkości dla drewna świerkowego i dębowego w zależności od ich ciężaru właściwego oraz wilgotności. W badaniach swych uwzględnili oni porównanie modułu dynamicznego ze statycznym modułem sprężystości i oparli się na licznych źródłowych pracach innych autorów. F. Kollmann i H. Krech stwierdzili, że przy obciążeniach zginających lub drganiach giętnych drewna świerkowego i dębowego zachodzą następujące zależności:

1. Zależność modułu sprężystości E_d od ciężaru właściwego jest większa niż modułu ścinania G_d, a wartość tłumienia nie zależy od ciężaru właściwego.
2. Zależność modułu dynamicznego E_d od wilgotności wykazała taki sam charakter jak wielokrotnie stwierdzana zależność modułu statycznego E_s.
3. Po korekcie eliminującej wpływ naprężeń stycznych wartości modułu dynamicznego E_d okazały się o około 4% większe od wartości modułu statycznego E_s.

W dostępnej literaturze brak danych na temat dynamicznych modułów sprężystości drewna warstwowego, można jednak przypuszczać, że — przynajmniej dla drewna warstwowego o małej zawartości kleju — charakter zależności stwierdzonych przez Kollmanna i Krecha okazałby się zbliżony.

3. SPRĘŻYSTOŚĆ WARSTWOWEGO UKŁADU DREWNO — KLEJ

Sprężystość układu drewno — klej zależy od sprężystości drewna i sprężystości kleju utwardzonego w skleinie. Jednorodność takiego układu zostaje osiągnięta, jeżeli sprężystość obu komponentów jest jednakowa. Taki przypadek nie zachodzi, gdyż skład chemiczny i struktura, a co za

tym idzie sprężyste i reologiczne właściwości utwardzonego kleju różnią się od tych samych właściwości drewna. Oprócz tego drewno wykazuje anizotropowość trójkierunkową, gdy tymczasem klej w skleinie jest prawdopodobnie izotropowy lub jednokierunkowo anizotropowy (ortotropowy) przy granicy faz drewno — klej. Istotną więc sprawą staje się znajomość reologii i wskaźników sprężystości kleju w skleinie. Pomimo oczywistej ważności tego zagadnienia nie jest ono dotychczas zbadane eksperymentalnie, gdyż wskutek małej grubości i nieregularności kształtu skleiny klejowej w drewnie bezpośredni pomiar jej odkształceń nie da się przeprowadzić z konieczną dokładnością. Przyczyną małej dokładności doświadczalnego oznaczenia sprężystości skleiny jest również nierównomierna głębokość wnikania kleju w pory drewna oraz stosunkowo znaczna jego odkształcalność. Można przypuszczać, że z tych właśnie przyczyn metodyka oznaczania sprężystości skleiny nie została dotychczas opracowana.

Przybliżoną orientację w zagadnieniu daje analiza rozkładu naprężeń stycznych i normalnych w modelu ścinanej skleiny, przeprowadzona na podstawie badania elastooptycznego przez C. Mylonasa i N. A. de Bruyne'a (8); model skleiny stanowiła warstwa optycznie czynnej żywicy syntetycznej Catalin 800, wklejona pomiędzy nakładkowo złożone płaskowniki metalowe. Znaczna grubość modelu skleiny, wynosząca 12,7 mm, stawia jednakże pod znakiem zapytania możność bezpośredniego odniesienia uzyskanych wyników do cienkiej skleiny w klejonym złączu drewnianym. Podobne badania klejonych złączy elementów stalowych przeprowadził B. Cooper (8).

Dotychczas opublikowane wyniki badania sprężystych właściwości układu drewno — klej są niezbyt liczne i dotyczą głównie modułu sprężystości sklejki (jak np. prace A. Gratzla i G. Wallpacha (16) oraz B. Noréna i E. Saarmana (31) lub sprężystości innych tworzyw drzewnych (np. prace R. Keylwertha (19) i J. Wrońskiego (42). Oprócz tego należy wymienić teoretyczną pracę R. Keylwertha (18), dotyczącą anizotropii sprężystości drewna litego i warstwowego oraz prace W. T. Curry'ego (9, 10), który zanalizował teoretycznie i sprawdził doświadczalnie wpływ geometrii konstrukcji sklejki, jak również wpływ kleju na jej właściwości wytrzymałościowe.

Opracowana przez R. Keylwertha teoria anizotropii sprężystości drewna warstwowego nie wiąże się bezpośrednio z tematyką niniejszej pracy i z tego względu nie będzie omawiana.

Sprężystość forniru w drewnie warstwowym zależy od rodzaju drewna i jego wilgotności oraz od rozpatrywanego kierunku anatomicznego; oprócz tego na sprężystość forniru wpływa kąt nachylenia włókien do powierzchni forniru oraz pęknięcia powstałe przy skrawaniu. Wpływ nachylenia włókien jest znaczny, ponieważ jednak kierunek włókien zazwyczaj bardzo mało odbiega od kierunku równoległego do powierzchni for-

niru, a do jego wyrobu używa się drewna prostowłóknistego, efekt więc wpływu tego czynnika jest niewielki. Szczeliny pęknięć biegną wzdłuż włókien i prawie nie obniżają modułu sprężystości podłużnej forniru; moduł ten w decydującym stopniu wpływa na ogólną sprężystość drewna warstwowego, złożonego prawie wyłącznie z fornirów o jednakowym kierunku włókien. Pęknięcia forniru obniżają natomiast bardzo znacznie jego moduł sprężystości w kierunku prostopadłym do kierunku włókien.

Klej tworzy warstwę oddzielającą sąsiednie forniry oraz przesyca ich strefy powierzchniowe i wnika w otwarte przy skrawaniu komórki drewna; z tych przyczyn jako skleinę trzeba traktować nie tylko warstwę samego kleju, lecz również przesycone klejem [1] przypowierzchniowe warstwy drewna. Wskutek tego sprężystość skleiny zależy nie tylko od rodzaju kleju, lecz także od głębokości jego wnikania w drewno, która z kolei zależna jest zarówno od właściwości kleju, jak i od właściwości drewna oraz — pośrednio — od gładkości i od innych cech, charakteryzujących powierzchnię forniru.

Znany jest fakt, iż drewno warstwowe wykazuje niższą równoważną wilgotność [2] od wilgotności równoważnej drewna litego, znajdującego się w tych samych warunkach otoczenia. Na przykład przy 20° C i 65% wilgotności względnej powietrza wilgotność równoważna drewna litego wynosi około 12%, a wilgotność równoważna drewna warstwowego tylko 7 do 11%, zależnie od rodzaju kleju i temperatury klejenia. R. Keylwerth (18) jest zdania, że nie zmienia to sprężystości forniru w układzie warstwowym drewno — klej. Ten sam autor nie stwierdza wpływu obróbki cieplnej przed skrawaniem i podczas klejenia na sprężystość forniru w drewnie warstwowym. Dalsze zasadnicze stwierdzenia R. Keylwertha, odnoszące się do bukowego drewna warstwowego o wilgotności 7%, sklejonego filmem fenolowo-formaldehydowym z fornirów o grubości 0,5 do 1,43 mm i o jednakowym kierunku włókien, są następujące:

1. Przy jednakowej wilgotności moduł sprężystości E drewna warstwowego jest tylko o kilka procent większy od modułu E drewna litego. Stwierdzenie to odnosi się do modułów oznaczonych przy rozciąganiu w kierunku równoległym lub prostopadłym do włókien.

2. Wnioskowanie o sprężystości drewna warstwowego na podstawie sprężystości użytego forniru, nie jest możliwe. Fornir wykazuje mniejszy moduł sprężystości E niż drewno warstwowe, gdyż ujemny wpływ przecięcia włókien i ich odchylenia od kierunku teoretycznego jest większy w fornirze niż w drewnie warstwowym, gdzie skleiny w znacznym stopniu zmniejszają wpływ tych czynników.

---

[1] Takie znaczenie nadaje się w dalszym ciągu niniejszej pracy terminowi „skleina".

[2] Przez termin „wilgotność" w niniejszej pracy rozumie się wilgotność bezwzględną.

3. Wpływ sklein na sprężystość drewna warstwowego jest największy w przypadku modułu sprężystości E, oznaczanego przy ściskaniu siłą równoległą do włókien.

4. Wpływ grubości forniru, a tym samym wpływ zróżnicowania zawartości kleju w układzie jest znaczny w przypadku modułu sprężystości E, oznaczanego w kierunku prostopadłym do włókien, niewielki zaś w przypadku modułu E, oznaczanego w kierunku do nich równoległym.

Zdaniem R. Keylwertha stwierdzenia te nie dadzą się odnieść bezpośrednio do drewna warstwowego, klejonego klejami nanoszonymi w stanie ciekłym, nie należy jednak oczekiwać poważniejszych różnic. Wniosek 2 jest zgodny z wynikami badań H. Hertla (17), który stwierdził, że moduł sprężystości forniru brzozowego o grubości 1 do 1,4 mm, określony przy rozciąganiu wzdłuż włókien, jest o około 5% mniejszy od modułu sprężystości dwu warstw takiego samego forniru, sklejonych równolegle do włókien.

W. T. Curry (10) badając wpływ grubości forniru na sprężystość sklejki, doszedł do następujących wyników:

1. Moduł sprężystości E sklejki z drewna okumé (*Aucoumea Klaineana* Pierre), klejonej klejem mocznikowym, zmniejsza się ze spadkiem grubości forniru w zakresie 2,6 ... 0,6 mm; następnie przy grubości forniru równej 0,51 mm, moduł sprężystości sklejki ponownie wzrasta. Te zmiany modułu sprężystości są większe przy zginaniu niż przy ściskaniu lub rozciąganiu.

2. W miarę spadku grubości forniru wzrasta przy zginaniu wpływ naprężeń stycznych, co obniża liczbową wartość modułu sprężystości E, pomierzoną w trakcie próby zginania.

II. CEL I METODYKA BADAŃ

1. CEL PRACY

Celem niniejszej pracy jest rozwiązanie niektórych zagadnień z zakresu sprężystości warstwowego układu drewno — klej, na które — jak świadczy treść rozdziału I — literatura nie daje odpowiedzi. Zagadnieniami tymi są:

1. Ustalenie teoretycznych podstaw zależności modułu sprężystości podłużnej E warstwowego układu drewno — klej od modułów E_1 i E_2 komponentów tego układu.

2. Doświadczalne potwierdzenie zależności modułu E warstwowego układu drewno — klej od modułów E_1 i E_2 komponentów takiego układu.

3. Doświadczalne ustalenie współzależności statycznego i dynamicznego modułu sprężystości E warstwowego układu drewno — klej.

4. Zbadanie wpływu wypełniaczy — zwłaszcza wypełniaczy aktywnych — na sprężystość skleiny kleju mocznikowego.

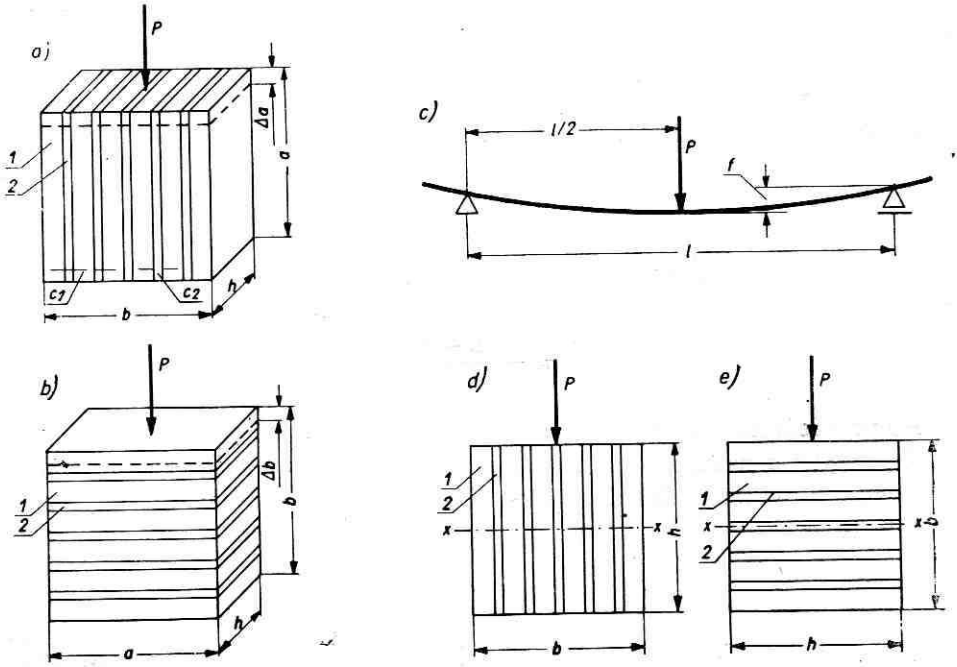
5. Ustalenie zależności modułu sprężystości E warstwowego układu drewno — klej mocznikowy od jego wilgotności i od odstępu czasu między sklejeniem a badaniem.

2. ANALIZA SPRĘŻYSTOŚCI WARSTWOWEGO UKŁADU DREWNO — KLEJ

Aby stworzyć teoretyczną podbudowę zamierzonych doświadczeń autor przeprowadził analizę sprężystości warstwowego układu drewno — klej, opierając się na ogólnych założeniach przyjętych w pracach A. Gratzla i G. Wallpacha (16), W. T. Curry'ego (9) oraz F. Krzysika i T. Orlicza (27).

W celu przedstawienia wpływu sprężystości forniru i sprężystości sklein na sprężystość warstwowego układu drewno — klej należy rozpatrzyć typowe przypadki obciążeń siłami zewnętrznymi (rys. 1), przyjmując następujące założenia:

1. Układ złożony jest z parzystej liczby n płaskich warstw drewna i z nieparzystej liczby $(n-1)$ płaskich warstw kleju (sklein).



Rys. 1. Przypadki obciążeń: *a* — ściskanie równoległe, *b* — ściskanie prostopadłe, *c* — zginanie, *d* — zginanie równoległe, *e* — zginanie prostopadłe

2. Grubości c_1 warstw drewna są równe oraz grubości c_2 warstw kleju są równe; stosunek wymiarów $\frac{c_2}{c_1}$ oznacza się przez u.

3. W warstwach drewna włókna biegną prostoliniowo i są równoległe do siebie oraz do krawędzi a rozpatrywanych elementów prostopadłościennych.

4. Zarówno drewno, jak klej wykazują właściwości ciał sprężystych i podlegają prawu Hooke'a.

5. W rozważaniach nie uwzględnia się poprzecznych odkształceń układu jako nie wpływających na rozpatrywane zależności.

Założenie 4 stanowi uproszczenie w stosunku do stanu rzeczywistego, gdyż zarówno drewno, jak klej w skleinie wykazują właściwości ciał lepkosprężystych. Można jednak przyjąć, że przy małych naprężeniach deformacja i redeformacja natychmiastowa układu są sobie równe co do wartości bezwzględnej, a opóźnienie sprężyste nie zachodzi. W tych warunkach przyjęcie założenia 4 nie wpływa na tok rozważań i na charakter wyprowadzanych zależności.

Przypadek 1. Ściskanie siłą równoległą do warstw układu (rys. 1*a*).

Rozpatruje się prostopadłościenny element warstwowego układu o wymiarach a, b, h, złożony z n warstw drewna o grubości c_1 i module sprężystości E_1 oraz z $(n\text{-}1)$ warstw kleju (sklein) o grubości c_2 i module sprężystości E_2. Suma grubości warstw układu wynosi

$$b = nc_1 + (n\text{-}1)\, c_2 \tag{7}$$

Ponieważ stosownie do założenia 2

$$\frac{c_2}{c_1} = u, \text{ skąd } c_2 = uc_1, \text{ więc}$$

$$b = nc_1 + (n\text{-}1)\, uc_1 = [n + (n - 1)\, u]\, c_1 \tag{7a}$$

oraz

$$u = \frac{b - nc_1}{(n\text{-}1)\, c_1} \tag{7b}$$

Po przyłożeniu zewnętrznej siły ściskającej P w kierunku równoległym do krawędzi a nastąpi odkształcenie (skrócenie) o wielkość Δa, równą dla wszystkich warstw układu, odkształcenie względnie zaś całości układu wyniesie

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a} \tag{8}$$

Siłę P można rozłożyć nad dwie składowe: P_1 — działającą na warstwy drewna 1 oraz P_2 — działającą na warstwy kleju 2

$$P = P_1 + P_2 \tag{9}$$

Jeżeli spowodowane siłą P naprężenie ściskające σ zawarte będzie w przedziale sprężystym, to zgodnie z prawem Hooke'a wartości naprężeń w warstwach drewna σ_1 i w warstwach kleju σ_2 będą odpowiednio proporcjonalne do modułów sprężystości tych warstw E_1 i E_2, co można wyrazić równaniami:

$$\left.\begin{aligned} &\text{dla warstw drewna} && \sigma_1 = \varepsilon E_1 = \frac{P_1}{nc_1h} \\ &\text{dla warstw kleju} && \sigma_2 = \varepsilon E_2 = \frac{P_2}{(n\text{-}1)\,uc_1h} \\ &\text{dla całości układu} && \sigma = \varepsilon E = \frac{P}{[n + (n\text{-}1)\,u]\,c_1h} \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

skąd

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= \varepsilon E_1\, nc_1h \\ P_2 &= \varepsilon E_2\,(n\text{-}1)\,uc_1h \\ P &= \varepsilon E\,[n + (n\text{-}1)\,u]\,c_1h \end{aligned}\right\} \tag{10a}$$

Podstawiając wartości P, P_1 i P_2 z równań (10a) do równania (9), otrzymuje się

$$\varepsilon E\,[n + (n\text{-}1)\,u]\;c_1h = \varepsilon E_1\, nc_1h + \varepsilon E_2\,(n\text{-}1)\,uc_1h \tag{9a}$$

Po uproszczeniu i przekształceniu równanie (9a) przyjmuje postać

$$E = \frac{n\,E_1 + (n\text{-}1)\,u\,E_2}{n + (n\text{-}1)\,u} \tag{11}$$

gdzie

E — moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej,
E_1 — moduł sprężystości warstw drewna,
E_2 — moduł sprężystości warstw kleju (sklein),
n — liczba warstw drewna,
u — względna grubość skleiny w odniesieniu do grubości drewna.

Dla układu o znacznej liczbie warstw, gdy $(n\text{-}1) \approx n$, równanie (11) przyjmie postać

$$E \approx \frac{E_1 + uE_2}{1 + u} \tag{11a}$$

Przykładowo można nadmienić, że przy wartościach $E_1 = 100\,000$, E_2 — $200\,000$, $n = 50$ i $u = 0{,}25$ przyrównanie $(n\text{-}1)$ do n powoduje błąd $\delta E \approx -0{,}3\,\%$, gdy tymczasem dokładność oznaczenia E wynosi zazwyczaj około 5 %.

Z wzoru (11) wynika, że moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej, oznaczany przy ściskaniu w kierunku równoległym do warstw, jest średnią ważoną modułów drewna i kleju; jest przy tym obojętne, czy

zawartość kleju w układzie wyraża się stosunkiem wymiarów liniowych (grubości), czy stosunkiem objętości warstwy kleju do objętości warstwy drewna. Wzory (11) i (11a) są również słuszne dla przypadku obciążenia układu siłą ściskającą w kierunku równoległym do krawędzi h lub w przypadku obciążenia go siłą rozciągającą w jednym z dwu rozpatrywanych kierunków.

Rozważania te stanowią rozwinięcie zależności podanych w pracy A. Gratzla i G. Wallpacha (16); w podobny sposób analizuje moduł sprężystości sklejki W. T. Curry (9).

Przypadek 2. Ściskanie siłą prostopadłą do warstw układu (rys. 1*b*).

Przyjmując takie same założenia, jak w przypadku 1, można stwierdzić, że w dowolnym punkcie układu naprężenie ściskające ma jednakową wartość; wobec tego zgodnie z prawem Hooke'a odkształcenia względne przy ściskaniu prostopadłym do warstw układu można wyrazić równaniami:

$$\left.\begin{aligned}
&\text{dla warstw drewna} \quad \varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1} = \frac{\Delta (nc_1)}{nc_1} = \frac{\Delta_1}{nc_1} \\
&\text{dla warstw kleju} \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2} = \frac{\Delta [(n-1)\, uc_1]}{(n-1)\, uc_1} = \frac{\Delta_2}{(n-1)\, uc_1} \\
&\text{dla całości układu} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta (nc_1) + \Delta [(n-1)\, uc_1]}{nc_1 + (n-1)\, uc_1} = \\
&\qquad\qquad = \frac{\Delta b}{[n + (n-1)\, u]\, c_1}
\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

skąd

$$\left.\begin{aligned}
\Delta_1 &= \frac{nc_1\, \sigma}{E_1} \\
\Delta_2 &= \frac{(n-1)\, u\, c_1\, \sigma}{E_2} \\
\Delta_b &= \frac{[n + (n-1)\, u]\, c_1\, \sigma}{E}
\end{aligned}\right\} \tag{12a}$$

Ponieważ całkowite odkształcenie układu stanowi sumę odkształceń warstw drewna i odkształceń warstw kleju:

$$\Delta_b = \Delta_1 + \Delta_2 \tag{13}$$

więc podstawiając do równania (13) wartości Δ_1, Δ_2 i Δ_b z wyrażeń (12a) otrzymuje się

$$\frac{[n + (n-1)\, u]\, c_1\, \sigma}{E} = \frac{nc_1\, \sigma}{E_1} + \frac{(n-1)\, u\, c_1\, \sigma}{E_2} \tag{13a}$$

Po uproszczeniu i przekształceniu równanie (13a) przyjmuje postać:

$$E = \frac{[n + (n-1)\, u]\, E_1\, E_2}{nE_2 + (n-1)\, u\, E_1} \tag{14}$$

Zakładając analogicznie jak w przypadku 1, że $(n\text{-}1) \approx n$ otrzymuje się zależność tę w postaci uproszczonej

$$E \approx \frac{(1+u)\,E_1\,E_2}{E_2 + u\,E_1} \tag{14a}$$

Wzory (14) i (14a) są słuszne również dla rozciągania siłą działającą prostopadle do warstw układu; użycie wzoru uproszczonego (14a) powoduje przy tym samych danych jak w przypadku 1 błąd $\delta\,E \approx -0{,}2\,\%$.

Przypadek 3. Zginanie siłą równoległą do warstw układu (rys. 1 *c*, *d*).

Rozpatruje się belkę o długości l i przekroju prostokątnym o wymiarze h w kierunku równoległym do warstw i wymiarze b w kierunku do nich prostopadłym. Belka obciążona jest siłą zginającą P według schematu przedstawionego na rys. 1 *c*.

Siłę P można rozłożyć na dwie składowe: P_1 działającą na warstwy drewna 1 oraz P_2 działającą na warstwy kleju 2

$$P = P_1 + P_2 \tag{15}$$

W dowolnym przekroju poprzecznym belki wielkość ugięcia f_1 warstw drewna oraz ugięcia f_2 warstw kleju równa jest wielkości ugięcia f całości układu (belki)

$$f = f_1 = f_2 \tag{16}$$

Przy małej liczbowej wartości f lub małym stosunku wysokości h przekroju belki do jej rozpiętości l możliwe jest pominięcie wpływu naprężeń stycznych i równanie (16) można przedstawić w postaci

$$f = \frac{P\,l^3}{48\,EJ} = \frac{P_1\,l^3}{48\,E_1\,J_1} = \frac{P_2\,l^3}{48\,E_2\,J_2} \tag{16a}$$

gdzie J — moment bezwładności przekroju belki,
J_1 — moment bezwładności przekroju warstw drewna,
J_2 — moment bezwładności przekroju warstw kleju,
f, P_1, P_2, P, E_1, E_2, E — znane (według założeń).

Momenty bezwładności J, J_1, J_2 należy obliczać względem poziomej osi symetrii przekroju belki (względem osi $x - x$). Z równania (16a) wynika:

$$\left.\begin{aligned} &\text{dla warstw drewna} \quad P_1 = \frac{48\,E_1\,J_1\,f}{l^3} \\ &\text{dla warstw kleju} \quad P_2 = \frac{48\,E_2\,J_2\,f}{l^3} \\ &\text{dla całości układu} \quad P = \frac{48\,E\,J\,f}{l^3} \end{aligned}\right\} \tag{16b}$$

Podstawiając do równania (15) wartości P, P_1 i P_2 z wyrażeń (16b), otrzymuje się

$$\frac{48\,E\,J\,f}{l_3} = \frac{48\,E_1\,J_1\,f}{l_3} + \frac{48\,E_2\,J_2\,f}{l_3}$$

i po uproszczeniu

$$EJ = E_1\,J_1 + E_2\,J_2 \tag{17}$$

Wiedząc, że

$$J = \frac{bh^3}{12} \tag{18}$$

otrzymuje się zgodnie z przyjętymi oznaczeniami

$$J = \frac{[n + (n\text{-}1)\,u]\,c_1\,h^3}{12}\,; \quad J_1 = \frac{nc_1\,h^3}{12}\,; \quad J_2 = \frac{(n\text{-}1)\,uc_1\,h^3}{12} \tag{18a}$$

Podstawiając wyrażenia (18a) do równania (17) otrzymuje się

$$E = \frac{[n + (n\text{-}1)\,u]\,c_1\,h^3}{12} = E_1\,\frac{nc_1\,h^3}{12} + E_2\,\frac{(n\text{-}1)\,uc_1\,h^3}{12} \tag{17a}$$

skąd po uproszczeniu i przekształceniu otrzymuje się wzór:

$$E = \frac{n\,E_1 + (n\text{-}1)\,u\,E_2}{n + (n\text{-}1)\,u} \tag{19}$$

analogiczny z wzorem (11); dla $(n\text{-}1) \approx n$ wzór (19) przyjmuje postać

$$E \approx \frac{E_1 + u\,E_2}{1 + u} \tag{19a}$$

analogiczną z wzorem (11a); dla $E_1 = 100\,000$, $E_2 = 200\,000$, $n = 50$ i $u = 0{,}25$ użycie wzoru (19a) powoduje błąd $\delta\,E \approx -0{,}3\,\%$.

Ponieważ dla innych przypadków podparcia lub jednostronnego utwierdzenia zginanej belki oraz dla innych sposobów przyłożenia sił zginających równanie (16a) różni się tylko wartościami współczynników liczbowych, można równanie (19) traktować jako ogólne równanie zależności E od E_1 i E_2 dla belki o tej samej geometrii przekroju, zginanej w kierunku równoległym do warstw. Warunkiem takiego uogólnienia jest zachowanie małej wartości ugięcia f lub małej wartości stosunku h/l.

P r z y p a d e k 4. Zginanie siłą prostopadłą do warstw układu (rys. 1 *c*, *e*).

Przyjmując takie same oznaczenia jak w przypadku 3 można wyznaczyć zależność pomiędzy wielkościami E, E_1, E_2 z równania (17); należy więc obliczyć odpowiednie wielkości J, J_1, J_2 dla zginania w kierunku prostopadłym do warstw.

Moment bezwładności przekroju belki względem osi x —x jest

$$J = \frac{hb^3}{12} \tag{20}$$

Podstawiając za b wyrażenie (7a) otrzymuje się

$$J = \frac{hc_1^3}{12}\,[n + (n\text{-}1)\,u]^3 \tag{20a}$$

Moment bezwładności warstw kleju względem osi $x - x$ można obliczyć na podstawie wzoru, wyprowadzonego przez F. Krzysika i T. Orlicza (27) dla warstw drewna późnego w zginanej belce z drewna litego

$$Jp = (2n + 1)\frac{bp^3}{12}\left[1 + 4(1 + c)^2 n(n + 1)\right] \tag{21}$$

gdzie

n — liczba warstw drewna późnego na połowie przekroju belki,
b — szerokość podstawy przekroju belki,
p — grubość warstwy drewna późnego,
c — stosunek grubości warstwy drewna wczesnego do grubości warstwy drewna późnego.

Traktując warstwy kleju jako warstwy drewna późnego i wprowadzając oznaczenia przyjęte w niniejszej pracy, można napisać

$$n = \frac{n-1}{2};\ b = h;\ p = c_1 u;\ c = \frac{1}{u};$$

w związku z czym wzór (21) przyjmuje postać

$$J_2 = \left[2\left(\frac{n-1}{2}\right) + 1\right]\frac{hc_1{}^3u^3}{12}\left[1 + 4\left(1 + \frac{1}{u}\right)^2\left(\frac{n-1}{2}\right)\left(\frac{n-1}{2} + 1\right)\right]$$

a po przekształceniu

$$J_2 = \frac{hc_1{}^3}{12}\, n u^3\left[1 + 2(n^2 - 1)\left(\frac{1+u}{u}\right)^2\right] \tag{21a}$$

Ponieważ $J = J_1 + J_2$

można napisać $J_1 = J - J_2$

a po podstawieniu wyrażeń z wzorów (20a) i (21a) otrzymuje się

$$J_1 = \frac{hc_1{}^3}{12}[n + (n-1)u]^3 - \frac{hc_1{}^3}{12}nu^3\left[1 + 2(n^2 - 1)\left(\frac{1+u}{u}\right)^2\right] =$$

$$= \frac{hc_1{}^3}{12}\left\{[n + (n-1)u]^3 - nu^3\left[1 + 2(n^2 - 1)\left(\frac{1+u}{u}\right)^2\right]\right\} \tag{22a}$$

Podstawiając wyrażenia (20a), (21a) i (22a) do wzoru (17) otrzymuje się

$$E = \frac{\frac{hc_1{}^3}{12}\left\{[n + (n-1)u]^3 - nu^3\left[1 + 2(n^2 - 1)\left(\frac{1+u}{u}\right)^2\right]\right\}}{\frac{hc_1{}^3}{12}[n + (n-1)u]^3}E_1 +$$

$$+ \frac{\frac{hc_1{}^3}{12}nu^3\left[1 + 2(n^2 + 1)\left(\frac{1+u}{u}\right)^2\right]}{\frac{hc_1{}^3}{12}[n + (n-1)u]^3}E_2$$

i w ostatecznej postaci

$$E = E_1 + (E_2 - E_1) \frac{n\,[u^3 + 2u\,(n^2 - 1)\,(1 + u)^2]}{[n + (n\text{-}1)\,u]^3} \tag{23}$$

Dla $(n\text{-}1) \approx n \approx (n + 1)$ otrzymuje się

$$E \approx E_1 + (E_2 - E_1) \frac{u^3 + 2n^2\,u\,(1 + u)^2}{n^2\,(1 + u)^3} \tag{23a}$$

Użycie wzoru (23a) powoduje przy tych samych danych jak w przypadku 3 błąd $\delta\,E \approx -0{,}9\,\%$.

Przy zginaniu w kierunku prostopadłym do warstw układu możliwe jest (tak samo jak w przypadku zginania w kierunku do nich równoległym) uogólnienie równania (23) dla innych przypadków podparcia belki oraz dla innych sposobów przyłożenia sił zginających.

Porównując wzory (11), (14), (19) i (23) oraz odpowiednie wartości błędu $\delta\,E$ dochodzi się do wniosku, że wpływ zróżnicowanych modułów sprężystości E_1 i E_2 komponentów układu warstwowego na jego wypadkowy moduł sprężystości E jest największy przy zginaniu w kierunku prostopadłym do warstw, najmniejszy zaś przy ściskaniu lub rozciąganiu w tym kierunku. Przy ściskaniu, rozciąganiu lub zginaniu w kierunku równoległym do warstw wpływ ten wyraża się jednakową wartością liczbową, pośrednią między wartościami uzyskiwanymi przy obciążeniach w kierunku prostopadłym do warstw. Powyższe stwierdzenia są zgodne z wynikami prac R. Keylwertha (18) oraz W. T. Curry'ego (10) i częściowo je uzupełniają.

3. ZAŁOŻENIA METODYCZNE

Na podstawie przeprowadzonej uprzednio teoretycznej analizy zagadnienia i omówionych wyników dotychczasowych prac doświadczalnych przyjęto poniżej sformułowane założenia metodyczne badań.

1. W odniesieniu do materiału doświadczalnego

a. Fornir powinien być wykonany z drewna o dobrej sklejalności i o możliwie mało zróżnicowanej strukturze anatomicznej. Wilgotność forniru w momencie klejenia powinna być w przybliżeniu jednakowa dla całego materiału doświadczalnego. Grubość forniru powinna być zróżnicowana w celu uzyskania różnej zawartości kleju w układzie.

b. Klej powinien zapewnić uzyskanie skleiny o module sprężystości E_2 możliwie znacznie różniącym się od modułu sprężystości E_1 forniru. Zawartość żywicy w kleju mocznikowym (sucha masa) powinna być stała

i możliwie znaczna, aby nie wprowadzać z masą klejową dużej ilości wody do układu.

c. Jako wypełniacze powinny być użyte stosowane w krajowym przemyśle drzewnym mąki skrobiowe, dodane do kleju w zróżnicowanej ilości.

d. Klejenie drewna warstwowego powinno odbywać się przy stałych parametrach (ciśnieniu, temperaturze, nałożeniu kleju i czasie prasowania). W celu uzyskania możliwie równomiernego sprasowania i rozkładu wilgotności na grubości wsadu temperatura klejenia powinna być równa temperaturze otoczenia (około 20° C).

2. W odniesieniu do charakterystyki materiału doświadczalnego

a. Należy przeprowadzić pomiary grubości, wilgotności i gładkości powierzchni forniru.

b. Należy oznaczyć zawartość suchej masy, lepkość, gęstość i odczyn kleju.

c. Należy oznaczyć wilgotność sproszkowanego utwardzacza.

d. Należy oznaczyć wilgotność i wielkość ziarn (granulację) wypełniaczy.

e. Należy ustalić recepturę masy klejowej i oznaczyć jej gęstość, odczyn, lepkość oraz czas stosowalności; w dalszym ciągu należy przeprowadzić oznaczenie kurczliwości utwardzonej masy klejowej w zależności od rodzaju i zawartości wypełniacza.

f. Należy zbadać mikrostrukturę układu drewno — klej oraz pomierzyć średnią grubość sklein.

3. W odniesieniu do metod określania modułu sprężystości E

a. Przyjąć opracowaną przez W. A. Bażenowa (6) metodę jednoczesnego pomiaru statystycznego modułu E_s przy zginaniu próbki w postaci belki wspornikowej oraz dynamicznego modułu E_d przy drganiach o częstotliwości bliskorezonansowej tejże próbki [1].

b. Oznaczanie modułów E_s i E_d przeprowadzać porównawczo przy zginaniu i drganiach giętnych w kierunku równoległym i prostopadłym do warstw układu.

c. Oznaczenia według zasad sformułowanych w punktach 3a i 3b przeprowadzić na drewnie warstwowym o różnej grubości forniru i jednako-

[1] Bardziej dokładna metoda opracowana przez *F. Kollmanna* i *H. Krecha* (23) została podana w pracy opublikowanej w lutym 1960 r., kiedy doświadczenia do niniejszej pracy były już w fazie końcowej.

wej recepturze masy klejowej, a wyniki porównania wykorzystać przy dalszych doświadczeniach.

d. Na podstawie badania określonego w punkcie 3c ustalić współzależność E_s i E_d dla obu kierunków obciążania oraz dążyć do ustalenia zależności modułu E układu od modułów E_1 i E_2 jego komponentów.

4. W odniesieniu do wpływu wypełniaczy na moduł sprężystości E układu

Oznaczenie modułu E przeprowadzić jedną z metod, wybraną na podstawie wyników badania określonego w punkcie 3, na drewnie warstwowym sklejonym z forniru o niewielkiej i stałej grubości.

5. W odniesieniu do wpływu wilgotności i czasu składowania sklejonego materiału na moduł E układu

a. Pomiar modułu E przeprowadzić według zasad podanych w punkcie 4, powtarzając pomiary kilkakrotnie w ustalonych odstępach czasu, przy zmieniającej się wilgotności materiału.

b. Dążyć do ustalenia oddzielnych zależności modułu E od wilgotności i od czasu składowania sklejonego materiału.

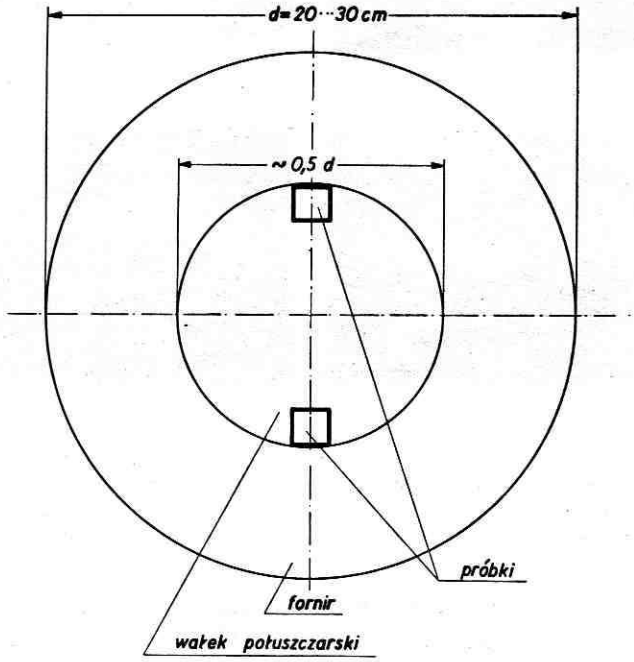
III. MATERIAŁ DOŚWIADCZALNY

1. SUROWCE

Do wyrobu forniru zostało użyte łuszczarskie drewno brzozowe o możliwie prostym przebiegu włókien i małej zbieżystości, nie wykazujące makroskopowo wad anatomicznych i rozkładu przez grzyby. Z kłód wycięto wyrzynki o długości 1600 mm; po ogrzewaniu przez 12 godzin w wodzie o temperaturze 40° C wyrzynki okorowano i zeskrawano fornir na skrawarce obwodowej. Z przyobwodowej części wałków połuszczarskich (pozostałych po skrawaniu forniru) pobrano próbki do oznaczenia modułów sprężystości drewna (rys. 2). Uzyskany fornir przycięto do wymiarów około 450 × 800 mm (ostatni wymiar wzdłuż włókien) i po odrzuceniu arkuszy nie odpowiadających wymaganiom klasy A wysuszono w prasie pulsacyjnej przy temperaturze około 130° C do wilgotności 9 ± 1%. Podczas okresu klejenia drewna warstwowego fornir przechowywano w magazynie, w którym temperatura wynosiła 23 ± 3° C, a wilgotność względna powietrza 47 ± 7%; wyrywkowo sprawdzana wilgotność przechowywanego forniru nie wykazywała zmian. Wilgotność forniru określano metodą suszarkowo-wagową z dokładnością 0,1% wilgotności.

Grubość forniru mierzono za pomocą mikromierza bezpośrednio po skrawaniu oraz po wysuszeniu.

Chropowatość forniru w kierunku prostopadłym do włókien określano na obu jego powierzchniach za pomocą profilometru optycznego (mikroskopu podwójnego) Linnika. Wyniki pomiaru chropowatości powierzchni



Rys. 2. Rozmieszczenie próbek do oznaczenia modułu sprężystości drewna litego

forniru o wilgotności $9 \pm 1\%$ podano w tabeli 1; charakterystyczne profile przekroju powierzchni fornirów w kierunku prostopadłym do włókien przedstawia rys. 3.

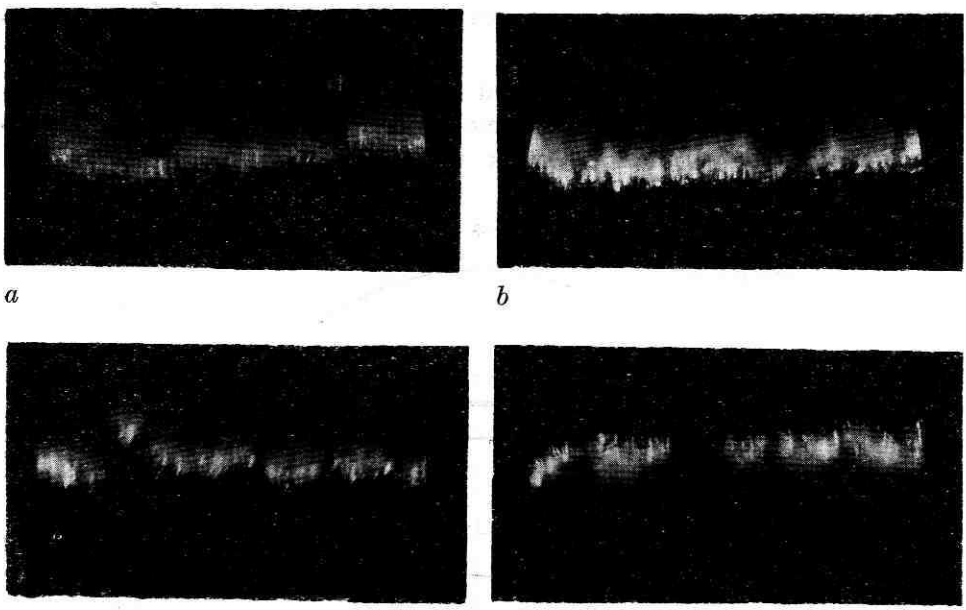
Do przygotowania mas klejowych został użyty klej mocznikowy MC-60, produkcji Zakładów Tworzyw Sztucznych w Pustkowie. W celu określenia aktualnych właściwości kleju w okresie jego użytkowania sprawdzono je bezpośrednio przed przygotowaniem mas klejowych i porównano z atestem producenta; wyniki tych pomiarów przedstawiono w tabeli 2.

Jako utwardzacz zastosowano sproszkowany salmiak techniczny NH_4Cl.

Tabela 1

Charakterystyka jakościowa forniru

Nominalna grubość forniru c mm	Średnia wysokość nierówności powierzchni H μ	Średnia wilgotność bezwzględna W %	Liczba pomiarów n
0,20	28	8,8	20
0,35	33	9,0	20
0,50	36	9,3	20
1,00	32	9,2	20
Średnio	32	9,1	Razem: 80



Rys. 3. Charakterystyczne profile przekroju powierzchni forniru w płaszczyźnie prostopadłej do włókien: *a* — fornir o grubości 0,20 mm, *b* — fornir o grubości 0,35 mm, *c* — fornir o grubości 0,50 mm, *d* — fornir o grubości 1,00 mm; powiększenie pionowe — około 100 : 1, powiększenie poziome — około 70 : 1

Średnia wilgotność względna salmiaku, oznaczona metodą suszarkowo-wagową przy temperaturze suszenia 100+5° C, na podstawie pięciu pomiarów o dokładności 0,1% wynosiła 1,5%; wilgotność tę uwzględniono przy sporządzaniu roztworu utwardzacza. Aby ograniczyć do minimum ilość wody wprowadzanej do masy klejowej, przyjęto stężenie roztworu utwardzacza 25 ± 0,1%, bliskie stężeniu roztworu nasyconego przy temperaturze 20° C.

Tabela 2

Charakterystyka kleju mocznikowego MC-60

Wielkość oznaczana	Miano	Wartość według atestu	Pomiary własne		
			wartość średnia	dokładność pomiaru	liczba pomiarów
Odczyn	pH	7,2	7,2 [1]	0,2	5
Lepkość (20° C)	cP	1339	1430	5	5
Gęstość (20° C)	g/cm³	1,260	1,278	0,002	5
Zawartość suchej masy	%	60	61,2	0,1	10
Żywotność (80° C)	godz.	3		nie oznaczano	
Żywotność (ok. 20° C)	dni	45		nie oznaczano	
				Razem	25

[1] Oznaczono papierkami indykatorowymi

Jako wypełniacze kleju zastosowano mąkę żytnią oraz mąkę ziemniaczaną. Średnia wilgotność względna wypełniaczy, określona analogicznie, jak w przypadku utwardzacza, wynosiła dla mąki żytniej 12,7% a dla mąki ziemniaczanej 21,3%. Wilgotność tę uwzględniono przy obliczaniu ciężaru wypełniaczy, dodawanych do kleju przy różnych stopniach jego wypełnienia.

Granulację wypełniaczy określono mierząc średnicę ziarn za pomocą projekcyjnego mikroskopu pomiarowego (lanametru) przy powiększeniu 250 : 1; wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 3. Mikrofotografie ziarn mąki podano na rys. 4.

Tabela 3

Granulacja wypełniaczy

Wielkość oznaczana	Miano	Wartość liczbowa		
		mąka żytnia	mąka ziemniaczana	
Zawartość ziarn o średnicy (μ):				
0 ... 5	%	31,8	4,2	
6 ... 10		21,2	25,4	
11 ... 15		30,3	22,0	
16 ... 20		15,2	13,6	
21 ... 25		1,5	17,0	
26 ... 30		—	10,2	
31 ... 35		—	6,8	
36 ... 40		—	—	
41 ... 45		—	0,8	
Przeciętna średnica ziarna	μ	9,2	16,3	
Dokładność pomiaru	μ	2	2	Razem
Liczba pomiarów	1	66	118	184

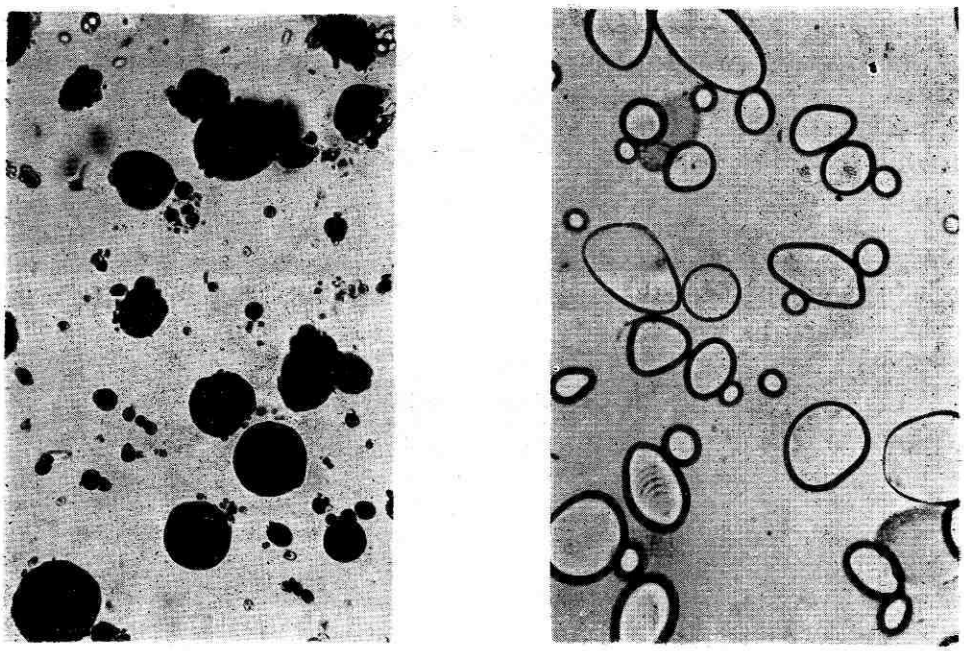
2. MASY KLEJOWE

Aby ustalić receptury mas klejowych, przeprowadzono wstępne doświadczenia mające na celu:

a) ustalenie ilości utwardzacza, umożliwiającej uzyskanie stosunkowo krótkiego czasu prasowania, a jednocześnie zapewniającej czas stosowalności masy klejowej co najmniej przez 1 godzinę; taki okres czasu był konieczny dla nałożenia masy klejowej na forniry jednego wsadu;

b) ustalenie ilości wody, potrzebnej dla zachowania gęstości masy klejowej w granicach 1,20 ... 1,30 g/cm^3, przy założonych zawartościach wypełniacza, które wynosiły 0, 15, 30, 45 i 60 części wagowych suchej masy wypełniacza na 100 części wagowych ciekłego kleju MC-60.

Czas stosowalności masy klejowej ustalono na podstawie kolejnych pomiarów jej lepkości w założonym czasie przy różnej ilości utwardzacza;



a *b*

Rys. 4. Granulacja wypełniaczy: *a* — mąka żytnia, b — mąka ziemniaczana; preparaty barwione wodnym roztworem jodu z jodkiem potasu, powiększenie około 420 : 1

lepkość mierzono za pomocą wiskozymetru Hoepplera. Jednocześnie określano areometrem gęstość masy klejowej oraz notowano czas jej żelowania w otwartej zlewce laboratoryjnej. Ustalone w wyniku tych pomiarów receptury mas klejowych scharakteryzowano liczbowo w tabeli 4.

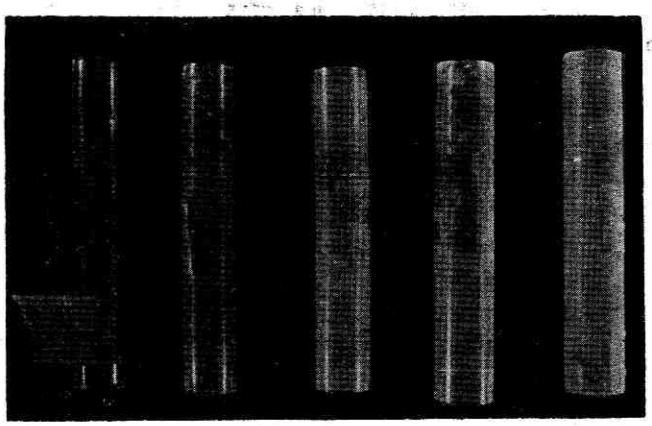
Aby ułatwić kontrolę równomierności nałożenia masy klejowej na fornir oraz pomiar grubości spoin klejowych, zabarwiono masę klejową nieznacznym dodatkiem błękitu metylenowego, co skontrastowało jej barwę w stosunku do barwy drewna.

Z każdej masy klejowej pobrano po 5 próbek do probówek szklanych, które zamknięto korkami gumowymi; otrzymane pręty utwardzonych mas klejowych posłużyły do określania zmian ciężaru (wskutek odparowania wody i wolnego formaldehydu) oraz do określania kurczliwości liniowej. Próbki te przedstawiono na rys. 5.

3. KLEJENIE I SKŁADOWANIE MATERIAŁU DOŚWIADCZALNEGO

Odważoną ilość masy klejowej nakładano jednostronnie na każdy arkusz forniru i rozprowadzano ją szczotką po całej powierzchni arkusza; równomierność nałożenia sprawdzano wzrokowo. Pakiet fornirów jednego wsadu składano równolegle do włókien i prasowano w prasie hydraulicznej

przy stałym ciśnieniu oraz stałej temperaturze. Klejem bez wypełniacza sklejono 4 płyty z fornirów o grubości nominalnej 0,20; 0,35; 0,50 i 1,00 mm; klejem o różnej zawartości mąki żytniej lub ziemniaczanej sklejono 8 płyt z fornirów o grubości nominalnej 0,35 mm. Rodzaje i oznaczenia sklejonego materiału podano w tabeli 5. W ciągu 4 do 6 dni od daty sklejenia płyt wykonywano z nich próbki do oznaczania modułów



a

b

c

Rys. 5. Próbki utwardzonych mas klejowych: *a* — próbki do pomiaru zmian ciężaru i kurczliwości, *b* — próbka masy klejowej 0 bez wypełniacza pow. 2 : 1, *c* — próbka masy klejowej K-30 o zawartości 30% mąki ziemniaczanej — pow. 2 : 1

Tabela 4

Receptury i parametry mas klejowych

Rodzaj wypełniacza	Symbol sklejonego materiału	Skład w częściach wagowych				Parametry		
		klej[1] MC-60	utwardzacz[2]	wypełniacz[2]	woda	gęstość[4] g/cm³	odczyn[3] pH	lepkość[4] cP
—	0—...*	100	0,2	0	0,6	1,277	4,7	2890
Mąka żytnia (Z)	Z-15	100	0,2	15	18	1,225	4,7	1190
	Z-30	100	0,2	30	30	1,215	4,8	1530
	Z-45	100	0,2	45	43	1.290	5,1	2230
	Z-60	100	0,2	60	52	1,230	4,9	5400
Mąka ziemniaczana (K)	K-15	100	0,2	15	9	1,260	4,9	1930
	K-30	100	0,2	30	16,5	1,245	4,9	1390
	K-45	100	0,2	45	22,5	1,250	4,9	1468
	K-60	100	0,2	60	34,5	1,250	5,1	875
						Łączna liczba pomiarów		81

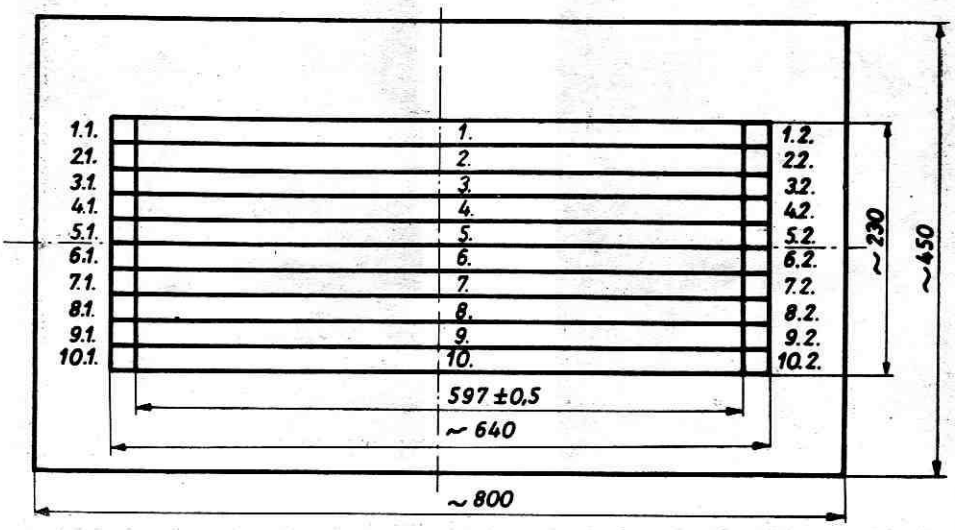
1 Klej w stanie ciekłym

2 Sucha masa

3 Oznaczano papierkami indykatorowymi z dokładnością 0,2 pH; wartości średnie z 3 oznaczeń

4 Oznaczano przed dodaniem utwardzacza przy temperaturze 20 ± 0,5° C; wartości średnie z 3 oznaczeń

* Dla materiałów klejonych z fornirów o różnej grubości użyto symboli: 0—0,20; 0—0,35; 0—0,50; 0—1,00, w których druga liczba oznacza nominalną grubość forniru w mm.



Rys. 6. Schemat rozmieszczenia próbek w płycie: *1, 2, 3...* — próbki do pomiaru modułów sprężystości, *1,1, 1.2...2.1, 2.2...* — próbki do pomiaru wilgotności

Tabela 5

Rodzaje i oznaczenia materiału doświadczalnego

Rodzaj materiału	Oznaczenie
Drewno lite, z którego wykonano fornir o grubościach 0,20 mm, 0,35 mm, 0,50 mm i 1,00 mm	Drewno 0,20 ... 1,00
Drewno lite, z którego wykonano wyłącznie fornir o grubości 0,35 mm	Drewno 0,35
Drewno warstwowe, sklejone klejem bez wypełniacza z fornirów o grubości 0,20 mm	0—0,20
Jak wyżej, z fornirów o grubości 0,35 mm	0—0,35
Jak wyżej, z fornirów o grubości 0,50 mm	0—0,50
Jak wyżej, z fornirów o grubości 1,00 mm	0—1,00
Drewno warstwowe z fornirów o grubości 0,35 mm, sklejone klejem o zawartości 15% mąki żytniej	Z-15
Jak wyżej, sklejone klejem o zawartości 30% mąki żytniej	Z-30
Jak wyżej, sklejone klejem o zawartości 45% mąki żytniej	Z-45
Jak wyżej, sklejone klejem o zawartości 60% mąki żytniej	Z-60
Jak wyżej, sklejone klejem o zawartości 15% mąki ziemniaczanej	K-15
Jak wyżej, sklejone klejem o zawartości 30% mąki ziemniaczanej	K-30
Jak wyżej, sklejone klejem o zawartości 45% mąki ziemniaczanej	K-45
Jak wyżej, sklejone klejem o zawartości 60% mąki ziemniaczanej	K-60

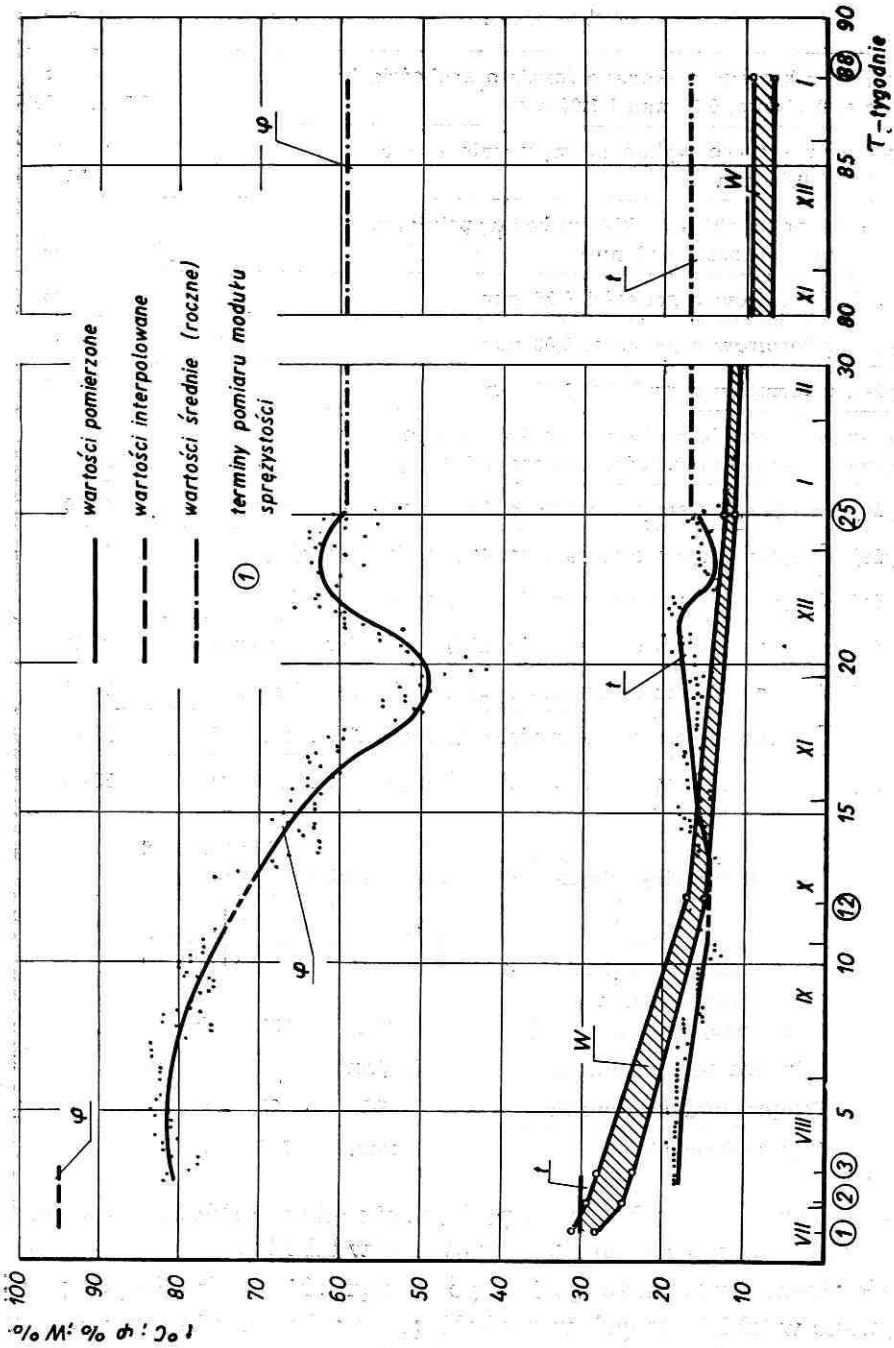
Tabela 6

Parametry klejenia materiału doświadczalnego

Parametr	Miano	Wartość liczbowa	Odchyłki
Ciężar jednostronnie nałożonej masy klejowej	g/m²	250	± 10
Ciśnienie prasowania	kG/cm²	6	± 0,5
Temperatura prasowania	°C	23	± 3
Czas prasowania	min.	240	± 5

sprężystości (rys. 6). Grubość płyt po tygodniu od daty sklejenia wynosiła 20 ± 1 mm. Parametry klejenia przedstawiono w tabeli 6.

Próbki drewna warstwowego i litego oraz próbki mas klejowych przechowywano w takich samych warunkach przez cały okres badań. Pomiary właściwości materiału rozpoczęto po upływie tygodnia od chwili przygotowania masy klejowej i sklejenia danej serii drewna warstwowego. Po-



Rys. 7. Warunki składowania próbek drewna litego i drewna warstwowego oraz próbek kleju; t — temperatura powietrza; φ — wilgotność względna powietrza; W — wilgotność drewna

począwszy od pierwszego pomiaru materiał znajdował się w szczelnie zamkniętych cylindrach szklanych, wstawionych do termostatu, tak że temperatura i wilgotność względna otaczającego powietrza były stałe. Na początku czwartego tygodnia materiał ułożono swobodnie w pomieszczeniu laboratorium, gdzie rejestrowano temperaturę i wilgotność względną powietrza za pomocą termohigrografu, ustawionego bezpośrednio przy stosie materiału. Począwszy od 26 tygodnia do końca badania materiał składowano w taki sam sposób nie rejestrując parametrów powietrza, lecz mierząc je tylko okresowo. Taki tok postępowania miał na celu:

1) zbadanie zmian właściwości materiału w ciągu trzech tygodni od daty sklejenia przy możliwie stałej jego wilgotności;

2) zbadanie zmian właściwości materiału, składowanego przez dłuższy okres czasu w normalnych warunkach pomieszczenia laboratoryjnego.

Warunki składowania materiału oraz jego wilgotność w czasie składowania przedstawiono graficznie na rys. 7. Jak widać z wykresu, pomimo zamknięcia materiału w szczelnych naczyniach w początkowym okresie składowania, jego wilgotność stale się obniżała. Przyczynę tego zjawiska stanowiła dość znaczna zawartość wody wolnej oraz wolnego formaldehydu, które skraplały się na ścianach cylindrów szklanych, a podczas wyjmowania próbek w celu przeprowadzenia pomiaru modułu sprężystości mogły swobodnie odparowywać ze ścian cylindrów i z powierzchni próbek.

IV. BADANIA POMOCNICZE

1. GRUBOŚĆ WARSTW I ZAWARTOŚĆ KLEJU W DREWNIE WARSTWOWYM

W celu ustalenia wymiarowej charakterystyki układu drewno — klej przeprowadzono pomiary średniej grubości warstw forniru oraz warstw kleju w drewnie warstwowym; na podstawie tych pomiarów obliczono stosunek średniej grubości warstwy kleju do średniej grubości warstwy forniru w poszczególnych seriach próbek drewna warstwowego. Wyniki tych pomiarów i obliczeń przedstawiono w tabelach 7 i 8. Pomiary przeprowadzono za pomocą sumującego mikroskopu pomiarowego MS-130, konstrukcji Katedry Obrabiarek do Drewna Politechniki Gdańskiej; powiększenie mikroskopu wynosiło około 20 : 1, a dokładność pomiaru 0,01 mm. Pomiary wykonano na każdej próbce drewna warstwowego, mierząc sumaryczną grubość warstw forniru i sumaryczną grubość warstw kleju na bocznej powierzchni próbki w kierunku prostopadłym do warstw. Zaobserwowano, że grubość 1 do 3 skrajnych warstw forniru jest nieco mniejsza od równomiernej grubości fornirów wewnętrznych. Średnia grubość fornirów wynosiła około 0,85 grubości nominalnej. Zasadniczą trudność nasuwało możliwie dokładne pomierzenie grubości warstw kleju, po-

Tabela 7

Grubość warstw i udział sklein w drewnie warstwowym

Symbol serii	Liczba warstw forniru	Średnia grubość forniru c_1 mm	Średnia grubość skleiny c_2 mm	Średni udział sklein $u = \frac{c_2}{c_1}$	Średnia wilgotność W %	Uwagi
0—0,20	60	0,182	0,050	0,2702	10,9	Dokładn. pomiaru $\Delta = 0{,}01$ mm; liczba pomiarów w serii $n = 10$; pomiary wykonano w ciągu 26-tygodnia po sklejeniu materiału; łączna liczba pomiarów 120
0—0,35	56	0,299	0,040	0,1431	12,1	
0—0,50	30	0,413	0,039	0,0961	8,4	
0—1,00	20	0,878	0,054	0,0592	8,2	
Z-15	58	0,290	0,060	0,2069	11,4	
Z-30	58	0,288	0,067	0,2326	11,6	
Z-45	58	0,288	0,076	0,2639	11,5	
Z-60	56	0,294	0,075	0,2551	10,9	
K-15	56	0,297	0,073	0,2458	11,5	
K-30	58	0,294	0,075	0,2551	11,8	
K-45	50	0,293	0,114	0,3891	10,8	
K-60	50	0,307	0,090	0,2932	11,3	

Tabela 8

Udział sklein w drewnie warstwowym, sklejonym z fornirów o różnej grubości

Numer kolejny próbki	Symbol serii próbek			
	0—0,20	0—0,35	0—0,50	0—1,00
	Udział sklein u mm/mm			
1	0,2194	0,1074	0,1027	0,0439
2	0,2520	0,1150	0,0861	0,0558
3	0,2447	0,1555	0,0823	0,0567
4	0,2964	0,1491	0,0939	0,0607
5	0,3369	0,1587	0,1003	0,0533
6	0,2754	0,1452	0,1001	0,0604
7	0,2387	0,1536	0,0816	0,0698
8	0,2865	0,1515	0,1133	0,0629
9	0,2608	0,1468	0,1017	0,0631
10	0,2913	0,1482	0,0992	0,0654
Średnio	0,2702	0,1431	0,0961	0,0592

mimo bowiem zabarwienia go granice warstw kleju i drewna nie były wyraźnie uchwytne. Stosując większe powiększenia nie uzyskano lepszych efektów; stwierdzono jednak, że wskutek wnikania kleju w pory drewna granica skleiny jest bardzo nieregularna, a grubość poszczególnych warstw kleju wykazuje dość znaczne różnice. Oprócz tego grubość cienkich warstw kleju była niejednokrotnie bliska dokładności przyrządu pomiarowego; wobec tego porównawczo pomierzono grubość warstw układu uniwersalnym mikroskopem pomiarowym firmy C. Zeiss, o dokładności pomiaru 0,0001 mm, co nie dało jednak lepszych rezultatów. Okazało się bowiem, że niezależnie od powiększenia i dokładności przyrządu przyczynę błędów pomiaru stanowi niepewność w ustaleniu granicy warstwy kleju i forniru.

Z tych względów średnie wyniki pomiaru grubości warstw obarczone są błędem przypadkowym, którego wielkości nie da się ustalić i należy je traktować jako przybliżone.

2. MIKROSTRUKTURA DREWNA WARSTWOWEGO

W celu możliwie dokładnego zorientowania się w strukturze układu drewno — klej poddano drewno warstwowe badaniu mikroskopowemu; dla porównania zbadano również mikrostrukturę drewna litego. Próbki z każdej serii drewna warstwowego oraz próbkę drewna litego poddano zmiękczeniu w mieszaninie alkoholu etylowego z gliceryną przez okres 2 miesięcy. Następnie na mikrotomie saneczkowym wykonano z nich skrawki o grubości około 30μ w płaszczyźnie prostopadłej do włókien drewna. Preparaty przemyto w alkoholu etylowym i zabarwiono; metodę barwienia ustalono na podstawie pracy E. Platha i L. Plath (34) oraz własnych badań wstępnych. Preparaty drewna warstwowego, sklejonego klejem MC-60 z wypełniaczami, zabarwiono wodnym roztworem jodu z jodkiem potasu (odczynnik na skrobię), co spowodowało zabarwienie ziarn wypełniaczy na kolor granatowoniebieski do fioletowogranatowego [1]; klej mocznikowy przybrał pod działaniem tego samego odczynnika nietrwałą barwę jasnożółtawą, różniącą się od barwy drewna. Ponieważ pod działaniem alkoholowego roztworu eozyny klej nie barwił się — co jest dowodem całkowitego utwardzenia i braku wolnych grup aminowych — preparaty drewna warstwowego, klejonego klejem bez wypełniaczy, poddano działaniu zieleni jodowej, w wyniku czego drewno zostało zabarwione na kolor ciemnozielony. Po przemyciu preparatów w alkoholu etylowym zabarwiono je następnie alkoholowym roztworem chryzoidyny, wskutek czego klej mocznikowy przybrał barwę żółtawą, zanikającą po kilkunastu dniach. Preparaty drewna litego zabarwiono zielenią jodową.

Takie zróżnicowanie barwy składników utwardzonej masy klejowej oraz drewna pozwoliło na prześledzenie rozmieszczenia kleju i wypełniaczy w układzie oraz na wykonanie mikrofotografii. Najbardziej charakterystyczne z nich przedstawiono na rys. 8.

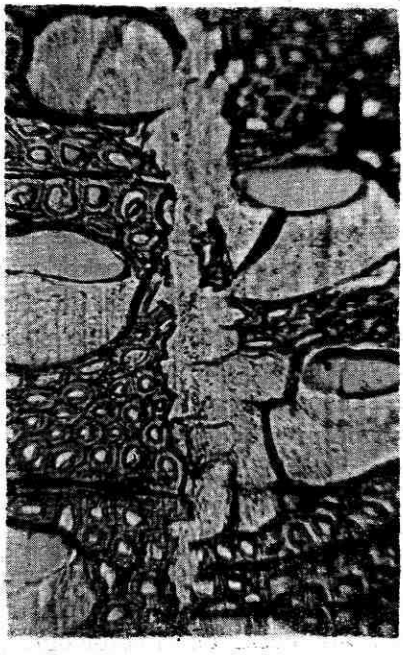
Obserwacje preparatów przeprowadzono za pomocą mikroskopu projekcyjnego firmy C. Zeiss przy powiększeniach około 100 : 1 i 250 : 1.

W wyniku badań mikroskopowych stwierdzono, co następuje:

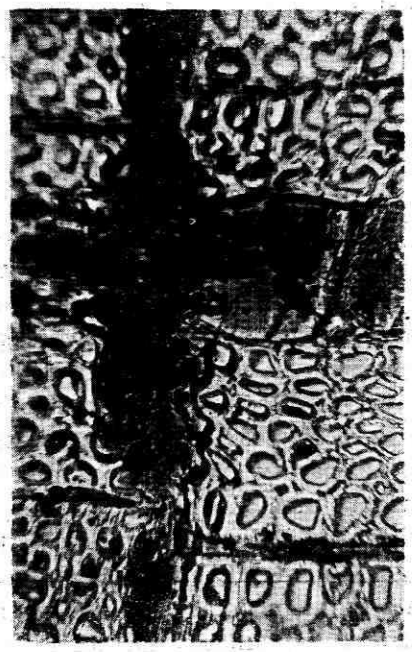
1) fornir w drewnie warstwowym wykazał bardzo równomierną strukturę drewna i brak pęknięć, powstałych przy skrawaniu;

2) obróbka hydrotermiczna przed skrawaniem, skrawanie oraz prasowanie pod ciśnieniem 6 kG/cm^2 nie spowodowały zmian strukturalnych forniru w porównaniu ze strukturą drewna litego;

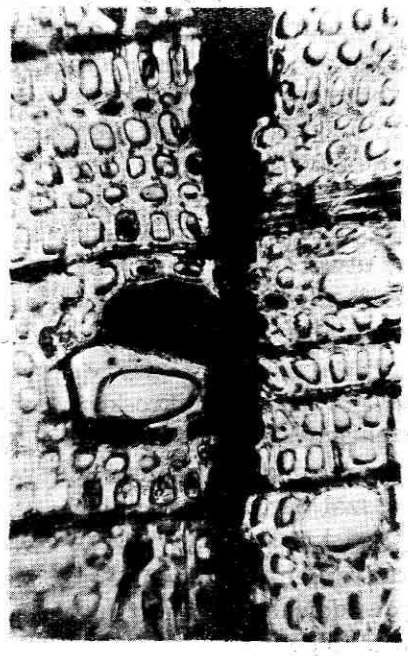
[1] Odcień fioletowy dowodzi zniszczenia zewnętrznej otoczki ziarn skrobi wskutek działania mechanicznego lub hydrolitycznego.



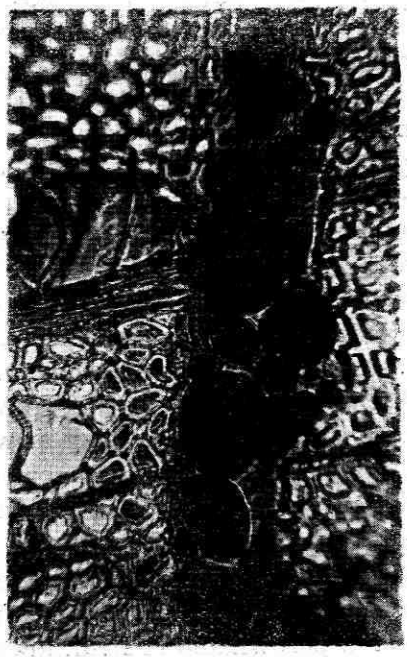
a



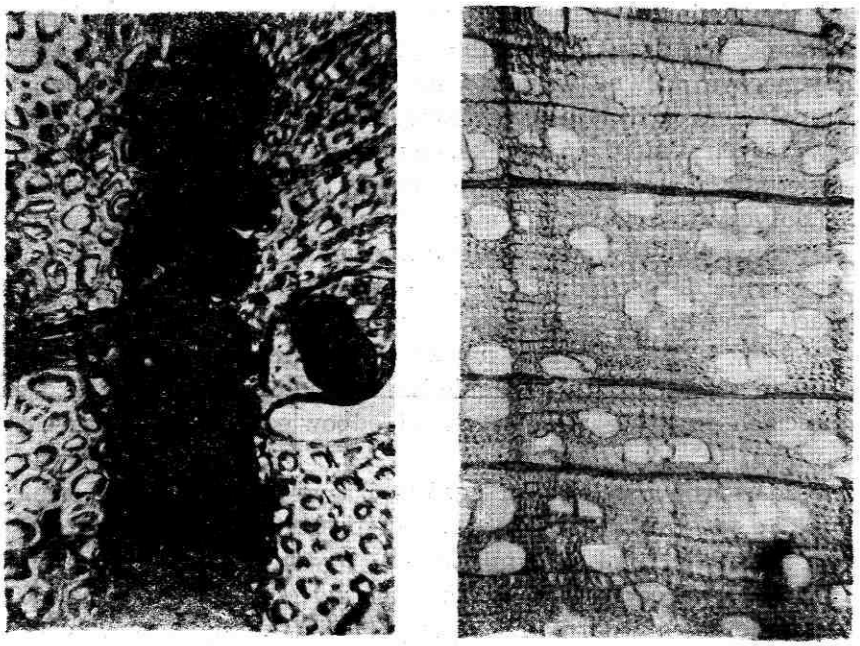
b



c



d



e *f*

Rys. 8. Mikrofotografie sklein kleju mocznikowego MC-60 w brzozowym drewnie równoległowarstwowym, sklejonym z forniru o grubości 0,35 mm; *a* — skleina z kleju bez wypełniacza — pow. 420 : 1, *b* — skleina z kleju o zawartości 15% mąki żytniej — pow. 420 : 1, *c* — skleina z kleju o zawartości 60% mąki żytniej — pow. 420 : 1, *d* — skleina z kleju o zawartości 15% mąki ziemniaczanej — pow. 420 : 1, *e* — skleina z kleju o zawartości 60% mąki ziemniaczanej — pow. 420 : 1, *f* — przekrój poprzeczny drewna brzozowego — pow. 95 : 1

3) klej mocznikowy, a w przypadku kleju z mąką żytnią — również ziarna wypełniacza wniknęły na znaczną głębokość w pory drewna, zwłaszcza w naczynia;

4) forniry o grubości nominalnej 0,20; 0,35 i 0,50 mm — zwłaszcza klejone bez dodatku wypełniacza — zostały przesycone klejem prawie na całej grubości; klej widoczny jest w większości naczyń, najczęściej w postaci jaśniejszej, dość grubej otoczki wokół ich ścian;

5) hydrolityczna odbudowa wypełniaczy skrobiowych wskutek obniżenia pH kleju przez utwardzacz jest nieznaczna, zwłaszcza w przypadku mąki ziemniaczanej; fioletowane zabarwienie mąki żytniej należy przypisać głównie mechanicznemu zniszczeniu struktury ziarn skrobi podczas przemiału;

6) przy klejeniu na zimno nawet znaczny dodatek wypełniaczy nie hamuje w skuteczny sposób wnikania kleju mocznikowego w drewno;

7) wskutek głębokiego wniknięcia kleju w drewno grubości warstw kleju są mniejsze niż przy klejeniu w podwyższonej temperaturze, powodującej szybkie utwardzanie kleju;

8) nierównomierne rozproszenie w kleju i znaczny wymiar ziarn mąki ziemniaczanej w stosunku do grubości warstwy kleju oraz w stosunku do średnicy naczyń drewna wskazują na ograniczoną przydatność tej mąki jako wypełniacza dla kleju mocznikowego przy klejeniu na zimno.

Z powyższych stwierdzeń wynika, co następuje.

1. Sklejenie materiału na zimno należy uznać za gorsze aniżeli na gorąco; dotyczy to zwłaszcza materiału sklejonego klejem bez wypełniacza i klejem wypełnionym mąką ziemniaczaną.

2. Stosownie do definicji skleiny, sformułowanej w rozdziale I niniejszej pracy, drewno warstwowe sklejone z fornirów o grubościach nominalnych 0,20; 0,35 i 0,50 mm należy uważać za równoległowarstwowy układ sklein, oddzielonych od siebie bardzo cienkimi warstwami drewna, o grubościach znacznie mniejszych od odpowiednich nominalnych grubości forniru.

Pierwsze z tych ustaleń jest zgodne z wynikami pracy A. Korzeniowskiego i K. Piłatówny (24), którzy stwierdzili, że próbki sklejone na zimno tymi samymi klejami i w takich samych warunkach nie wykazały wodoodporności sklein, a ich wytrzymałość na ścinanie okazała się mniejsza niż normalna wytrzymałość skleiny klejów mocznikowych przy klejeniu na gorąco.

Głębokie wnikanie kleju w fornir uniemożliwia w konsekwencji dokładne pomierzenie grubości sklein i skonfrontowanie wyników pomiaru modułu sprężystości sklejonego drewna warstwowego z zależnościami teoretycznymi, które podano w równaniach (11), (14), (19) i (23). W analizie wyników można jedynie uwzględnić zróżnicowany wpływ przecięcia włókien drewna przy skrawaniu forniru; przy niezmiennych pozostałych czynnikach wpływ ten zależy od grubości forniru.

3. KURCZLIWOŚĆ UTWARDZONYCH MAS KLEJOWYCH

W celu stwierdzenia wpływu rodzaju i zawartości wypełniacza na kurczliwość utwardzonej masy klejowej posłużono się metodą opisaną przez H. Klemma (21). Z każdej masy klejowej pobrano po 5 próbek cylindrycznych (rys. 5*a*), stanowiących wlewki masy do probówek szklanych o średnicy wewnętrznej 15 ± 0,5 mm. Początkowa długość próbek l_1, zmierzona po tygodniu od sporządzenia masy klejowej, wynosiła 100 ± 5 mm, a początkowy ciężar G_1 wynosił 25 ± 5 g. Próbki składowano przez 24 tygodnie w warunkach przedstawionych na rys. 7, po czym pomierzono powtórnie ich długość l_2 i ciężar G_2. Pomiary długości wykonywano suwmiarką o dokładności 0,05 mm, a ciężar określano na wadze laboratoryjnej z dokładnością 0,01 g; podczas tych pomiarów temperatura otoczenia wynosiła 18 ± 3° C.

Na podstawie dokonanych pomiarów obliczono średnie arytmetyczne

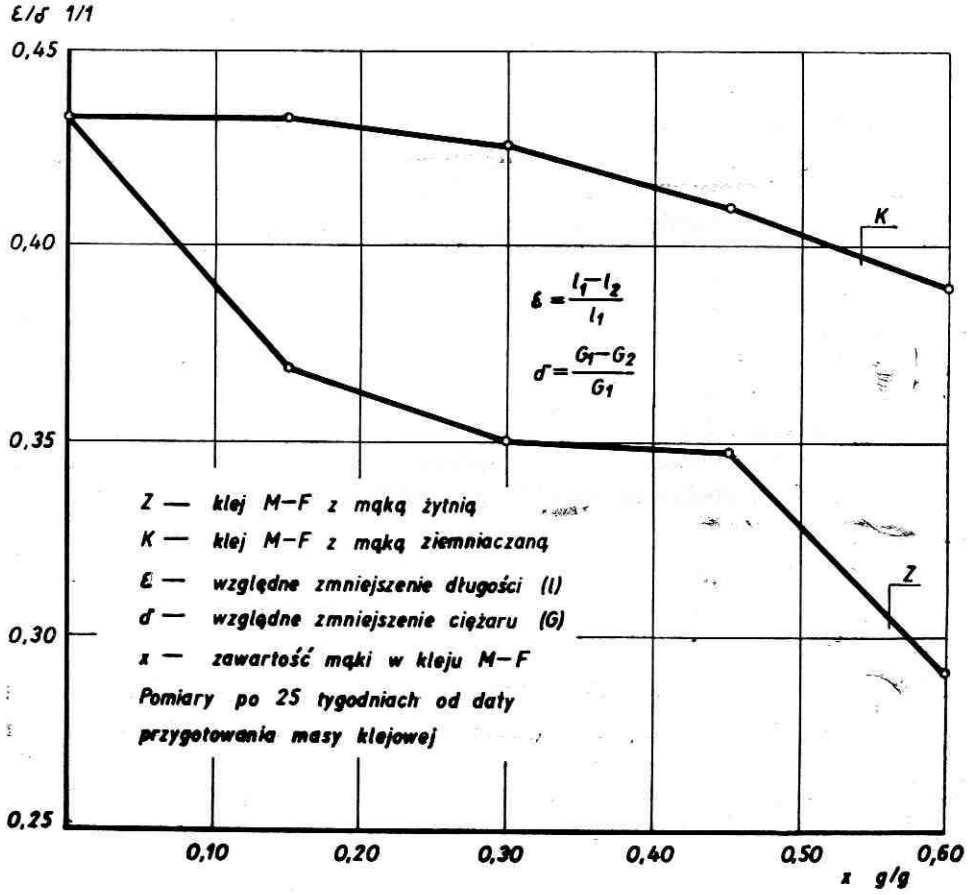
wartości l i G, po czym obliczono względne zmniejszenie długości ε oraz względne zmniejszenie ciężaru δ, korzystając z wzorów:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \tag{24}$$

$$\delta = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \tag{25}$$

Stosunek ε/δ przyjęto za współczynnik liniowej kurczliwości utwardzonej masy klejowej; na rys. 9 przedstawiono graficznie zależność wielkości ε/δ od zawartości wypełniacza x w kleju. Z analizy tego wykresu wynika, co następuje.

1. Wzrost zawartości mąki żytniej obniża wartość współczynnika kurczliwości, przy czym spadek ten jest największy w krańcowych przedziałach zawartości mąki ($x = 0{,}0 \ldots 0{,}15$ oraz $x = 0{,}45 \ldots 0{,}60$), natomiast w środkowym przedziale ($x = 0{,}15 \ldots 0{,}45$) wpływ zawartości mąki jest mniej wyraźny.



Rys. 9. Zależność współczynnika kurczliwości (ε/δ) kleju mocznikowego od rodzaju i zawartości wypełniacza (x)

2. Ze wzrostem zawartości mąki ziemniaczanej współczynnik kurczliwości maleje, przy czym zależność ta ma bardziej regularny charakter niż w przypadku kleju z mąką żytnią.

3. Wpływ mąki żytniej na współczynnik kurczliwości jest silniejszy niż wpływ mąki ziemniaczanej.

Wpływ zawartości wypełniacza na kurczliwość utwardzonego kleju ilustrują również rysunki 5*b* i 5*c*, na których przykładowo przedstawiono przekrój masy klejowej bez wypełniacza (rys. 5*b*) oraz przekrój masy klejowej *K*-30, zawierającej 30% mąki ziemniaczanej (rys. 5*c*). W obu przypadkach klej został utwardzony na zimno w zamkniętej skrzynce drewnianej; przekroje wykonano po tygodniu od sporządzenia mas klejowych. Silniejsze spękanie kleju nie zawierającego wypełniacza dowodzi większej jego kurczliwości lub mniejszej plastyczności niż kleju z wypełniaczem.

V. BADANIA METODYCZNE

1. CEL BADAŃ METODYCZNYCH

Celem badań metodycznych było eksperymentalne ustalenie:

1) wielkości błędów doświadczalnych;

2) zależności statycznego i dynamicznego modułu sprężystości od grubości forniru w drewnie warstwowym, klejonym klejem MC-60 bez wypełniacza;

3) współzależności statycznego i dynamicznego modułu sprężystości, z uwzględnieniem wpływu kierunku zginania lub kierunku drgań w stosunku do warstw układu.

Ustalenie wielkości błędów doświadczalnych oraz zależności wymienionych w punktach 2 i 3 było konieczne, aby w stanowiącym główny cel pracy badaniu zależności modułu sprężystości warstwowego układu od rodzaju i ilości wypełniacza w kleju zastosować najbardziej właściwą metodę pomiaru.

2. POMIARY MODUŁÓW SPRĘŻYSTOŚCI

Aby porównawczo pomierzyć moduł statyczny E_s i dynamiczny E_d na tych samych próbkach i w jednakowych warunkach, zastosowano metodę opracowaną przez W. A. Bażenowa (6). Próbki w postaci belek o przekroju prostokątnym zamocowywano jednostronnie (wspornikowo) w uchwycie śrubowym[1], związanym z betonowym fundamentem, który unie-

[1] Uchwyt został skonstruowany i wykonany przez Dział Ogólnotechniczny Instytutu Technologii Drewna według podanych założeń.

możliwiał drgania uchwytu. Stosunek swobodnej długości l_o próbki do wysokości h jej przekroju poprzecznego wynosił $l_o/h = 25 \pm \frac{3}{1}$; na podstawie doświadczeń Bażenowa można stwierdzić, że przy wartości $l_o/h \geqslant 25$ wpływ naprężeń stycznych na pomierzoną wartość modułu E drewna litego jest mały i nie przekracza dokładności pomiaru modułu.

Moduły sprężystości E_s i E_d pomierzono dla kierunku równoległego i prostopadłego do warstw układu.

Statyczny moduł sprężystości obliczano według wzoru

$$E_s = \frac{12\,(P_1 - P_2)}{bl^3\,(y_1 - y_2)}\,(0{,}5\,l_o x^2 - 0{,}1666\,x^3)\ \mathrm{kG/cm^2} \tag{26}$$

gdzie

P_1 — początkowa wartość siły zginającej w kG,
P_2 — końcowa wartość siły zginającej w kG,
b — szerokość poprzecznego przekroju próbki w cm,
h — wysokość poprzecznego przekroju próbki w cm,
l_o — odległość punktu przyłożenia siły P od punktu utwierdzenia próbki (swobodna długość próbki) w cm,
x — odległość punktu pomiaru ugięcia od punktu utwierdzenia próbki w cm,
y_1, y_2 — wartość ugięcia w cm przy obciążeniach siłami P_1 lub P_2.

Wzór (26) jest analogiczny z wzorem zastosowanym przez W. A. Bażenowa (6).

Schemat pomiaru statycznego modułu sprężystości przedstawiono na rys. 10*a*. Mierzone wielkości oraz dokładność ich pomiaru scharakteryzowano liczbowo w tabeli 9.

Próbki obciążano siłą P_1 i po upływie 30 sek. odczytywano na mikromierzu (czujniku) zegarowym wartość ugięcia y_1; następnie zmniejszano obciążenie do wartości P_2 i po takim samym czasie jego działania odczytywano wartość ugięcia y_2. Taki tok postępowania eliminował błędy początkowego odczytu mikromierza oraz wpływ opóźnienia sprężystego i ewentualnych odkształceń trwałych na wielkość mierzonego ugięcia. W trakcie doświadczeń wstępnych stwierdzono, że nacisk trzpienia mikromierza, zastosowanego do pomiaru ugięcia, nie wpływał na wynik pomiaru. Wymiary b i h przekroju poprzecznego mierzono w połowie długości próbki oraz w odległości 100 mm od każdego z jej końców; do obliczeń wzięto średnie arytmetyczne wartości tych pomiarów.

Dynamiczny moduł sprężystości obliczano według wzoru

$$E_d = \frac{\gamma\, l_o^4 f^2}{25{,}4\, h^2} \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kG/cm^2} \tag{27}$$

gdzie

γ — ciężar właściwy próbki w g/cm³,
l_o — swobodna długość próbki w cm,

Tabela 9

Charakterystyka pomiarów w doświadczeniu metodycznym

Wielkość obliczana	L. p.	Wielkość mierzona	Symbol	Miano	Wartość liczbowa	Dokładność pomiaru Δ	Liczba pomiarów n
Statyczny moduł sprężystości E_s	1	początkowa wartość siły zginającej	P_1	kG	$1 \pm 0{,}0001$	0,0001	10
	2	końcowa wartość siły zginającej	P_2	kG	$0{,}5 \pm 0{,}0001$	0,0001	10
	3	szerokość poprzecznego przekroju próbki	b	cm	$2 \pm 0{,}1$	0,005	750
	4	wysokość poprzecznego przekroju próbki	h	cm	$2 \pm 0{,}1$	0,005	750
	5	odległość punktu przyłożenia siły P od punktu utwierdzenia próbki	l_o	cm	$50 \pm 0{,}05$	0,05	250
	6	odległość punktu pomiaru ugięcia od punktu utwierdzenia próbki	x	cm	$40 \pm 0{,}05$	0,05	250
	7	ugięcie przy sile P_1	y_1	cm	zmienna	0,001	500
	8	ugięcie przy sile P_2	y_2	cm	zmienna	0,001	500
	9	czas obciążenia siłą P_1 lub P_2	τ	sek.	30 ± 1	0,5	1000
	10	statyczne naprężenie zginające	σ_s	kG/cm²	$\leqslant 19$	—	1
Dynamiczny moduł sprężystości E_d	11	swobodna długość próbki	l_o	cm	$50 \pm 0{,}05$	0,05	—[1]
	12	wysokość poprzecznego przekroju próbki	h	cm	$2 \pm 0{,}1$	0,005	—[2]
	13	częstotliwość drgań bliskorezonansowych	f	1/sek.	zmienna	0,5	500
	14	dynamiczne naprężenie zginające	σ_d	kG/cm²	$\leqslant 13$	—	1
Ciężar właściwy γ	15	ciężar bieżący próbki	G	g	zmienna	0,01	250
	16	długość całkowita próbki	l	cm	$59{,}7 \pm 0{,}05$	0,05	250
	17	szerokość poprzecznego przekroju próbki	b	cm	$2 \pm 0{,}1$	0,005	—[3]
	18	wysokość poprzecznego przekroju próbki	h	cm	$2 \pm 0{,}1$	0,005	—[2]
Wilgotność początkowa W	19	ciężar próbki wilgotnej	G_1	g	zmienna	0,001	100
	20	ciężar próbki suchej	G_2	g	zmienna	0,001	100
						Razem	5222

1 — wykorzystano wyniki pomiarów z pozycji 5
2 — „ „ „ „ 4
3 — „ „ „ „ 3

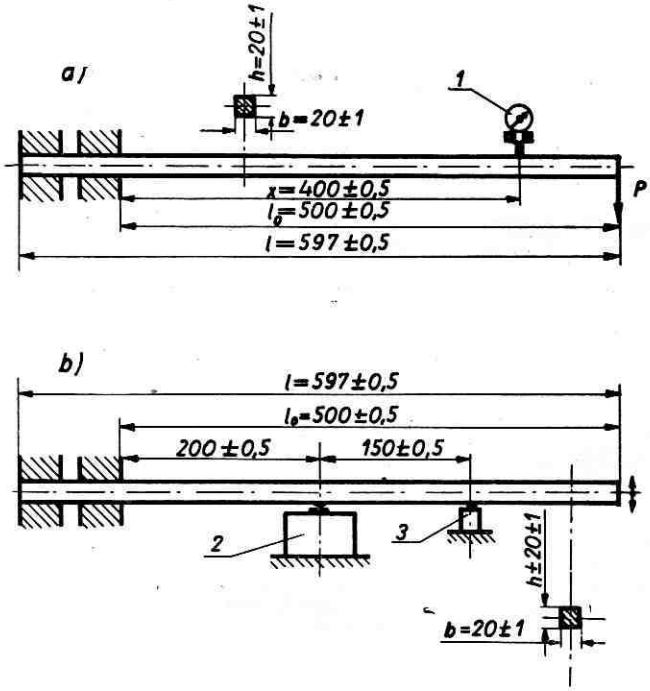
f — częstotliwość drgań bliskorezonansowych rzędu podstawowego w cyklach/sek.,

h — wysokość poprzecznego przekroju próbki w cm.

Wzór (27) jest analogiczny z wzorem zastosowanym przez B a ż e n o w a.

Schemat blokowy urządzenia [1] do pomiaru dynamicznego modułu sprężystości przedstawiono na rys. 11, a schemat pomiaru — na rys. 10*b*. Widok stanowiska pomiarowego i jego fragmenty przedstawia rys. 12.

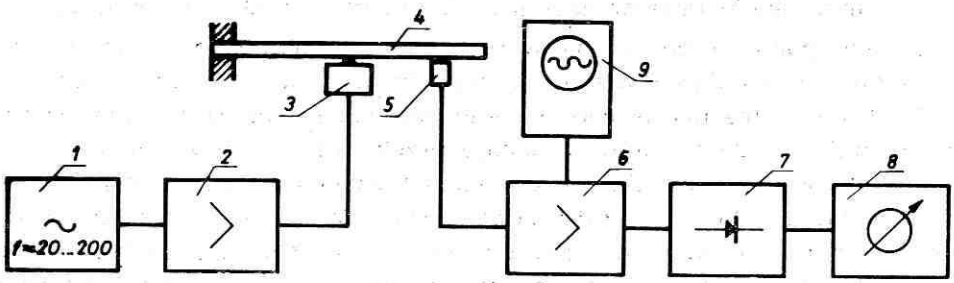
Zasada pomiaru polega na wzbudzeniu wymuszonych drgań próbki. Generator impulsów *1* zasila poprzez wzmacniacz 2 elektromagnes *3*, wzbudzający drgania próbki *4*; prąd wzbudzony przez drgania próbki w czujniku magnetycznym *5* zostaje przekazany poprzez wzmacniacz *6* do detektora *7* i wskaźnika elektromagnetycznego *8* oraz bezpośrednio ze wzmacniacza *6* do oscylografu katodowego *9*. Wychylenie strzałki wskaźnika *8* oraz amplituda sinusoidalnej krzywej świetlnej na ekranie oscylografu *9* są proporcjonalne do amplitudy drgań próbki. Zmieniając często-



Rys. 10. Schemat pomiaru modułu sprężystości: *a* — metodą statyczną, b — metodą dynamiczną; *1* — mikromierz (czujnik zegarowy), *2* — elektromagnes pobudzający, *3* — czujnik magnetyczny

[1] Urządzenie to (z wyjątkiem oscylografu) zaprojektowano i wykonano w Zakładzie Podstaw Telekomunikacji Politechniki Warszawskiej; konstruktorem był mgr inż. L. Bułhak.

tliwość drgań generowanych doprowadza się ją do wartości, przy której wskazania obu przyrządów osiągają maksimum. Odczytana wówczas na skali generatora częstotliwość jest równa (z dokładnością skalowania) częstotliwości drgań własnych swobodnej części próbki, czyli szukanej częstotliwości rezonansowej rzędu podstawowego, przy której amplituda drgań próbki osiąga maksimum. Dalsze maksima wskazań uzyskuje się



Rys. 11. Schemat blokowy urządzenia do pomiaru dynamicznego modułu sprężystości: 1 — generator impulsów zmiennej częstotliwości, 2 — wzmacniacz mocy, 3 — elektromagnes pobudzający (wzbudnik), 4 — próbka, 5 — czujnik magnetyczny, 6 — wzmacniacz wskaźnika, 7 — detektor, 8 — wskaźnik elektromagnetyczny, 9 — oscylograf katodowy

przy kolejnych harmonicznych częstotliwości drgań własnych, jednak wartości wskazań są wówczas mniejsze. Ta sama metoda oraz urządzenie pomiarowe były również stosowane przez R. Dobrowolskiego (13) i J. Wrońskiego (42).

Aby umożliwić wzbudzenie drgań próbki przez elektromagnes oraz wzbudzić prąd w czujniku magnetycznym, w próbki wbijano pineski stalowe, rozmieszczone nad elektromagnesem i czujnikiem. Ciężar pinesek wbitych w jedną próbkę nie przekraczał 0,01 ciężaru próbki; w tych warunkach wpływ pinesek na mierzoną częstotliwość drgań zawierał się w granicach dokładności pomiaru.

Ciężar właściwy próbek, konieczny do określenia dynamicznego modułu sprężystości, obliczono według wzoru

$$\gamma = \frac{G}{bhl} \text{ g/cm}^3 \tag{28}$$

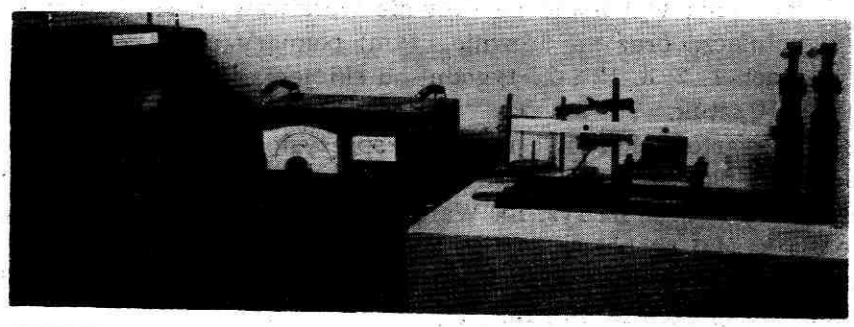
gdzie

G — ciężar próbki w g,
b, h — jak we wzorze (26),
l — całkowita długość próbki w cm.

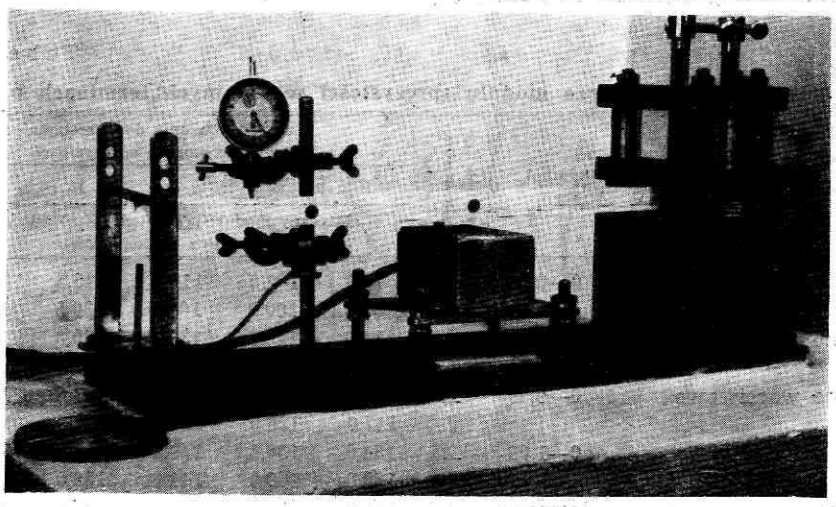
Ciężar G oraz wymiary b, h i l określano bezpośrednio przed pomiarami modułów E_s i E_d.

Mierzone wielkości oraz liczby wykonanych pomiarów i ich dokładności podano w tabeli 8.

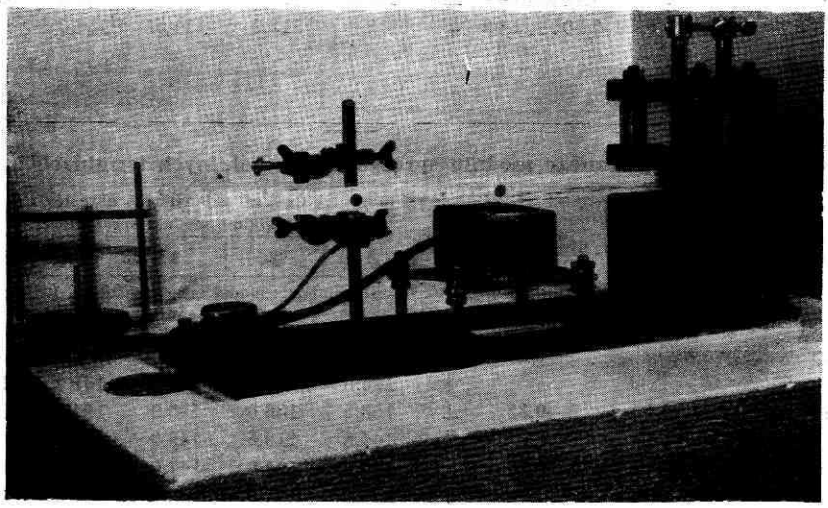
a



b



c



Rys. 12. Stanowisko do pomiaru modułów sprężystości: *a* — widok ogólny; kolejno od lewej: oscylograf, generator drgań, uchwyt z próbką, b — uchwyt z próbką i oprzyrządowaniem do pomiaru statycznego (elektromagnes i czujnik obniżone), *c* — uchwyt z próbką i oprzyrządowaniem do pomiaru dynamicznego (obciążnik i mikromierz zegarowy zdjęte)

Doświadczenia wykonano na drewnie warstwowym sklejonym klejem bez wypełniacza oraz na drewnie litym; pomiary powtórzono 5-krotnie w terminach 1, 2, 3, 12 i 25 tygodni od sklejenia. Liczba próbek w serii wynosiła 10 sztuk.

Średnie wartości liczbowe modułów sprężystości, wilgotności i ciężaru właściwego, określone w kolejnych terminach badania, podano w tabelach 10, 11 i 12 oraz na rys. 13. Wartości tych samych wskaźników, określone dla każdej próbki w serii po 25 tygodniach od sklejenia (kiedy różnica wilgotności poszczególnych serii materiału była minimalna), przedstawiono w tabelach 13, 14 i 15.

Tabela 10

Średnie wartości statycznego modułu sprężystości w kolejnych terminach badania

Rodzaj materiału	Symbol serii	Kierunek zginania w stos. do warstw	Czas od sklejenia do określenia τ-tygodnie modułu sprężystości				
			1	2	3	12	25
			statyczny moduł sprężystości E_s 10^3kG/cm² (średnie z 10 pomiarów)				
Drewno warstwowe	0—0,20	⊥	76,0	102,5	111,0	145,5	168,5
		‖	83,0	100,0	106,0	139,5	160,0
Drewno warstwowe	0—0,35	⊥	114,0	126,5	133,0	160,5	179,5
		‖	118,5	119,0	129,5	153,5	166,5
Drewno warstwowe	0—0,50	⊥	113,5	133,0	140,5	163,0	183,0
		‖	117,0	126,0	127,0	157,5	169,0
Drewno warstwowe	0—1,00	⊥	134,0	138,5	140,0	152,5	159,5
		‖	138,0	140,0	144,0	150,0	159,0
Drewno lite	drewno —	⊥ [1]	111,0	121,0	120,0	150,0	154,5
	0,20 ... 1,00	‖	113,5	112,0	111,5	136,5	130,5

1 — W stosunku do warstw przyrostów rocznych

Tabela 11

Średnie wartości dynamicznego modułu sprężystości w kolejnych terminach badania

Rodzaj materiału	Symbol serii	Kierunek drgań w stos. do warstw	Czas od sklejenia do określenia τ-tygodnie modułu sprężystości				
			1	2	3	12	25
			Dynamiczny moduł sprężystości E_d 10^3 kG/cm² (średnie z 10 pomiarów)				
Drewno warstwowe	0—0,20	⊥	111,5	115,5	117,0	160,0	155,5
		‖	120,5	119,0	124,0	162,5	153,0
Drewno warstwowe	0—0,35	⊥	153,5	136,0	155,0	194,5	177,5
		‖	144,5	119,5	149,0	182,0	156,5
Drewno warstwowe	0—0,50	⊥	142,0	154,0	147,0	184,0	178,0
		‖	153,0	143,0	142,0	183,0	167,0
Drewno warstwowe	0—1,00	⊥	160,0	149,5	142,0	172,0	155,5
		‖	161,0	155,5	149,0	177,0	155,0
Drewno lite	drewno —	⊥ [1]	140,5	142,0	142,0	183,0	156,0
	0,20 ... 1,00	‖	148,5	131,0	130,5	160,0	133,0

1 — W stosunku do warstw przyrostów rocznych

Tabela 12

Średnie wartości wilgotności i ciężaru właściwego w kolejnych terminach badania

Rodzaj materiału	Symbol serii	Czas od sklejenia do określenia właściwości τ-tygodnie				
		1	2	3	12	25
Wilgotność w % (średnie z 10 pomiarów)						
Drewno warstwowe	0—0,20	34,3	33,0	28,2	17,4	10,9
Drewno warstwowe	0—0,35	27,3	25,5	23,6	16,9	12,1
Drewno warstwowe	0—0,50	23,4	21,8	20,1	14,1	8,4
Drewno warstwowe	0—1,00	15,4	14,9	14,4	12,7	8,2
Drewno lite	drewno — 0,20 . . . 1,00	32,6	30,5	28,9	16,1	11,6
Ciężar właściwy γ g/cm³ (średnie z 10 pomiarów)						
Drewno warstwowe	0—0,20	1,17	1,17	1,13	1,13	1,14
Drewno warstwowe	0—0,35	1,09	1,07	1,09	1,08	1,08
Drewno warstwowe	0—0,50	1,01	1,00	0,99	0,98	0,97
Drewno warstwowe	0—1,00	0,80	0,79	0,79	0,79	0,78
Drewno lite	drewno — 0,20 . . . 1,00	0,69	0,68	0,68	0,65	0,64

Tabela 13

Wartości statycznego modułu sprężystości, określone po 25 tygodniach od sklejenia materiału

Numer kolejny próbki	Symbol serii próbek									
	0—0,20		0—0,35		0—0,50		0—1,00		drewno 0,20...1,00	
	statyczny moduł sprężystości E_s 10^3 kG/cm²									
	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥
1	170	160	185	165	185	170	155	155	155	130
2	170	160	175	165	185	180	165	155	150	145
3	165	150	180	170	185	175	165	160	165	135
4	165	160	180	170	190	170	155	150	180	125
5	160	150	170	160	180	160	160	165	155	135
6	170	160	185	165	180	165	160	160	150	130
7	180	170	180	170	180	165	155	160	155	140
8	170	165	175	165	185	170	160	165	135	130
9	160	165	180	165	185	170	160	165	135	110
10	175	160	185	170	175	165	160	155	165	125
Średnio	168,5	160,0	179,5	166,5	183,0	169,0	159,5	159,0	154,5	130,5

Tabela 14

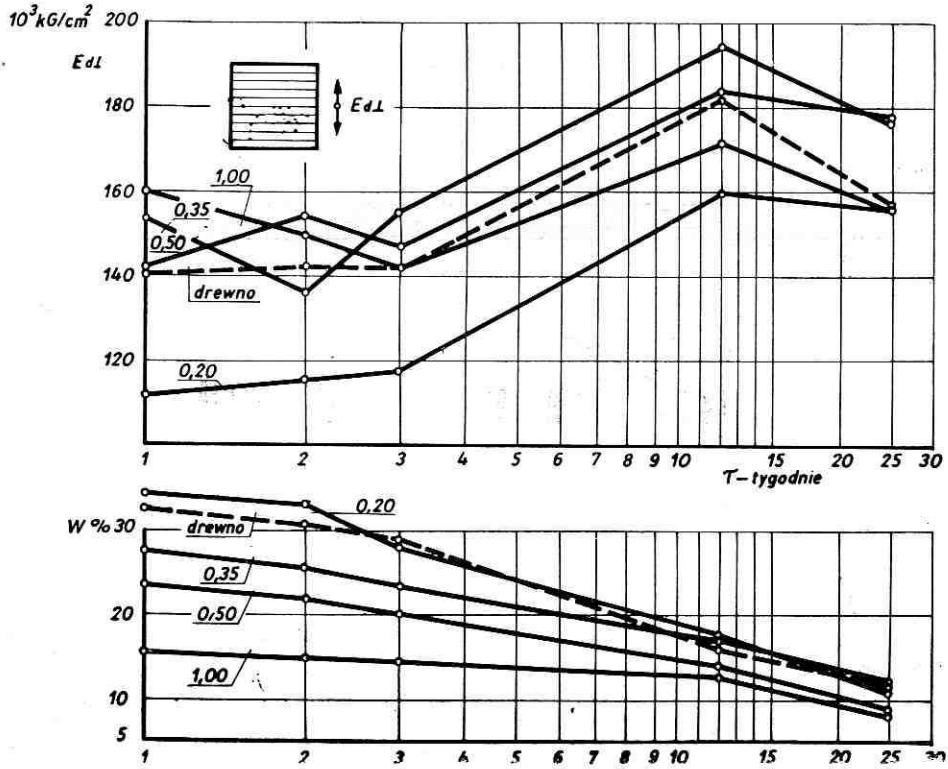
Wartości dynamicznego modułu sprężystości, określone po 25 tygodniach od sklejenia materiału

Numer kolejny próbki	Symbol serii próbek									
	0—0,20		0—0,35		0—0,50		0—1,00		drewno 0,20...1,00	
	dynamiczny moduł sprężystości E_d 10^3 kG/cm²									
	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	∥
1	155	160	190	160	180	165	155	155	155	130
2	155	135	170	140	185	175	155	155	155	145
3	150	145	170	165	180	175	155	160	180	140
4	150	145	170	150	190	170	150	155	170	150
5	150	145	170	160	175	160	155	155	160	135
6	150	155	185	160	180	165	145	150	155	125
7	175	170	180	160	160	155	155	150	150	130
8	155	160	185	155	185	170	160	160	150	130
9	150	160	170	145	180	170	160	155	145	120
10	165	155	185	170	165	165	165	155	140	125
Średnio	155,5	153,0	177,5	156,5	178,0	167,0	155,5	155,0	156,0	133,0

Tabela 15

Wartości wilgotności i ciężaru właściwego, określone po 25 tygodniach od sklejenia materiału

Numer kolejny próbki	Wilgotność W %					Ciężar właściwy γ g/cm³				
	Symbol serii próbek									
	0—0,20	0—0,35	0—0,50	0—1,00	drewno — 0,20... 1,00	0—0,20	0—0,35	0—0,50	0—1,00	drewno — 0,20... 1,00
1	11,1	12,1	8,5	8,3	11,3	1,13	1,07	0,97	0,76	0,64
2	10,7	12,3	8,5	8,1	11,9	1,12	1,07	0,98	0,78	0,65
3	10,7	12,2	9,1	9,1	11,5	1,14	1,08	0,98	0,79	0,69
4	10,8	13,2	9,3	8,3	12,1	1,08	1,09	0,98	0,78	0,68
5	11,3	11,0	8,3	8,3	12,2	1,15	1,07	0,97	0,78	0,62
6	10,7	12,1	8,6	7,9	11,4	1,18	1,08	0,97	0,78	0,62
7	10,7	12,0	9,3	8,2	11,2	1,19	1,08	0,96	0,78	0,62
8	11,1	12,0	7,9	7,8	10,9	1,13	1,08	0,98	0,78	0,62
9	10,9	11,9	7,2	8,0	12,2	1,13	1,08	0,98	0,79	0,60
10	11,0	12,2	7,5	7,8	11,6	1,12	1,09	0,97	0,79	0,66
Średnio	10,90	12,10	8,42	8,18	11,63	1,137	1,079	0,974	0,781	0,640



Rys. 13. Zmiany dynamicznego modułu sprężystości ($E_{d\perp}$) i wilgotności (W) drewna warstwowego o różnej grubości forniru; klej bez wypełniacza

3. OKREŚLANIE WILGOTNOŚCI

Początkową wilgotność każdej serii próbek określano po tygodniu od sklejenia materiału. W przedłużeniu próbki przeznaczonej do pomiaru modułów sprężystości wycięto w sąsiedztwie obu jej końców po jednej małej próbce o wymiarach około 2×2×2 cm (rys. 6); na próbkach tych oznaczono wilgotność metodą suszarkowo-wagową przy temperaturze suszenia 100 ± 5° C.

Podczas suszenia próbek oprócz wody odparowywał również wolny formaldehyd z kleju; nie mogąc go wyodrębnić przyjęto za wilgotność stosunek ciężaru obu odparowanych substancji do ciężaru próbki zupełnie suchej. Takie postępowanie było o tyle usprawiedliwione, że zawartość wolnego formaldehydu w układzie była nieznaczna w porównaniu z zawartością wody. Z ogólnych właściwości fizycznych formaldehydu wynika, że wpływa on na mechaniczne właściwości drewna w mniejszym stopniu niż woda, która jest bardziej polarna od formaliny technicznej i wykazuje mniejszą od niej lepkość. Działanie formaldehydu na drewno nie powo-

duje przy tym istotnych zmian chemicznego składu błony zdrewniałych komórek.

Wilgotność początkową każdej z próbek przeznaczonych do pomiaru modułów sprężystości przyjęto na równą średniej arytmetycznej wilgotności obu małych próbek, pobranych przy jej końcach. W ten sposób na podstawie kolejnych ważeń można było obliczyć bieżącą wilgotność każdej z próbek w terminach pomiaru modułów sprężystości. Pomierzone ciężary próbek wykorzystywano jednocześnie do obliczenia ich ciężaru właściwego.

Dokładność pomiarów związanych z oznaczaniem wilgotności podano w tabeli 9. Wyniki oznaczenia wilgotności przedstawiono w tabelach 12 i 15.

4. DOKŁADNOŚĆ OKREŚLENIA MODUŁÓW SPRĘŻYSTOŚCI

Ocenę błędu określenia modułów sprężystości oparto na uzasadnionym przez J. Czechowicza (11) obliczeniu różniczki zupełnej funkcji wielu zmiennych o wzorze ogólnym

$$A = f(x, y, z \ldots, n) \tag{29}$$

gdzie $x, y, z \ldots n$ — zmienne niezależne, wyrażające bezpośrednio mierzone wielkości,

A — wartość funkcji, obliczona na podstawie zmierzonych wielkości.

Oznaczając graniczne bezwzględne wartości popełnionych błędów pomiaru (równe dokładnościom pomiaru Δ) przez Δx, Δy, $\Delta z \ldots \Delta n$, otrzymuje się wyrażenie na graniczną wartość bezwzględną błędu funkcji A

$$\Delta A = \left|\frac{\partial A}{\partial x}\right| \Delta x + \left|\frac{\partial A}{\partial y}\right| \Delta y + \left|\frac{\partial A}{\partial z}\right| \Delta z + \ldots + \left|\frac{\partial A}{\partial n}\right| \Delta n \ldots \tag{30}$$

Względną wartość błędu δA otrzymuje się odnosząc wartość błędu bezwzględnego do wartości funkcji

$$\delta A = \frac{\Delta A}{A} \tag{30a}$$

Oznaczając $(P_1 - P_2) = P$ oraz $(y_1 - y_2) = y$ można przedstawić wzór (26) w postaci

$$E_s = \frac{6\, P l_o x^2 - 1{,}99\, P x^3}{b h^3 y} \tag{26a}$$

skąd dla błędu określenia statycznego modułu sprężystości otrzymuje się

$$\Delta E_s = \left|\frac{\partial E_s}{\partial P}\right| \Delta P + \left|\frac{\partial E_s}{\partial l_o}\right| \Delta l_o + \left|\frac{\partial E_s}{\partial x}\right| \Delta x + \left|\frac{\partial E_s}{\partial b}\right| \Delta b + \left|\frac{\partial E_s}{\partial h}\right| \Delta h + \left|\frac{\partial E_s}{\partial y}\right| \Delta y \tag{31}$$

Ponieważ

$\gamma = \frac{G}{bhl}$ oraz $\frac{l_o}{l} \approx 0{,}84$ (przy założonych wartościach l i l_o) można wzór (27) przedstawić w postaci

$$E_d \approx \frac{G l_o^3 f^2}{30\, b h^3} \tag{27a}$$

w związku z czym błąd określenia dynamicznego modułu sprężystości wynosi

$$\Delta E_d = \left|\frac{\partial E_d}{\partial G}\right| \Delta G + \left|\frac{\partial E_d}{\partial l_o}\right| \Delta l_o + \left|\frac{\partial E_d}{\partial f}\right| \Delta f + \left|\frac{\partial E_d}{\partial b}\right| \Delta b + \left|\frac{\partial E_d}{\partial h}\right| \Delta h \tag{32}$$

Obliczenie błędów określenia modułów sprężystości oparto na pomiarach przeprowadzonych po 25 tygodniach od sklejenia materiału doświadczalnego, gdyż różnice średniej wilgotności pomiędzy seriami próbek były wówczas najmniejsze i nie przekraczały 3,9% wilgotności. Do obliczeń przyjęto maksymalne stwierdzone wartości modułów sprężystości (tab. 13 i 14) oraz dokładności pomiaru $\triangle$ podane w tabeli 9. Wartości błędów całkowitych przedstawiono w tabeli 16; w tabeli 17 podano wartości cząstkowych błędów względnych, wynikające z dokładności pomiarów poszczególnych wielkości, na których podstawie obliczano moduł sprężystości.

Tabela 16

Błędy określenia modułów sprężystości

Rodzaj materiału	Symbol serii	Błąd bezwzględny ΔE kG/cm²				Błąd względny δE %			
		moduł statyczny		moduł dynamiczny		moduł statyczny		moduł dynamiczny	
		$E_{s\perp}$	$E_{s\parallel}$	$E_{d\perp}$	$E_{d\parallel}$	$E_{s\perp}$	$E_{s\parallel}$	$E_{d\perp}$	$E_{d\parallel}$
Drewno warstwowe	0—0,20	4797	4439	9037	6085	2,66	2,60	5,16	3,58
Drewno warstwowe	0—0,35	6636	5099	6774	6187	3,58	3,00	3,56	3,64
Drewno warstwowe	0—0,50	5085	5074	7224	6339	2,68	2,82	3,80	3,62
Drewno warstwowe	0—1,00	4419	4896	5771	5437	2,76	2,96	3,50	3,39
Drewno lite	drewno — 0,20 ... 1,00	4909	3353	5767	4835	2,98	2,68	3,21	3,22

Na podstawie analizy wartości błędów całkowitych oraz cząstkowych można sformułować następujące stwierdzenia:

1. Na dokładność określenia statycznego modułu sprężystości największy wpływ ma dokładność pomiaru ugięcia y oraz wysokości h przekroju próbki, najmniejszy zaś — dokładność pomiaru długości l_o próbki.

2. Na dokładność określenia dynamicznego modułu sprężystości największy wpływ ma dokładność pomiaru częstotliwości f drgań próbki oraz

Tabela 17

Błędy cząstkowe określenia modułów sprężystości drewna warstwowego 0—0,35, sklejonego klejem bez wypełniacza z forniru o grubości 0,35 mm

Wielkość mierzona	Symbol	Miano	Dokładność pomiaru Δ	Błąd względny δE %			
				moduł statyczny		moduł dynamiczny	
				$E_{s\perp}$	$E_{s\parallel}$	$E_{d\perp}$	$E_{d\parallel}$
Siła zginająca	P	kG	0,0001	0,03	0,03	—	—
Szerokość poprzecznego przekroju próbki	b	cm	0,005	0,30	0,26	0,26	0,25
Wysokość poprzecznego przekroju próbki	h	cm	0,005	0,87	0,76	0,76	0,75
Swobodna długość próbki	l_o	cm	0,05	0,03	0,03	0,61	0,60
Odległość punktu przyłożenia siły P od punktu utwierdzenia próbki	x	cm	0,05	0,47	0,41	—	—
Ugięcie próbki	y	cm	0,001	1,88	1,51	—	—
Częstotliwość drgań	f	1/sek.	0,5	—	—	1,89	2,01
Ciężar próbki	G	g	0,01	—	—	0,04	0,03
			Razem	3,58	3,00	3,56	3,64

wysokości h jej przekroju, najmniejszy zaś — dokładność pomiaru jej ciężaru G.

3. Przy dokładnościach pomiaru zastosowanych w niniejszym badaniu wynik obliczenia statycznego modułu sprężystości jest obarczony mniejszym błędem bezwzględnym i względnym niż wynik obliczenia dynamicznego modułu sprężystości; różnica ta wynosi około 22% błędu popełnianego przy określaniu dynamicznego modułu sprężystości.

4. Błędy popełniane przy określaniu modułu sprężystości w kierunku równoległym do warstw układu są mniejsze o około 9,3% dla modułu dynamicznego i o około 0,4% dla modułu statycznego — od błędów popełnianych przy określaniu powyższych modułów w kierunku prostopadłym do warstw układu.

5. Wartości względnego błędu określenia modułu sprężystości drewna warstwowego z forniru o grubości nominalnej 0,35 mm są tego samego rzędu dla porównywanych metod; można więc uznać wszystkie porównane metody za równorzędnie przydatne w odniesieniu do badań zasadniczych, do których przeznaczono drewno warstwowe z forniru o grubości 0,35 mm.

Oceniając porównawczo błędy określenia statycznego i dynamicznego modułu sprężystości drewna litego F. Kollmann i H. Krech (23) posłużyli się nieco inną metodą. Założyli oni, iż wobec znacznej dokładności pomiaru częstotliwości wpływ błędu tego pomiaru można w ogóle pominąć, błąd zaś ogólny oznaczenia dynamicznego modułu sprężystości

przyjęli za równy sumie względnych błędów pomiaru wymiarów próbki. W obliczeniu błędu określenia statycznego modułu sprężystości uwzględnili oni dodatkowo błędy względne pomiaru siły zginającej P oraz ugięcia y. Na tej podstawie wyciągnięto wniosek, że określanie giętnego modułu sprężystości metodą dynamiczną jest bardziej dokładne niż metodą statyczną. W świetle wyników niniejszej pracy wniosek ten wydaje się niedostatecznie udokumentowany, gdyż błąd względny pomiaru częstotliwości może być większy od sumy błędów względnych pomiaru siły P oraz ugięcia y; zależy to bowiem od liczbowych wartości mierzonych wielkości oraz od dokładności ich pomiaru. Należy jednak zastrzec się, że w badaniach Kollmanna i Krecha dokładność pomiaru częstotliwości wynosiła $\Delta f = 0{,}01 \ldots 1{,}0$ *Hz*, gdy tymczasem w naszym wypadku była ona stała i wynosiła $\Delta f = 0{,}5$ *Hz* (cykli/sek.).

W wyniku przeprowadzonej analizy błędów postanowiono:

1. W dalszych analizach badania metodycznego oraz w badaniu zasadniczym obliczać moduły sprężystości z jednakową dokładnością bezwzględną $\Delta E = 5 \cdot 10^3$ kG/cm², nieco mniejszą od stwierdzonej przeciętnej wartości błędu bezwzględnego.
2. W analizie współzależności modułów statycznego i dynamicznego przyjąć za miarodajną maksymalną stwierdzoną wartość błędu względnego $\delta E \approx 0{,}05$.

5. OPRACOWANIE I ANALIZA WYNIKÓW

Opracowanie wyników. Opracowanie wyników doświadczeń metodycznych miało na celu zbadanie zależności statycznego i dynamicznego modułu sprężystości od grubości forniru w drewnie warstwowym, sklejonym klejem bez wypełniacza, oraz zbadanie współzależności statycznego i dynamicznego modułu sprężystości z uwzględnieniem wpływu kierunku zginania lub kierunku drgań w stosunku do warstw układu.

Aby upewnić się o jednolitości materiału doświadczalnego, na którym oparto powyższe analizy, dodatkowo sprawdzono wpływ wilgotności i zawartości kleju na wartości modułów sprężystości.

Metodę opracowania wyników oparto na podręcznikach Z. Nawrockiego (29) i F. S. Actona (2), przeprowadzając analizy zmienności wyników i obliczając równania regresji modułu sprężystości od zmiennych parametrów doświadczenia.

Istotność różnicy porównywanych wyników oraz istotność wyznaczonych regresji testowano dla poziomu istotności 0,95.

Wpływ wilgotności i zawartości kleju na moduły sprężystości układu. Analizę wpływu wilgotności i zawartości kleju na moduł sprężystości układu przeprowadzono na podstawie wyników doświadczeń podanych w tabelach 8, 13, 14 i 15, z wyłączeniem

danych dotyczących drewna litego. Zbadanie zależności pomiędzy statycznymi modułami sprężystości $E_{s\perp}$ i $E_{s||}$ oraz dynamicznymi modułami sprężystości $E_{d\perp}$ i $E_{d||}$ a wilgotnością W i zawartością u kleju w układzie sprowadzało się do wyznaczenia funkcji liniowej o postaci

$$E = \beta_0 + \beta_1 W + \beta_2 u \tag{33}$$

gdzie

E — moduł sprężystości,
W — wilgotność,
u — zawartość kleju,
β_0 — stała równania regresji,
β_1 — współczynnik regresji cząstkowej od wilgotności,
β_2 — współczynnik regresji cząstkowej od zawartości kleju.

Współczynniki β_0, β_1, β_2 wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów, rozwiązując układ równań:

$$\left.\begin{aligned} \beta_0 n + \beta_1 \sum^n W_i + \beta_2 \sum^n u_i &= \sum^n E_i \\ \beta_0 \sum^n W_i + \beta_1 \sum^n W_i^2 + \beta_2 \sum^n W_i u_i &= \sum^n E_i W_i \\ \beta_0 \sum^n u_i + \beta_i \sum^n W_i u_i + \beta_2 \sum^n u_i^2 &= \sum^n E_i u_i \end{aligned}\right\} \tag{34}$$

gdzie $\sum^n = \sum_{i=1}^{i=n}$ $i = 1,2 \ldots n$ — liczba wszystkich oznaczeń.

Sprawdzono również istotność wpływu obu współczynników regresji β_1 i β_2 — oraz każdego z nich osobno, po wyeliminowaniu drugiego. Następnie testowano istotność danej regresji wyznaczając wartość F_{emp} i porównując ją z wartością tablicową (teoretyczną) F Snedecora.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że zarówno wpływ wilgotności W, zmiennej w przedziale 7,2 ... 13,2%, jak zawartości u kleju w układzie oraz łączny wpływ obu powyższych wielkości na moduły $E_{s\perp}$, $E_{s||}$, $E_{d\perp}$ i $E_{d||}$ jest nieudowodniony (nieistotny) dla zbadanego drewna warstwowego. Stwierdzenie to pozwala uznać zbadany materiał za jednolity, a dalsze zależności ustalone na podstawie badań tego materiału — za nieobarczone błędami, wynikłymi z nieuwzględnienia wpływu wilgotności oraz zawartości kleju w układzie.

Sprzeczność pomiędzy teoretycznie dowiedzioną zależnością modułów sprężystości od zawartości kleju w układzie a stwierdzonym eksperymentalnie brakiem tejże zależności można by tłumaczyć następującymi przyczynami:

a) moduły sprężystości warstw forniru i warstw kleju są sobie równe, wobec czego zróżnicowanie zawartości kleju nie wpływa na wartość ich wypadkowego modułu sprężystości (hipoteza ta jest mało prawdopodobna);

b) pomiary grubości warstw kleju i obliczenia jego zawartości zostały przeprowadzone ze zbyt małą dokładnością, wskutek czego udowodniona teoretycznie zależność modułu sprężystości układu drewno — klej od modułów sprężystości warstw forniru i warstw kleju nie da się potwierdzić eksperymentalnie;

c) wpływ grubości forniru na jego moduł sprężystości jest tak znaczny, iż uniemożliwia on doświadczalne stwierdzenie zależności modułu sprężystości układu od zawartości kleju;

d) wskutek wnikania kleju w drewno moduł sprężystości forniru zależy nie tylko od jego grubości, lecz również od ilości kleju, który wniknął w drewno.

Najbardziej prawdopodobne wydaje się łączne działanie przyczyn wymienionych w podpunktach b), c) i d); hipoteza ta została sprawdzona dalej.

Wpływ grubości forniru na moduły sprężystości układu. Biorąc pod uwagę wyniki doświadczeń podane w tabelach 13 i 14 (z wyłączeniem danych, dotyczących drewna litego) przeprowadzono porównanie modułów sprężystości układu przy różnych grubościach forniru, na podstawie analizy zmienności o jednym kierunku klasyfikacji, przy założeniu hipotezy liniowej

$$E_{ij} = E + g_i + \varepsilon_{ij} \tag{35}$$

gdzie $i = 1,2 \ldots k$ — liczba stopni grubości forniru,

$j = 1,2 \ldots n$ — liczba próbek dla każdego stopnia grubości forniru,

E_{ij} — moduł sprężystości j-tej próbki przy i-tym stopniu grubości forniru,

E — rzeczywisty moduł sprężystości całego zbadanego materiału,

g_i — efekt wpływu i-tego stopnia grubości forniru na moduł sprężystości,

ε_{ij} — błąd losowy każdego oznaczenia.

Istotność zróżnicowania zbadano testem F Snedecora wyznaczając wartości F_{emp} i porównując je z wartością rozkładu F dla $(k\text{-}1)$ i $k\,(n\text{-}1)$ stopni swobody.

W ten sposób stwierdzono wpływ grubości forniru na moduły sprężystości układu drewno — klej; następnie znaleziono charakter tej zależności, zakładając, że pomiędzy modułem sprężystości a grubością forniru, zachodzi zależność o postaci

$$E = A_0 + A_1 c + A_2 c^2 + \ldots\ldots + A_{k-1} c^{k-1} \tag{36}$$

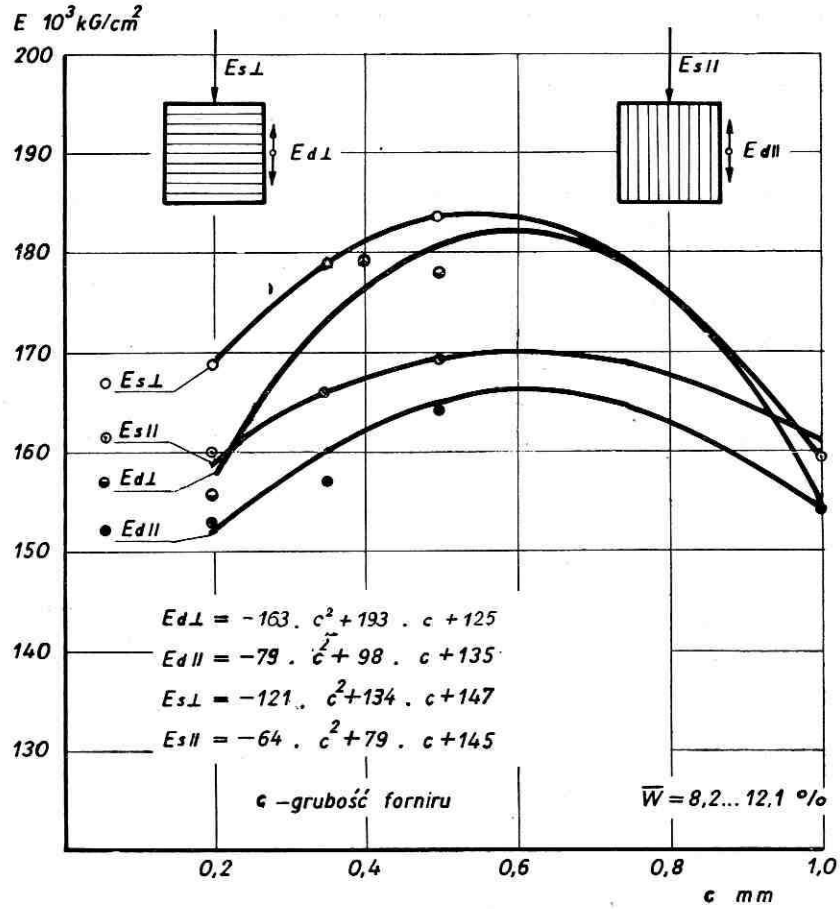
gdzie E — moduł sprężystości,

c — grubość forniru,

A_i — współczynniki regresji krzywoliniowej; pozostałe oznaczenia jak we wzorze (35).

Współczynniki A_i wyznaczono na podstawie wyników doświadczenia przy użyciu tzw. wielomianów ortogonalnych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy obliczono równania regresji poszczególnych modułów sprężystości drewna warstwowego od grubości forniru i wykreślono krzywe tych zależności, które przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Zależność modułów sprężystości (E) drewna warstwowego od grubości forniru (c) przy różnych metodach pomiaru; klej bez wypełniacza

Wyniki tej analizy są następujące:

1) zależność poszczególnych modułów sprężystości E od grubości forniru c okazała się istotna, przy czym równania wyrażające tę zależność okazały się równaniami drugiego stopnia;

2) w zbadanym przedziale grubości forniru $c = 0{,}20 \ldots 1{,}00$ mm krzywe zależności E od c wykazały następujące położenia maksimum wartości E:

dla $E_{s\|}$, $E_{d\|}$ i $E_{d\perp}$ — przy $c \approx 0{,}60$ mm,
dla $E_{s\perp}$ — przy $c \approx 0{,}55$ mm.

Na podstawie tych stwierdzeń można wysunąć następujące hipotezy:

a. Moduł sprężystości sklein jest prawdopodobnie większy od modułu sprężystości forniru; wskazuje na to spadek modułu sprężystości układu ze wzrostem grubości forniru, stwierdzony w przedziale $c \approx 0{,}60 \ldots 1{,}00$ mm. Spadek ten związany jest najprawdopodobniej z malejącą zawartością kleju w układzie, wobec bowiem stwierdzonego w badaniu mikrostrukturalnym braku pęknięć forniru nie ma podstaw do przypuszczenia, że moduł sprężystości forniru maleje ze wzrostem jego grubości.

b. Wzrost modułu sprężystości układu drewno — klej ze wzrostem grubości forniru w przedziale $c \approx 0{,}20 \ldots 0{,}60$ mm można przypisać zwiększaniu się modułu sprężystości forniru. W miarę powiększania grubości forniru maleje ujemny wpływ przecięcia włókien drewna na moduł sprężystości forniru. Można przypuszczać, że począwszy od wartości $c \approx 0{,}60$ mm moduł sprężystości forniru przybiera w przybliżeniu stałą wartość, a moduł sprężystości układu staje się średnią ważoną stałych już modułów sprężystości jego komponentów.

W celu sprawdzenia hipotezy sformułowanej w punkcie *b* przeprowadzono dodatkowe badanie modułu sprężystości forniru i jego wytrzymałości przy rozciąganiu wzdłuż włókien. Uzyskane wyniki, przedstawione na rys. 15, wykazały słuszność poprzednich przypuszczeń, tj. wzrost modułu sprężystości i wytrzymałości forniru ze wzrostem jego grubości w przedziale 0,20 ... 1,0 mm.

Współzależność statycznego i dynamicznego modułu sprężystości, określonych przy zginaniu równoległym i prostopadłym do warstw układu. Porównanie liczbowych wartości statycznych i dynamicznych modułów sprężystości, określonych przy zginaniu w kierunku równoległym i prostopadłym do warstw układu, przeprowadzono na podstawie doświadczeń wykonanych na drewnie warstwowym i litym (tab. 13 i 14). Porównanie to oparto na hipotezie zależności liniowej

$$E_{ijl} = E + d_i + s_l + (ds)_{il} + \varepsilon_{ijl} \tag{37}$$

gdzie $i = 1,2 \ldots k$ — liczba rodzajów zbadanego materiału,

$j = 1,2 \ldots n$ — liczba próbek dla każdego rodzaju materiału,

$l = 1,2 \ldots r$ — łączna liczba metod określania modułu sprężystości i kierunków zginania,

E_{ijl} — moduł sprężystości j-tej próbki, i-tego rodzaju materiału, określony l-tą metodą (statyczną lub dynamiczną przy zginaniu w danym kierunku),

E — rzeczywisty moduł sprężystości całego materiału,

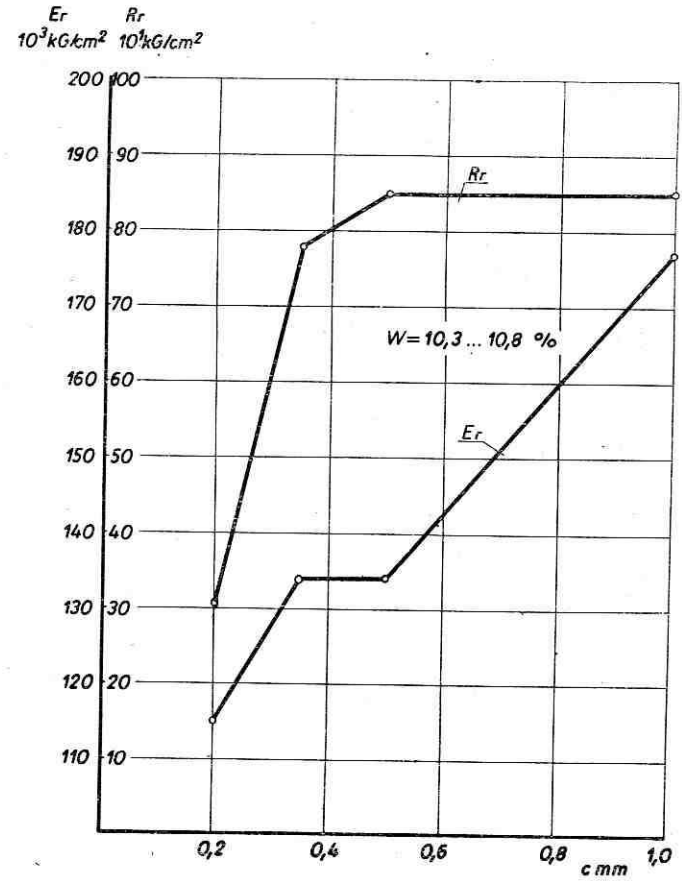
d_i — efekt wpływu i-tego rodzaju materiału,

s_l — efekt wpływu l-tej metody określania modułu sprężystości i kierunku zginania,

$(ds)_{il}$ — efekt współdziałania i-tego rodzaju materiału i l-tej metody oraz kierunku,

ε_{ijl} — błąd losowy.

Istotność różnic modułów sprężystości określonych poszczególnymi metodami zbadano testem F Snedecora, wyznaczając wartość F_{emp} dla $(r\text{-}1)$ i $kr\,(n\text{-}1)$ stopni swobody. Istotność współdziałania zbadano przy $(k\text{-}1)$ $(r\text{-}1)$ oraz $kr\,(n\text{-}1)$ stopni swobody.



Rys. 15. Zależność modułu sprężystości (E_r) i wytrzymałości na rozciąganie (R_r) forniru brzozowego od jego grubości (c)

W celu zbadania zależności między modułami sprężystości, określonymi według różnych metod dla różnych kierunków zginania, wyznaczono kolejno dla każdych dwóch metod i kierunków równanie regresji liniowej o postaci

$$\left(E_{l_1} - \bar{E}_{l_1}\right) = c\left(E_{l_2} - \bar{E}_{l_2}\right) \tag{38}$$

gdzie E_{l1} — moduł sprężystości określony pierwszą z porównywanych metod (lub w jednym z porównywanych kierunków),

E_{l2} — moduł sprężystości określony drugą z porównywanych metod (lub w drugim z porównywanych kierunków),

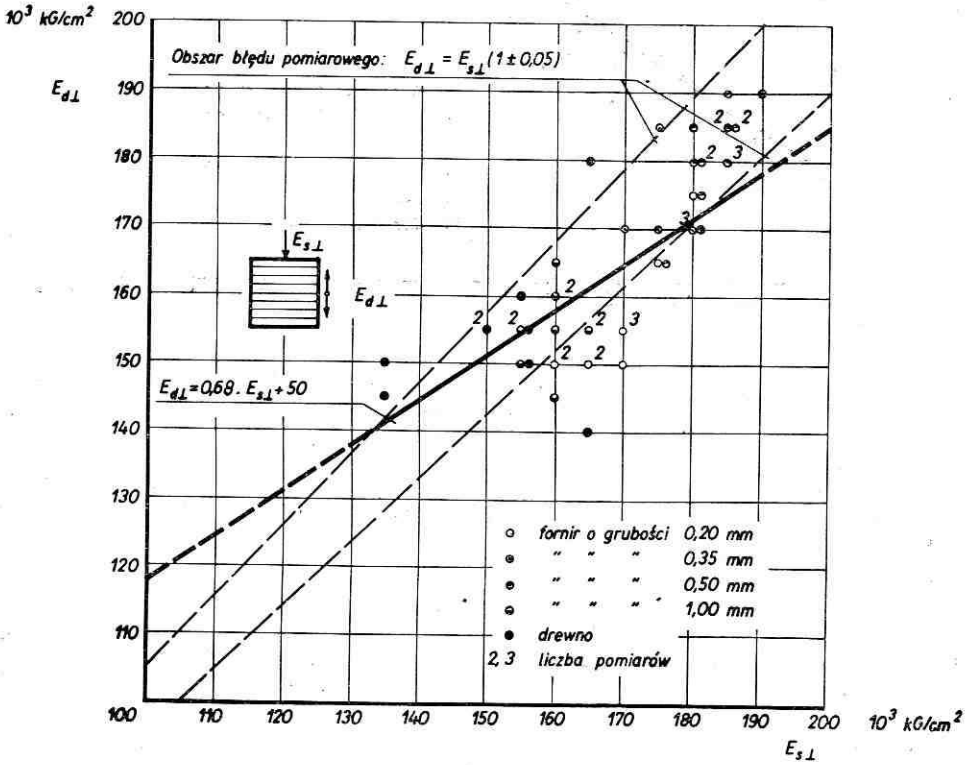
$\bar{E}_{l_1}$, $\bar{E}_{l_2}$ — średnie arytmetyczne modułów sprężystości określonych na całym materiale porównywanymi metodami (lub w porównywanych kierunkach),

c — współczynnik regresji, wyznaczony po wyeliminowaniu wpływu rodzaju materiału jako

$$c = \frac{\sum^{n} \sum^{k} \left(E_{ijl_1} - \bar{E}_{il_1}\right)\left(E_{ijl_2} - \bar{E}_{il_2}\right)}{\sum^{n} \sum^{k} \left(E_{ijl_2} - \bar{E}_{il_2}\right)} \tag{39}$$

gdzie E_{ijl_1} — moduł sprężystości j-tej próbki i-tego rodzaju materiału, określony pierwszą z porównywanych metod (lub w pierwszym kierunku),

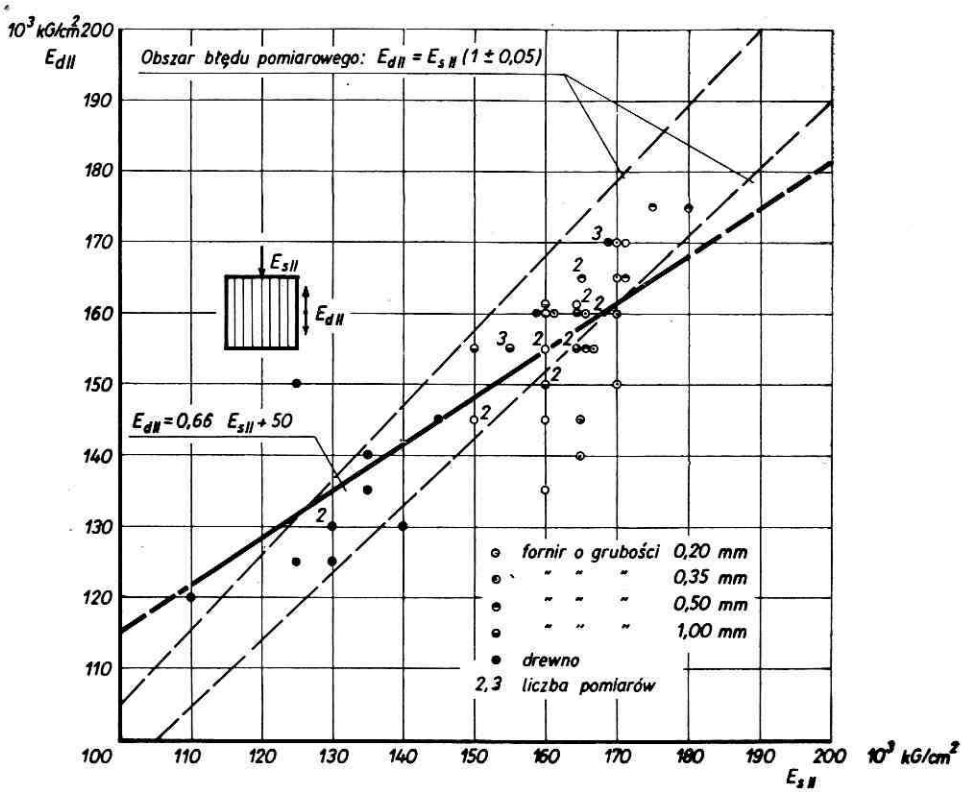
E_{ijl_2} — moduł sprężystości j-tej próbki i-tego rodzaju materiału, określony drugą z porównywanych metod (lub w drugim kierunku),



Rys. 16. Współzależność dynamicznego (E_d) i statycznego (E_s) modułu sprężystości przy zginaniu w kierunku prostopadłym do warstw drewna warstwowego; klej bez wypełniacza

$\overline{E}_{il_1}$ $\overline{E}_{il_2}$, — średnie arytmetyczne modułów sprężystości, określonych na i-tym rodzaju materiału porównywanymi metodami (lub w porównywanych kierunkach).

Istotność tej regresji sprawdzono wyznaczając wartość F_{emp} i porównując ją z wartością F Snedecora o liczbie stopni swobody l i (kn-k-1).



Rys. 17. Współzależność dynamicznego ($E_{d\|}$) i statycznego ($E_{s\|}$) modułu sprężystości przy zginaniu w kierunku równoległym do warstw drewna warstwowego; klej bez wypełniacza

Na podstawie obliczonych równań regresji wykreślono proste zależności modułu E_{l1} od modułu E_{l2}, które przedstawiono na rys. 16 do 19, określając jednocześnie obszar błędu pomiarowego.

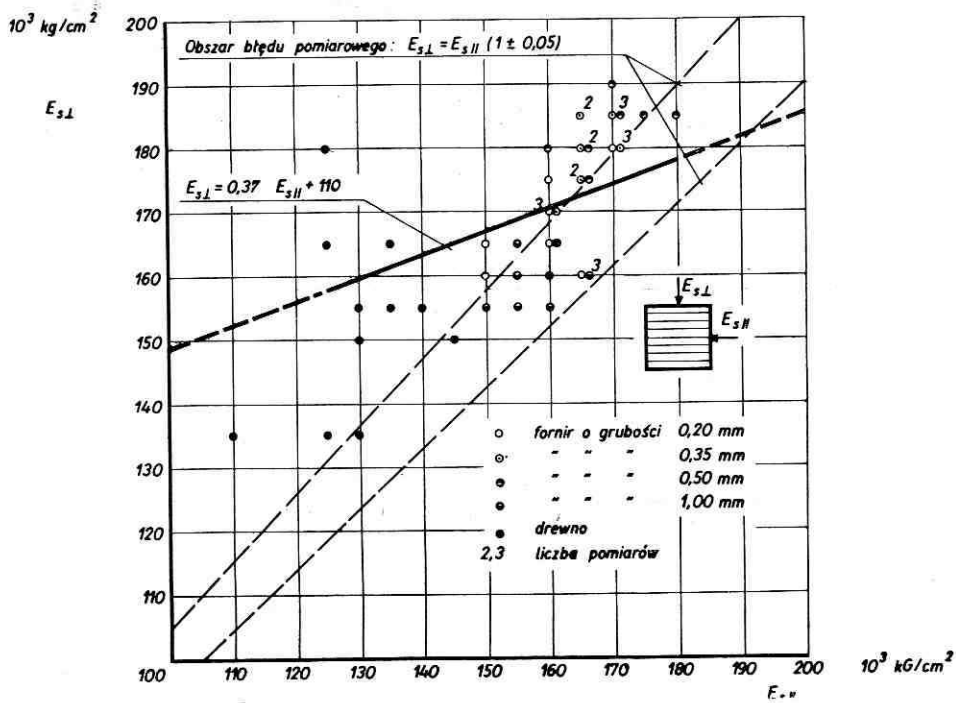
W wyniku analizy stwierdzono, co następuje.

1. Liczbowe wartości modułów sprężystości różnią się od siebie w zależności od kierunku zginania i metody określania, a wyznaczone współzależności, regresje) pomiędzy nimi są udowodnione.

2. Ponieważ prosta wyrażająca współzależność modułu statycznego i dynamicznego, określonych przy zginaniu w kierunku prostopadłym do warstw układu, leży prawie całkowicie w obszarze błędu pomiarowego (rys. 16, linia ciągła), można przyjąć, że przy wielkości błędu pomiaro-

wego $\delta E = \pm 5\%$ wartości liczbowe obu tych modułów są jednakowe. W pozostałych przypadkach (rys. 17, 18 i 19) proste współzależności porównywanych modułów sprężystości wykraczają poza obszar błędu pomiarowego.

3. W przedziale $(110 \ldots 150) \cdot 10^3$ kG/cm² wartości modułu statycznego są mniejsze, a w przedziale $(150 \ldots 190) \cdot 10^3$ kG/cm² — większe od wartości modułu dynamicznego (rys. 16 i 17).



Rys. 18. Współzależność statycznych modułów sprężystości przy zginaniu w kierunku równoległym ($E_{s\|}$) i prostopadłym ($E_{s\perp}$) do warstw drewna warstwowego; klej bez wypełniacza

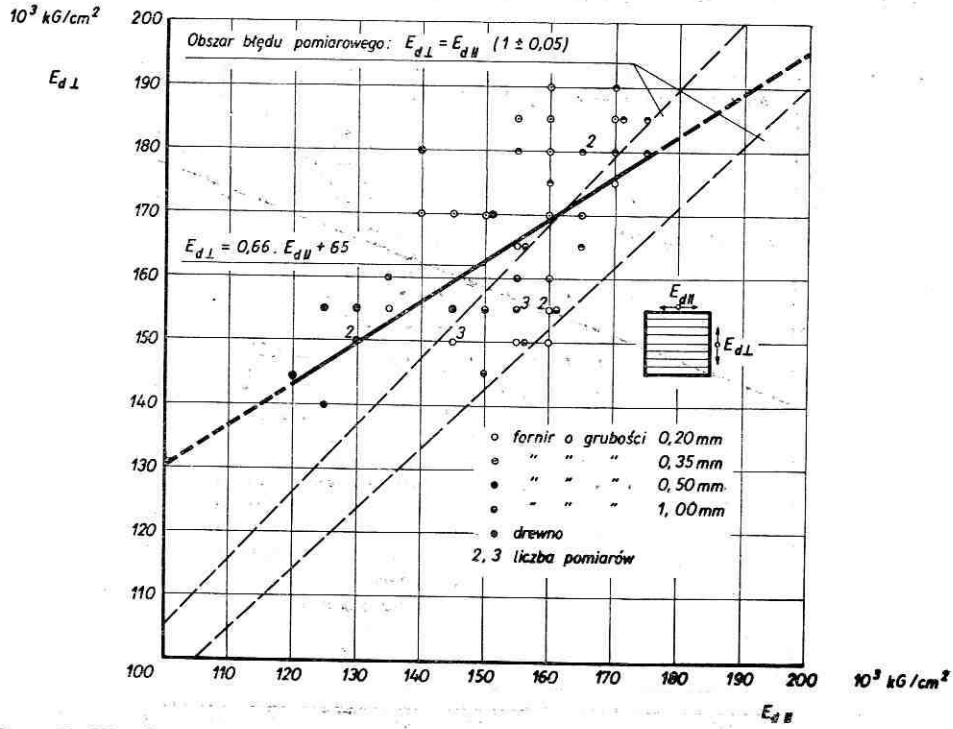
4. Liczbowe wartości modułu statycznego i dynamicznego, określone przy zginaniu w kierunku równoległym do warstw układu, są mniejsze od wartości tych samych modułów, określonych przy zginaniu w kierunku prostopadłym do warstw układu (rys. 18 i 19).

Na podstawie tych faktów można wysunąć następujące hipotezy:

a. Stwierdzenie 3 można najbardziej prawdopodobnie wytłumaczyć zróżnicowanym wpływem naprężeń stycznych na moduł statyczny i dynamiczny. Przypuszczalnie ze wzrostem modułu sprężystości (a więc i ze wzrostem *sztywności próbki) wzrasta wpływ cyklicznych naprężeń stycznych* na wartość modułu dynamicznego E_d, natomiast wpływ jednorazowego naprężenia stycznego na wartość modułu statycznego E_s maleje.

Można przypuszczać, że w obszarze otaczającym punkt o współrzędnych $E_d = E_s \approx 150 \cdot 10^3$ kG/cm² wpływ ten jest jednakowy.

b. Liczbowa wartość modułu sprężystości sklein jest prawdopodobnie większa od wartości modułu forniru. Hipoteza ta wynika z interpretacji stwierdzenia 4 według wzorów (19) i (23), gdyż stosownie do nich wpływ modułu sprężystości sklein na moduł sprężystości układu powinien być



Rys. 19. Współzależność dynamicznych modułów sprężystości przy zginaniu w kierunku równoległym ($E_{d\parallel}$) i prostopadłym ($E_{d\perp}$) do warstw drewna warstwowego; klej bez wypełniacza

silniejszy przy zginaniu w kierunku prostopadłym do warstw aniżeli przy zginaniu w kierunku do nich równoległym.

Na podstawie zależności stwierdzonych w badaniach metodycznych postanowiono w badaniach zasadniczych określać moduł sprężystości na drewnie warstwowym z forniru o grubości 0,35 mm, stosując metodę dynamiczną przy drganiach giętnych w kierunku prostopadłym do warstw układu (moduł $E_{d\perp}$). Pozwoli to uzyskać wyniki liczbowe najsilniej odzwierciedlające wpływ sklein na sprężystość układu; wyniki te będą jednocześnie całkowicie charakteryzowały wartości statycznego modułu $E_{s\perp}$. Dodatkową korzyść dynamicznej metody określania modułu sprężystości stanowi mniejsza pracochłonność pomiarów.

VI. BADANIA ZASADNICZE

1. OPIS I WYNIKI BADAŃ

Stosownie do wyników badań metodycznych, moduły sprężystości drewna warstwowego — sklejonego z fornirów o grubości nominalnej 0,35 mm klejem mocznikowym o zróżnicowanej zawartości mąki żytniej lub ziemniaczanej — określano metodą dynamiczną przy drganiach giętnych w kierunku prostopadłym do warstw. Związane z określaniem modułów sprężystości pomiary ciężaru i wymiarów próbek oraz częstotliwości drgań bliskorezonansowych powtórzono 5-krotnie, w odstępach 1, 2, 3, 12 oraz 25 tygodni od sklejenia materiału, określając jednocześnie bieżące wartości jego ciężaru właściwego i wilgotności. Metodyka tych pomiarów była zgodna z zastosowaną w badaniach metodycznych. W celu uzyskania poziomu odniesienia dla otrzymanych wyników pomierzono te same wielkości dla próbek brzozowego drewna litego, które zostało użyte do wykonania forniru. Liczba próbek jednakowego materiału wynosiła 10 sztuk. Liczba ta została założona w doświadczeniach metodycznych i sprawdzona na podstawie stwierdzonej wartości współczynnika zmienności modułu sprężystości oraz założonego poziomu istotności wyników.

W doświadczeniu metodycznym stwierdzono znaczne zmiany modułu sprężystości, a zwłaszcza modułu E_d, które miały w przybliżeniu jednakowy charakter dla wszystkich zbadanych rodzajów drewna warstwowego, oraz — co jest specjalnie niespodziewane — dla drewna litego (rys. 13). Najbardziej istotne wydaje się stwierdzenie, iż pomimo stałego spadku wilgotności materiału z upływem czasu jego składowania moduł sprężystości wzrastał tylko do dwunastego tygodnia, po czym wartość jego zmniejszyła się. Wskazuje to, iż podczas składowania materiału nastąpiły zmiany strukturalne, obniżające moduł sprężystości; zmiany te można z dużym prawdopodobieństwem przypisać tzw. starzeniu się materiału. Podobne zjawisko w odniesieniu do wytrzymałości na ścinanie skleiny kleju mocznikowego stwierdzili E. Plath (33) oraz R. F. Blomquist i W. Z. Olson (7), a także A. Korzeniowski i K. Piłatówna (24). Ci ostatni zbadali wytrzymałość skleiny z mas klejowych, zastosowanych w niniejszej pracy (tab. 18). Na tych podstawach można było przypuszczać, że również w przypadku modułu sprężystości drewna warstwowego klejonego tymi masami wystąpią zmiany w czasie, których charakter będzie zbliżony do stwierdzonych zmian wytrzymałości na ścinanie. Nie było natomiast podstaw do przypuszczenia, iż zmiany modułu sprężystości drewna litego w czasie składowania będą prawie równie znaczne, jak zmiany modułu sprężystości drewna warstwowego.

Z powyższych względów w badaniu zasadniczym specjalną uwagę poświęcono m. in. również temu zagadnieniu; miało to na celu stwierdzenie ewentualnego wpływu rodzaju i zawartości wypełniacza na zmiany modułu

Tabela 18

Wytrzymałość na ścinanie w kG/cm² sklein kleju mocznikowego MC-60 w drewnie brzozowym

Czas składowania po sklejeniu tygodni	Rodzaje mas klejowych								
	0	Z-15	Z-30	Z-45	Z-60	K-15	K-30	K-45	K-60
1	36,7	50,6	44,0	40,7	47,0	30,1	34,3	32,3	20,6
2	48,9	54,8	54,5	55,8	55,1	52,3	44,6	39,9	24,5
3	48,2	51,5	54,7	49,8	47,8	54,1	48,3	43,5	29,6
12	48,0	51,3	52,9	48,4	41,2	44,0	43,2	40,9	25,5
25	41,8	61,8	58,1	56,6	53,8	57,3	53,4	53,4	45,4

sprężystości drewna warstwowego w czasie składowania po sklejeniu. Analiza wyników nie wykazała dla niektórych rodzajów materiału istotności regresji modułu sprężystości od czasu składowania, trwającego 25 tygodni od daty sklejenia. W związku z tym wykonano dodatkowe (szóste z kolei) pomiary po czasie składowania przedłużonym do 88 tygodni od sklejenia materiału.

Mierzone wielkości i liczbę wykonanych pomiarów oraz ich dokładność podano w tabeli 20. Średnie arytmetyczne wartości modułów sprężystości, wilgotności oraz ciężaru właściwego przedstawiono w tabelach 21, 22 i 23.

W celu skontrolowania jakości sklejenia materiału doświadczalnego zbadano dodatkowo jego wytrzymałość na zginanie i udarność przy sile działającej prostopadle do warstw układu. Wykonano po 5 oznaczeń dla jednego rodzaju materiału. Wyniki badania podano w tabeli 19 i przed-

Tabela 19

Mechaniczne właściwości materiału doświadczalnego

Symbol materiału	Wytrzymałość na zginanie $R_{g\perp}$ kG/cm²	Udarność $U_{\perp}$ kGm/cm²	Wilgotność W %	Moduł sprężystości $E_{d\perp}$ 10³ kG/cm²	Wilgotność W %
	średnie z 5 oznaczeń			średnie z 10 oznaczeń	
0—0,20	1450	0,42	18,6	160,0	17,4
0—0,35	1570	0,62	18,6	194,5	16,9
0—0,50	1530	0,48	18,1	184,0	14,1
0—1,00	1260	0,51	17,4	172,0	12,7
Drewno lite	1000	0,80	16,3	192,5	16,1
Z-15	1310	0,52	19,2	188,0	16,2
Z-30	1350	0,57	18,6	186,0	16,5
Z-45	1290	0,60	19,0	182,0	15,8
Z-60	1220	0,47	17,9	169,0	16,0
K-15	1260	0,48	19,3	177,5	15,9
K-30	1370	0,59	20,6	175,0	16,2
K-45	1310	0,48	20,2	174,5	15,7
K-60	1060	0,49	18,9	147,0	15,6

Tabela 20

Charakterystyka pomiarów w doświadczeniu zasadniczym

Wielkość obliczana	L. p.	Wielkość mierzona	Symbol	Miano	Wartość liczbowa	Dokładność pomiaru	Liczba pomiarów n
Dynamiczny	1	swobodna długość próbki	l_o	cm	$50 \pm 0{,}05$	0,05	490
moduł	2	wysokość poprzecznego przekroju próbki	h	cm	$2 \pm 0{,}1$	0,005	1470
sprężystości	3	częstotliwość drgań bliskorezonansowych	f	1/sek.	zmienna	0,5	490
E_{d1}	4	dynamiczne naprężenie zginające	σ_d	kG/cm²	$\leqslant 13$	—	1
Ciężar	5	ciężar bieżący próbki	G	g	zmienna	0,01	490
właściwy	6	długość całkowita próbki	l	cm	$59{,}7 \pm 0{,}05$	0,05	490
γ	7	szerokość poprzecznego przekroju próbki	b	cm	$2 \pm 0{,}1$	0,005	1470
	8	wysokość poprzecznego przekroju próbki	h	cm	$2 \pm 0{,}1$	0,005	—[1]
Wilgotność	9	ciężar próbki wilgotnej	G_1	g	zmienna	0,001	180
początkowa W	10	ciężar próbki suchej	G_2	g	zmienna	0,001	180
						Razem	5261

[1] — wykorzystano wyniki pomiarów z pozycji 2.

Tabela 21

Średnie wartości dynamicznego modułu sprężystości w kolejnych terminach badania

Rodzaj materiału	Rodzaj wypełniacza kleju	Symbol serii	Czas od sklejenia do określenia modułu sprężystości τ — tygodnie					
			1	2	3	12	25	88
			dynamiczny moduł sprężystości $E_{d\perp}$ 10^3 kG/cm² (średnie z 10 pomiarów)					
Drewno lite	—	drewno — — 0,35	146,5	145,5	148,0	192,5	153,5	136,5
Drewno warstwowe	bez wypełniacza	0—0,35	153,5	136,0	155,0	194,5	177,5	177,0
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-15	138,5	133,5	139,5	188,0	168,0	—
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-30	137,0	132,5	140,5	186,0	167,0	—
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-45	114,5	120,5	130,5	182,0	160,5	—
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-60	121,5	119,0	125,0	169,0	152,5	149,0
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-15	124,0	120,0	131,0	177,5	156,5	—
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-30	115,0	118,5	128,5	175,0	154,0	—
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-45	116,0	122,0	128,5	174,5	157,0	—
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-60	99,0	105,5	111,0	147,0	135,5	129,5

Tabela 22

Średnie wartości wilgotności w kolejnych terminach badania

Rodzaj materiału	Rodzaj wypełniacza kleju	Symbol serii	Czas od sklejenia do określenia wilgotności τ — tygodnie					
			1	2	3	12	25	88
			wilgotność w % (średnie z 10 pomiarów)					
Drewno lite	—	drewno — — 0,35	30,3	27,3	26,0	16,1	11,6	7,2
Drewno warstwowe	bez wypełniacza	0—0,35	27,3	25,5	23,6	16,9	12,1	9,1
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-15	28,3	26,9	25,5	16,2	11,4	—
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-30	29,7	27,7	26,4	16,5	11,6	—
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-45	30,7	29,4	28,2	15,8	11,5	—
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-60	30,5	29,3	27,9	16,0	10,9	7,7
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-15	27,7	27,0	25,0	15,9	11,5	—
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-30	29,4	28,9	25,8	16,2	11,8	—
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-45	29,6	28,1	25,7	15,7	10,8	—
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-60	27,2	26,3	24,9	15,6	11,3	7,1

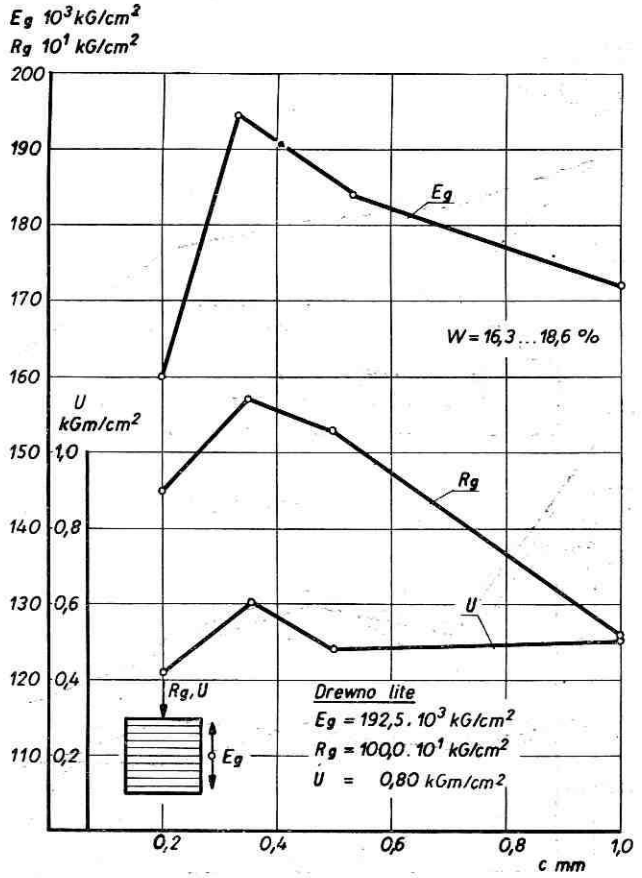
Tabela 23

Średnie wartości ciężaru właściwego w kolejnych terminach badania

Rodzaj materiału	Rodzaj wypełniacza kleju	Symbol serii	Czas od sklejenia do określenia ciężaru właściwego τ — tygodnie					
			1	2	3	12	25	88
			ciężar właściwy γ g/cm³ (średnie z 10 pomiarów)					
Drewno lite	—	drewno — —0,35	0,68	0,68	0,67	0,66	0,64	0,65
Drewno warstwowe	bez wypełniacza	0—0,35	1,09	1,07	1,09	1,08	1,08	1,10
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-15	1,03	1,02	1,03	1,02	1,01	—
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-30	0,99	0,97	0,97	0,96	0,96	—
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-45	1,00	0,98	0,99	0,97	0,97	—
Drewno warstwowe	mąka żytnia	Z-60	1,01	0,99	0,99	0,96	0,97	0,97
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-15	1,03	1,01	1,02	1,02	1,02	—
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-30	1,05	1,02	1,03	1,02	1,02	—
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-45	0,99	0,97	0,97	0,96	0,97	—
Drewno warstwowe	mąka ziemniaczana	K-60	0,94	0,92	0,93	0,91	0,91	0,91

stawiono graficznie na rys. 20 i 21, wprowadzając dodatkowo wartości dynamicznego modułu sprężystości i wilgotności, co umożliwia bezpośrednią konfrontację wszystkich zbadanych właściwości materiału.

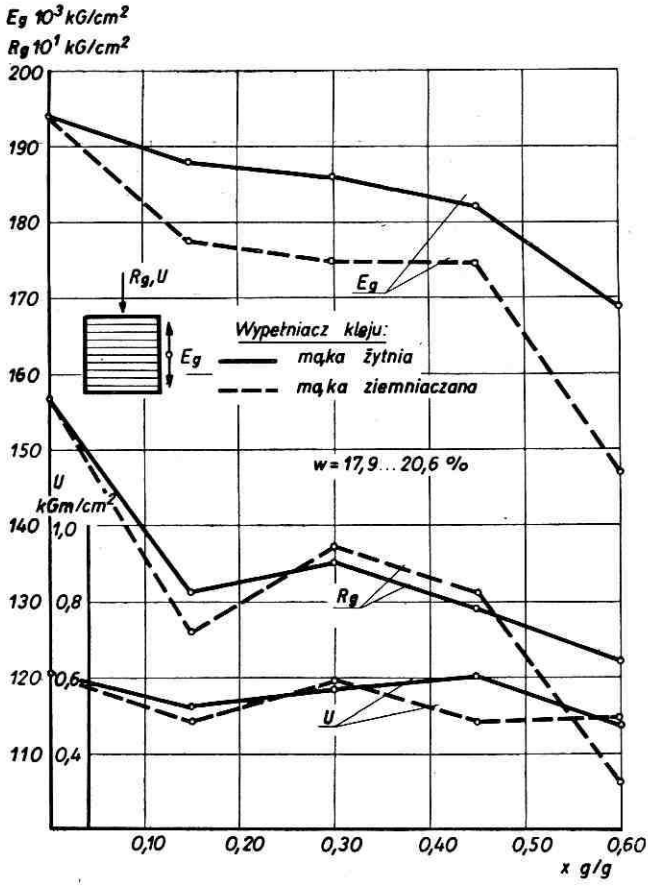
Wyniki tych badań wykazują, że sklejenie materiału doświadczalnego było wykonane właściwie, a materiał nie ujawniał istotnych wad sklejenia, obniżających jego wytrzymałość na zginanie, która we wszystkich przy-



Rys. 20. Zależność modułu sprężystości (E_g), wytrzymałości na zginanie (R_g) i udarności (U) drewna warstwowego od grubości forniru (c); klej bez wypełniacza

padkach okazała się większa od wytrzymałości drewna litego. Mniejszą udarność drewna warstwowego aniżeli drewna litego należy tłumaczyć kruchością sklein kleju mocznikowego. Charakterystyczna jest poza tym współbieżność wartości wytrzymałości na zginanie i giętnego modułu sprężystości, widoczna na rys. 20 i 21, która wskazuje na znaczne prawdopodobieństwo skorelowania tych dwu właściwości ze sobą.

Zastosowanie forniru o jednakowej grubości wyeliminowało jego wpływ na moduł sprężystości układu drewno — klej, określony w badaniach zasadniczych. W związku z tym różnice w liczbowej wartości tego modułu, stwierdzone dla poszczególnych rodzajów materiału, można uznać za spowodowane odmienną sprężystością poszczególnych utwardzonych mas klejowych. Tak więc uzyskane wyniki modułu sprężystości układu drewno — klej obrazują pośrednio moduł sprężystości sklein.



Rys. 21. Zależność modułu sprężystości (E_g), wytrzymałości na zginanie (R_g) i udarności (U) drewna warstwowego od zawartości (x) wypełniacza w kleju

2. ANALIZA WYNIKÓW

Wpływ rodzaju i zawartości wypełniacza kleju na dynamiczny moduł sprężystości układu. Analizę zależności modułu sprężystości układu drewno — klej od rodzaju i za-

wartości wypełniacza w kleju przeprowadzono na podstawie wyników doświadczenia podanych w tabeli 21, stosując uprzednio opisaną metodę analizy. Zanalizowano oddzielnie wpływ zawartości mąki żytniej oraz wpływ zawartości mąki ziemniaczanej na moduł sprężystości w każdym terminie jego określania. Następnie zanalizowano wpływ zawartości każdego z wypełniaczy łącznie dla pięciu powtórzeń określania modułu sprężystości w okresie 25 tygodni od sklejenia materiału.

Różnice wartości modułu $E_{d\perp}$ materiału sklejonego klejem o różnej zawartości x poszczególnych wypełniaczy okazały się udowodnione (istotne) dla wszystkich zanalizowanych przypadków. W związku z tym wyznaczono równania regresji $E_{d\perp}$ od x i wykreślono krzywe regresji, przedstawione na rys. 22, 23 i 24.

W wyniku dokonanej analizy stwierdzono, co następuje.

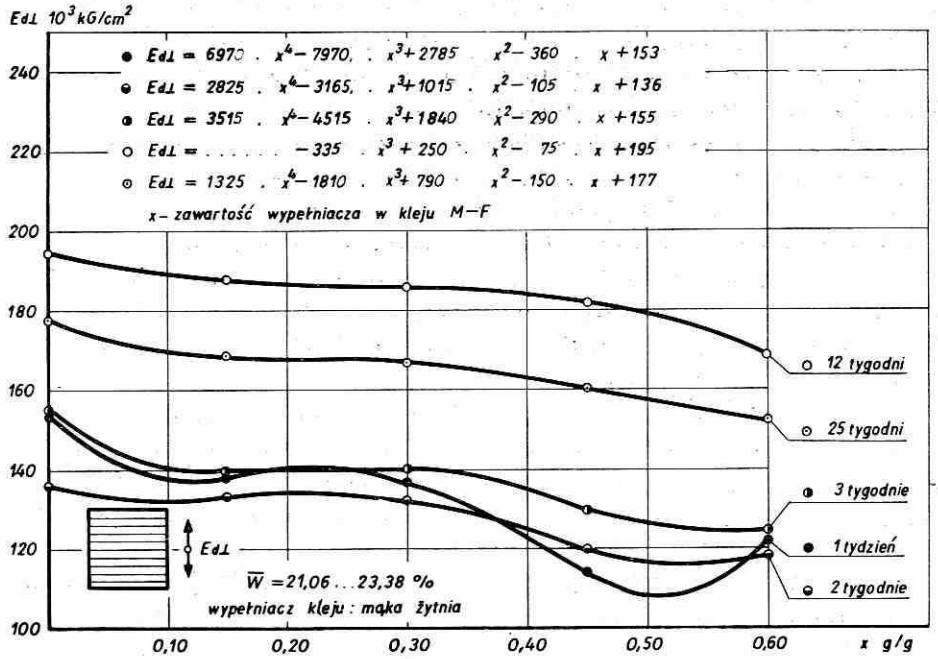
1. Ze wzrostem zawartości wypełniacza skrobiowego w kleju mocznikowym moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej zmniejsza się, przy czym spadek modułu sprężystości nie jest wprostproporcjonalny od zawartości wypełniacza (rys. 24).

2. Wpływ zawartości wypełniaczy skrobiowych w kleju mocznikowym na moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej zależy od rodzaju wypełniacza; przy takiej samej zawartości mąka ziemniaczana bardziej obniża moduł sprężystości układu aniżeli mąka żytnia. Wzrost zawartości mąki ziemniaczanej w przedziale 15 ... 45% ciężaru kleju nie powoduje istotnej zmiany modułu sprężystości (rys. 24).

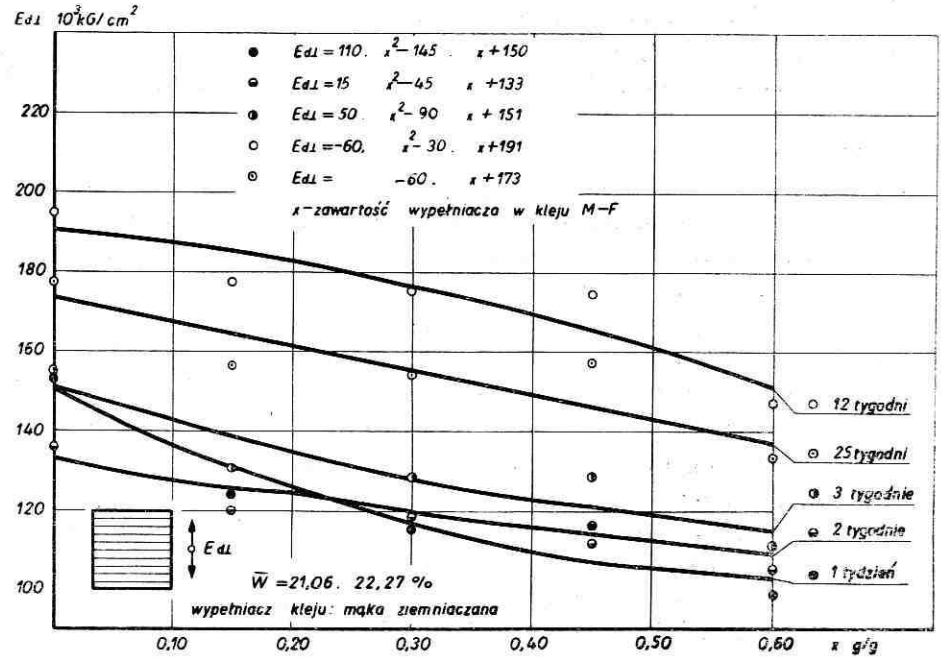
3. W ciągu pierwszych 12 tygodni po sklejeniu materiału moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej mocznikowy stopniowo wzrasta, następnie zaś pomiędzy 12 a 25 tygodniem wyraźnie maleje (rys. 22 i 23).

4. Krzywe zależności modułu sprężystości układu drewno — klej od zawartości wypełniacza skrobiowego (rys. 22 i 23) wykazują pewne podobieństwo z wykresem, wyrażającym zależność współczynnika kurczliwości utwardzonej masy klejowej od zawartości wypełniacza (rys. 9). Wydaje się to potwierdzać możliwość zastosowania współczynnika kurczliwości utwardzonej masy klejowej jako pośredniego wskaźnika mechanicznych właściwości (sprężystości lub wytrzymałości) sklein, na co zwrócił uwagę H. Klemm (21).

Wpływ wilgotności i czasu składowania na dynamiczny moduł sprężystości układu. Analizę zależności modułu sprężystości drewna warstwowego — sklejonego klejem mocznikowym o zróżnicowanej zawartości mąki żytniej lub ziemniaczanej — od wilgotności i czasu składowania materiału przeprowadzono na podstawie wyników doświadczeń podanych w tabelach 21 i 22, stosując metodę analizy opisaną poprzednio. Wpływ wilgotności i czasu składowania zanalizowano dla każdego rodzaju wypełniacza i każdej jego zawartości na podstawie 5-krotnego powtórzenia badania w ciągu 25 tygodni od

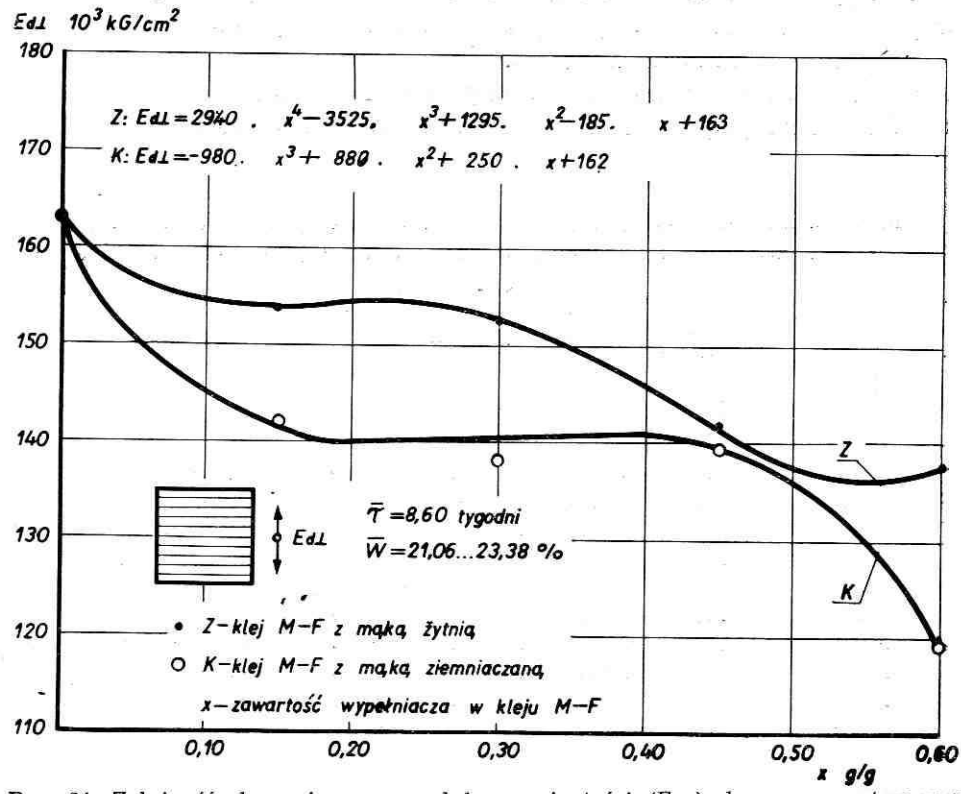


Rys. 22. Zależność dynamicznego modułu sprężystości (E_{d1}) drewna warstwowego od zawartości (x) mąki żytniej w kleju; okres 25 tygodni od sklejenia



Rys. 23. Zależność dynamicznego modułu sprężystości (E_{d1}) drewna warstwowego od zawartości (x) mąki ziemniaczanej w kleju; okres 25 tygodni od sklejenia

sklejenia drewna warstwowego; porównawczo przeprowadzono taką samą analizę dla drewna litego. W trakcie analizy testowano — po wyeliminowaniu wpływu drugiego czynnika — oddzielnie istotność regresji modułu sprężystości od wilgotności i od czasu składowania oraz od obu tych wielkości łącznie.



Rys. 24. Zależność dynamicznego modułu sprężystości ($E_{d\perp}$) drewna warstwowego od zawartości (x) i rodzaju wypełniacza w kleju; wartości średnie z okresu 25 tygodni od sklejenia

Zależność modułu sprężystości od wilgotności oraz jego zależność od wilgotności i czasu łącznie okazały się udowodnione we wszystkich zbadanych przypadkach; dla niektórych rodzajów materiału nie stwierdzono natomiast istotności regresji modułu sprężystości od czasu składowania. W tych przypadkach przeprowadzono szóste z kolei badanie po czasie składowania 88 tygodni od sklejenia materiału, po czym poddano analizie wyniki z sześciu powtórzeń; w efekcie istotność zależności modułu sprężystości od czasu składowania okazała się udowodniona dla wszystkich rodzajów materiału. Wyznaczone równania regresji podano w tabelach 24 i 25.

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, co następuje.

1. Moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej mocznikowy

oraz moduł sprężystości drewna litego maleją wprostproporcjonalnie do wzrostu wilgotności oraz do upływu czasu składowania.

2. Ze wzrostem wilgotności oraz z upływem czasu składowania moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej mocznikowy (o zawartości wypełniacza skrobiowego równej 0...45% ciężaru kleju) maleje w przybliżeniu tak samo, jak moduł sprężystości drewna litego, składowanego w tych samych warunkach.

Cząstkowy wpływ wilgotności na dynamiczny moduł sprężystości układu. W trakcie składowania mate-

Tabela 24

Regresja modułu sprężystości $E_{d\perp}$ od wilgotności W i czasu składowania τ; analiza na podstawie 5 powtórzeń w ciągu 25 tygodni od sklejenia materiału ($\bar{\tau}$ = 8,60 tygodni)

Symbol serii	Średnie arytmetyczne		Istotność regresji od			Równanie regresji
	$\bar{E}_{d\perp}$ 10^3 kG/cm²	$\bar{W}$ %	W	τ	W i τ	
Drewno — 0,35	157,2	22,27	+	+	+	$E_{d\perp} = 260 - 3{,}77\,W - 2{,}20\,\tau$
0—0,35	163,3	21,06	+	—	+	$E_{d\perp} = 296 - 5{,}56\,W - 1{,}85\,\tau$
Z-15	153,6	21,63	+	+	+	$E_{d\perp} = 346 - 7{,}46\,W - 3{,}65\,\tau$
Z-30	152,6	23,38	+	+	+	$E_{d\perp} = 321 - 6{,}33\,W - 3{,}15\,\tau$
Z-45	141,6	23,10	+	+	+	$E_{d\perp} = 338 - 7{,}07\,W - 3{,}80\,\tau$
Z-60	137,4	22,92	+	—	+	$E_{d\perp} = 201 - 2{,}57\,W - 0{,}55\,\tau$
K-15	141,8	21,33	+	+	+	$E_{d\perp} = 328 - 7{,}37\,W - 3{,}35\,\tau$
K-30	138,2	22,20	+	+	+	$E_{d\perp} = 340 - 7{,}61\,W - 3{,}80\,\tau$
K-45	139,6	21,97	+	+	+	$E_{d\perp} = 317 - 6{,}75\,W - 3{,}40\,\tau$
K-60	119,2	21,07	+	—	+	$E_{d\perp} = 138 - 1{,}23\,W + 0{,}80\,\tau$

(+) — regresja udowodniona
(—) — regresja nieudowodniona

Tabela 25

Regresja modułu sprężystości $E_{d\perp}$ od wilgotności W i czasu składowania τ; analiza na podstawie 6 powtórzeń w ciągu 88 tygodni od sklejenia materiału ($\bar{\tau}$ = 21,83 tygodni)

Symbol serii	Średnie arytmetyczne		Istotność regresji od			Równanie regresji
	$\bar{E}_{d\perp}$ 10^3 kG/cm²	$\bar{W}$ %	W	τ	W i τ	
Drewno — 0,35	153,8	19,77	+	+	+	$E_{d\perp} = 212 - 2{,}18\,W - 0{,}70\,\tau$
0—0,35	165,6	19,07	+	+	+	$E_{d\perp} = 236 - 3{,}33\,W - 0{,}34\,\tau$
Z-60	136,6	20,32	+	+	+	$E_{d\perp} = 202 - 2{,}59\,W - 0{,}57\,\tau$
K-60	120,9	18,74	+	+	+	$E_{d\perp} = 169 - 2{,}30\,W - 0{,}25\,\tau$

(+) — regresja udowodniona

riału jego wilgotność W malała z upływem czasu τ (rys. 7 oraz tab. 22); wobec jednoczesnego wpływu obu tych wielkości na moduł sprężystości $E_{d\perp}$ równania regresji podane w tabelach 24 i 25 nie dają możności wykreślenia prostych regresji, które przedstawiałyby graficznie cząstkowy wpływ wilgotności W na moduł $E_{d\perp}$ .W związku z tym w wyznaczonych równaniach regresji $E_{d\perp}$ od W i τ ustalono wartość czasu na poziomie średniej arytmetycznej τ, podanej w tabelach 24 i 25. W ten sposób wyznaczono równanie regresji cząstkowej $E_{d\perp}$ od W; równania te nie obrazują zależności ogólnej, gdyż odnoszą się tylko do konkretnych wartości τ. Równania i proste regresje $E_{d\perp}$ od W przedstawiono na rysunkach 25, 26 i 27.

Co do wpływu wilgotności na moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej mocznikowy oraz na moduł sprężystości litego drewna brzozowego można sformułować następujące stwierdzenia.

1. Ze wzrostem wilgotności w przedziale 7 ... 12 ... 30% moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej oraz moduł sprężystości drewna litego maleją wprostproporcjonalnie do wilgotności (rys. 25, 26 i 27).

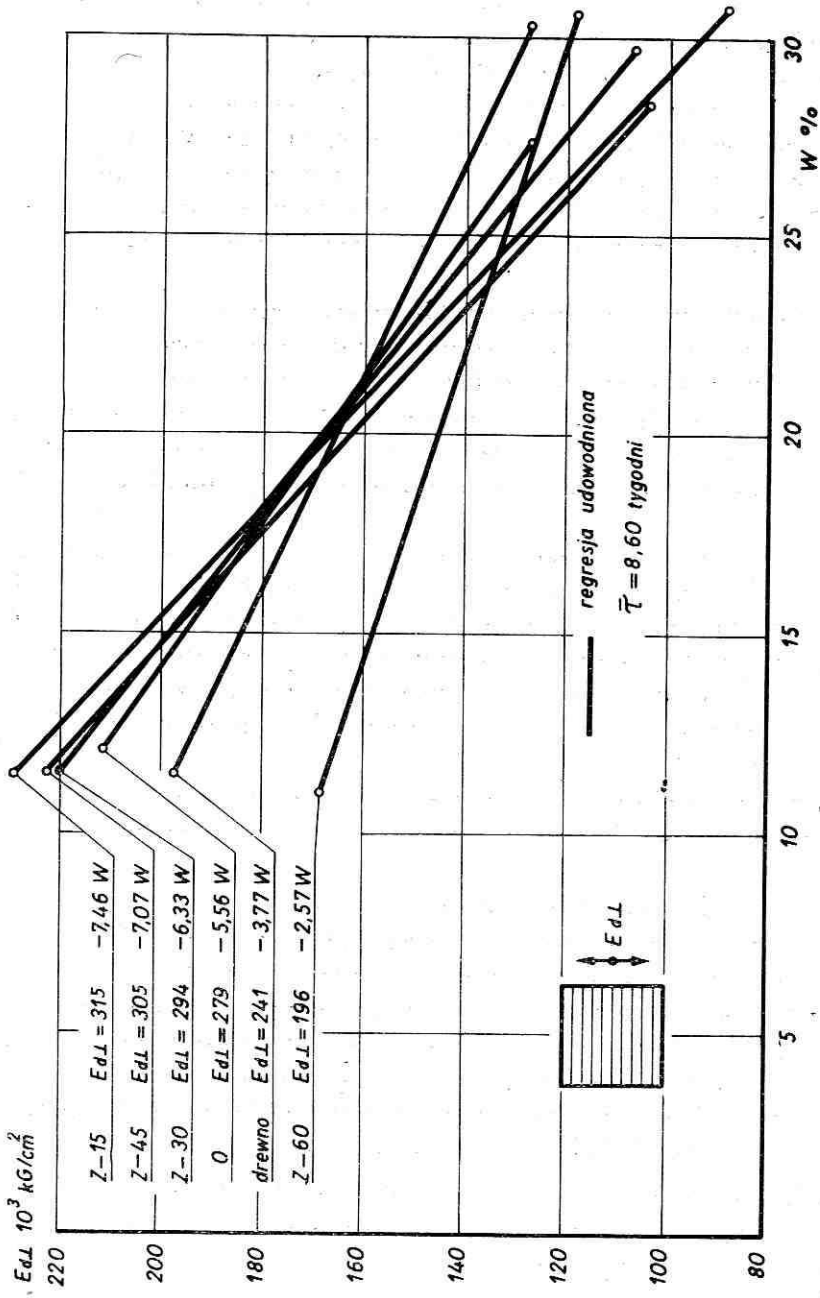
2. Ze wzrostem zawartości wypełniacza skrobiowego w kleju (w przedziale 0 ... 60% ciężaru kleju) maleje wpływ wilgotności na moduł sprężystości układu drewno — klej. Przy zawartości wypełniacza równej 60% wpływ ten staje się mniejszy aniżeli dla drewna litego (rys. 25 i 26).

3. Rodzaj wypełniacza kleju (mąka żytnia lub mąka ziemniaczana) nie wpływa w istotny sposób na zależność modułu sprężystości układu od wilgotności (rys. 27).

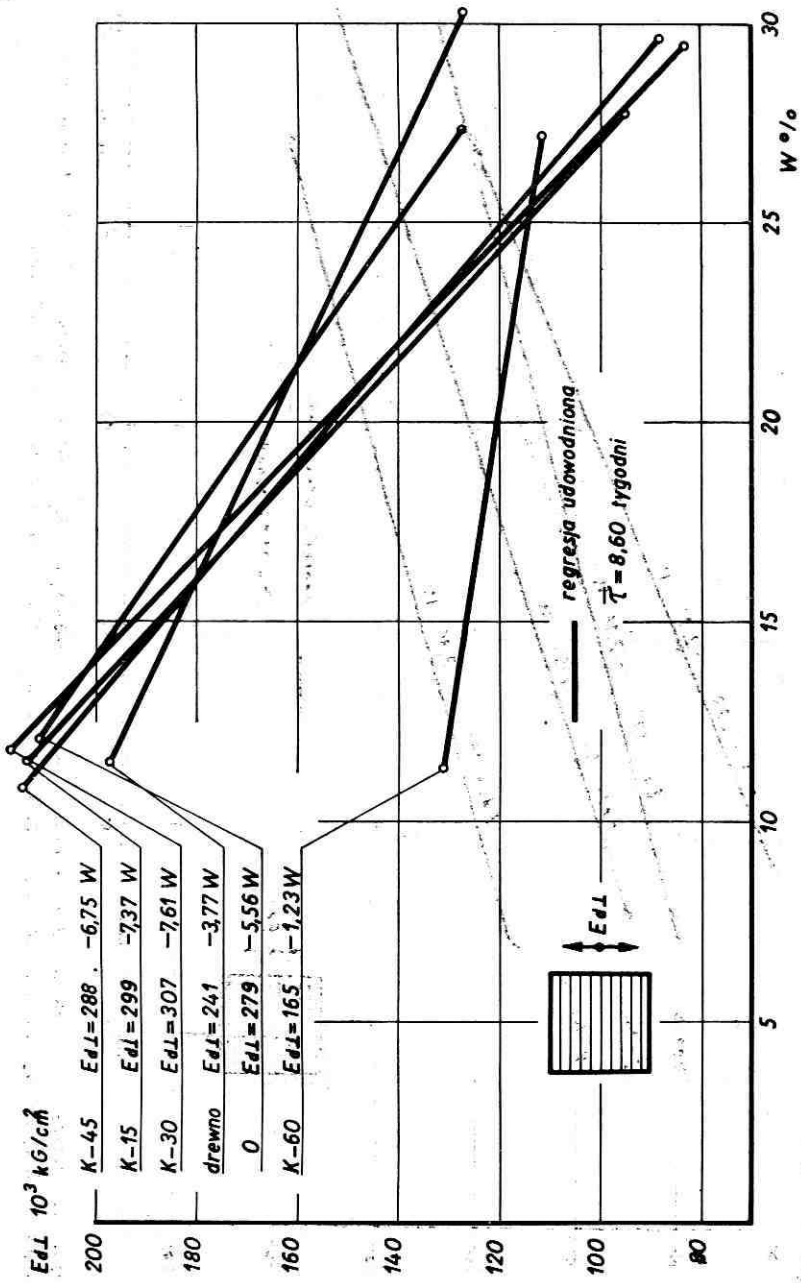
Stwierdzenia te nie mają charakteru generalnego, lecz odnoszą się wyłącznie do zbadanego materiału, który wysychał w poprzednio opisanych warunkach.

Cząstkowy wpływ czasu składowania na dynamiczny moduł sprężystości układu. Równania regresji cząstkowej modułu sprężystości $E_{d\perp}$ od czasu τ składowania materiału doświadczalnego wyznaczono w sposób analogiczny do wyznaczenia równań regresji cząstkowej modułu sprężystości od wilgotności. W ogólnych równaniach regresji modułu sprężystości od wilgotności i czasu składowania ustalono wartość wilgotności na poziomie średniej arytmetycznej $\overline{W}$, podanej w tabelach 24 i 25. Wyznaczone tą metodą równania cząstkowej regresji $E_{d\perp}$ od τ są więc słuszne jedynie dla określonej średniej wilgotności $\overline{W}$ i nie można ich uogólniać. Równania te oraz proste regresji podano na rys. 28, 29 i 30.

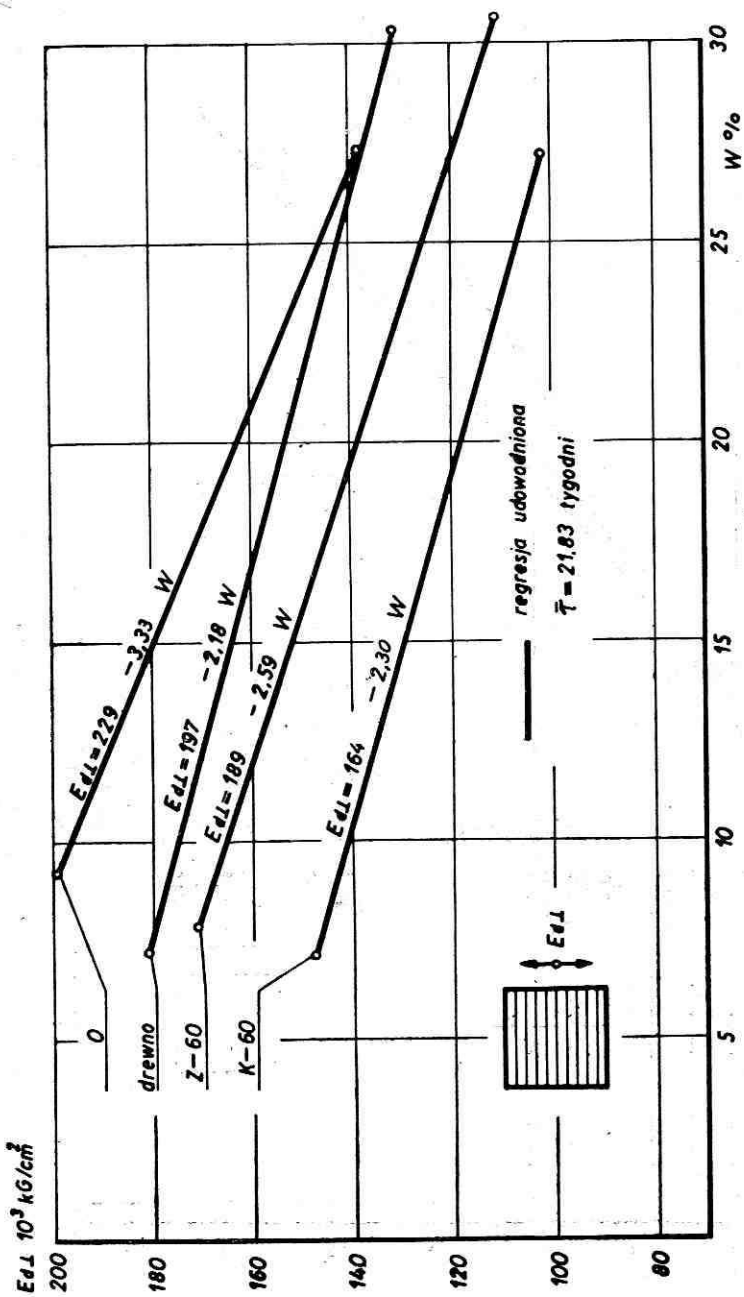
Wpływ czasu składowania po sklejeniu na moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej mocznikowy oraz wpływ czasu składowania litego drewna brzozowego na jego moduł sprężystości można scharakteryzować następująco.



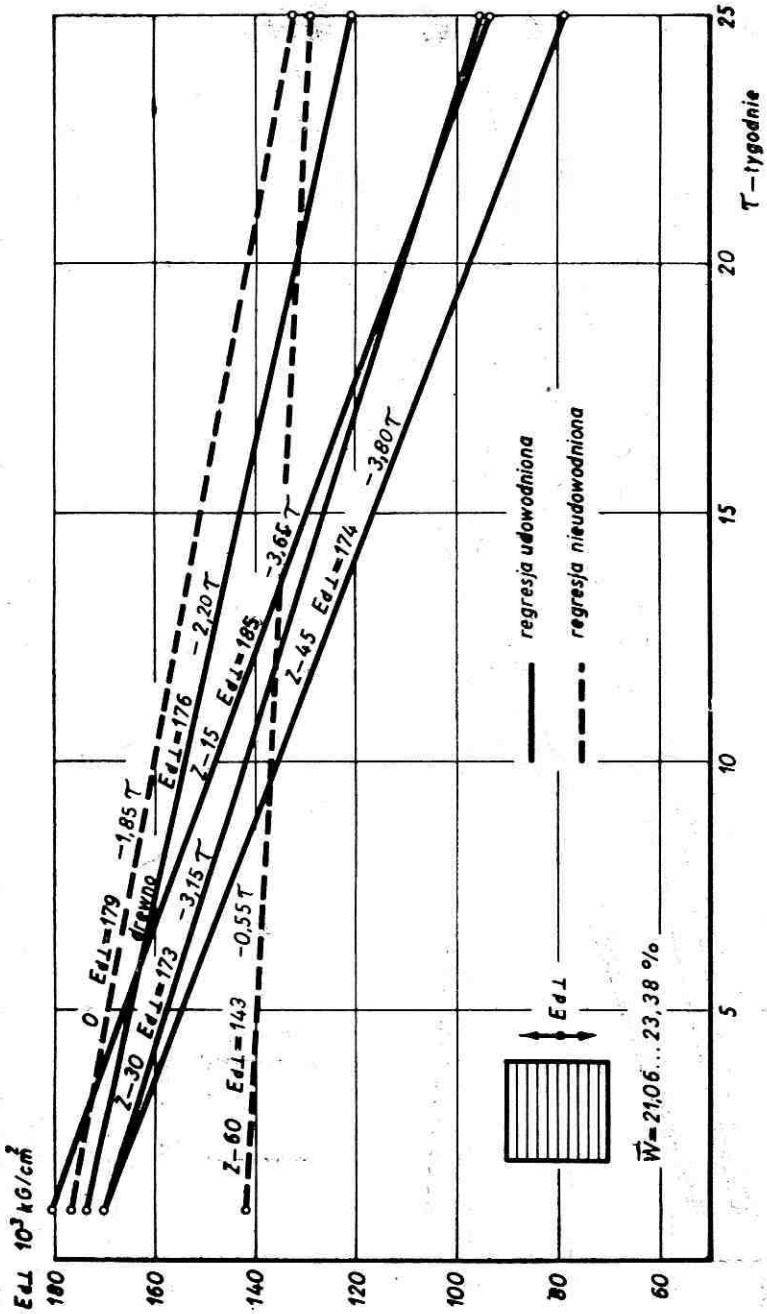
Rys. 25. Zależność cząstkowa dynamicznego modułu sprężystości ($E_{d\perp}$) od wilgotności (W) dla drewna warstwowego o różnej zawartości mąki żytniej w kleju oraz dla drewna litego; okres 25 tygodni od sklejenia



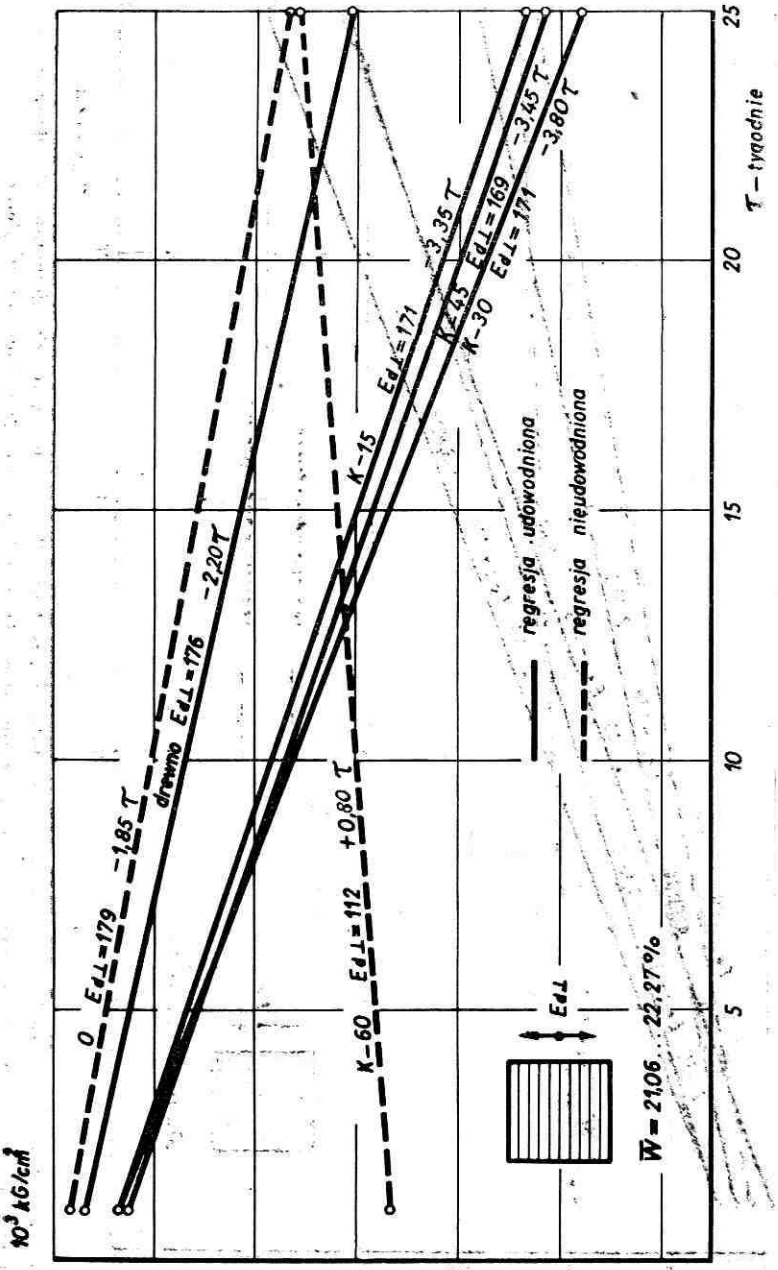
Rys. 26. Zależność cząstkowa dynamicznego modułu sprężystości ($E_{d\perp}$) od wilgotności (W) dla drewna warstwowego o różnej zawartości mąki ziemniaczanej w kleju oraz dla drewna litego; okres 25 tygodni od sklejenia



Rys. 27. Zależność cząstkowa dynamicznego modułu sprężystości ($E_{d\perp}$) od wilgotności (W) dla drewna warstwowego o różnych wypełniaczach kleju oraz dla drewna litego; okres 88 tygodni do sklejenia



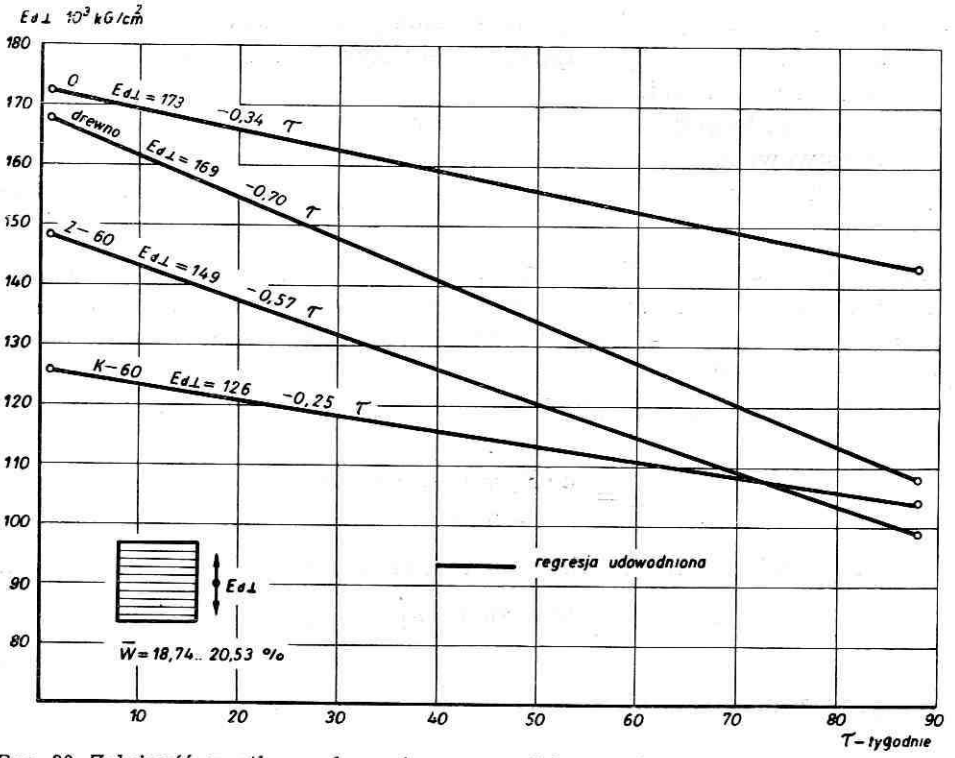
Rys. 28. Zależność cząstkowa dynamicznego modułu sprężystości ($E_{d\perp}$) od czasu składowania (τ); drewno warstwowe o różnej zawartości mąki żytniej w kleju oraz drewno lite; okres 25 tygodni od sklejenia



Rys. 29. Zależność cząstkowa dynamicznego modułu sprężystości ($E_{d\perp}$) od czasu składowania (τ); drewno warstwowe o różnej zawartości mąki ziemniaczanej w kleju oraz drewno lite; okres 25 tygodni od sklejenia

1. Z upływem czasu składowania w okresie 1 ... 25 ... 88 tygodni moduł sprężystości układu drewno — klej oraz moduł sprężystości drewna litego maleją wprostproporcjonalnie do czasu (rys. 28, 29 i 30).

2. Wpływ czasu składowania na moduł sprężystości układu drewno — klej zależy od zawartości wypełniacza skrobiowego w kleju. Przy zawar-



Rys. 30. Zależność cząstkowa dynamicznego modułu sprężystości ($E_{d\perp}$) od czasu składowania (τ); drewno warstwowe o różnych wypełniaczach kleju oraz drewno lite; okres 88 tygodni od sklejenia

tości wypełniacza wynoszącej 15 ... 45% ciężaru kleju wpływ czasu składowania jest większy aniżeli przy zawartości wypełniacza równej 0 lub 60% ciężaru kleju (rys. 28 i 29).

3. Wpływ czasu składowania na moduł sprężystości układu drewno — klej zależy od rodzaju wypełniacza kleju. Wpływ ten jest mniejszy przy wypełnieniu kleju mąką ziemniaczaną aniżeli przy wypełnieniu kleju mąką żytnią (rys. 30).

4. Z upływem czasu składowania moduł sprężystości drewna litego ulega większemu obniżeniu niż moduł sprężystości układu drewno — klej (rys. 30).

VII. SYNTEZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Dążąc do wyjaśnienia podstawowych zależności, charakteryzujących moduł sprężystości E warstwowego układu drewno — klej mocznikowy, przeprowadzono analizę tych zależności oraz wykonano doświadczenia, możliwie wszechstronnie naświetlające postawione zagadnienia. W trakcie doświadczeń wykonano łącznie 10 973 pomiarów, których wyniki przyjęto do dalszych obliczeń szukanych wielkości oraz do analizy, mającej na celu wyznaczenie zależności między tymi wielkościami.

Wyniki teoretycznej analizy zależności modułu sprężystości układu warstwowego od modułów sprężystości jego komponentów oraz wynik wstępnych badań metodycznych można zrekapitulować następująco.

1. Z teoretycznej analizy wynika, że moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej zależy od modułu sprężystości warstw drewna i od modułu sprężystości warstw kleju (sklein). Zależność ta wyraża się następującymi wzorami:

a) przy ściskaniu, rozciąganiu i zginaniu w kierunku równoległym do warstw

$$E = \frac{n \cdot E_1 + (n-1) \cdot u \cdot E_2}{n + (n-1) \cdot u}$$

b) przy ściskaniu lub rozciąganiu w kierunku prostopadłym do warstw

$$E = \frac{[n + (n-1) \cdot u] \cdot E_1 \cdot E_2}{n \cdot E_2 + (n-1) \cdot u \cdot E_1}$$

c) przy zginaniu w kierunku prostopadłym do warstw

$$E = E_1 + (E_2 - E_1) \cdot \frac{n \cdot [u^3 + 2u \cdot (n^2-1) \cdot (1 + u)^2]}{[n + (n-1) \cdot u]^3}$$

gdzie

E — moduł sprężystości układu,
E_1 — moduł sprężystości warstw drewna,
E_2 — moduł sprężystości warstw kleju,
n — liczba warstw drewna,
$(n-1)$ — liczba warstw kleju,
u — stosunek grubości warstwy kleju do grubości warstwy drewna.

Powyższe wzory są słuszne przy założeniu, że grubość wszystkich warstw drewna w układzie jest jednakowa, grubość wszystkich warstw kleju w układzie jest jednakowa, a liczba warstw drewna jest parzysta.

Wpływ modułów sprężystości komponentów na moduł sprężystości układu jest największy przy zginaniu w kierunku prostopadłym do warstw

(punkt c), najmniejszy zaś przy ściskaniu lub rozciąganiu w tym kierunku (punkt b).

2. Doświadczalne potwierdzenie teoretycznie udowodnionych zależności okazało się niemożliwe, gdyż nieregularność skleiny i głębokie wnikanie kleju w drewno uniemożliwiły dokładne pomierzenie grubości warstw kleju. Stwierdzono natomiast, że moduł sprężystości układu zależy od grubości warstw drewna (forniru). Maksymalne wartości modułu dla brzozowego drewna równoległowarstwowego, sklejonego klejem mocznikowym bez wypełniacza, uzyskano przy grubości forniru zawartej w przedziale 0,55 ... 0,60 mm.

3. Liczbowa wartość statycznego i dynamicznego modułu sprężystości warstwowego układu drewno — klej zależy od kierunku zginania. Moduły określone przy zginaniu w kierunku prostopadłym do warstw układu są większe od modułów określonych przy zginaniu w kierunku równoległym do warstw. Różnice tych modułów maleją ze wzrostem liczbowej wartości modułu w przedziale (125 ... 160) $\cdot 10^3$ kG/cm^2, a w przedziale (160 ... 190) $\cdot 10^3$ kG/cm^2 nie przekraczają wartości błędu pomiarowego.

4. Moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej, określony przy zginaniu, zależy w nieznacznym stopniu od metody określania. Stwierdzono, że wartości statycznego i dynamicznego modułu sprężystości zawarte w przedziale (135 ... 170) $\cdot 10^3$ kG/cm^2 są jednakowe z dokładnością $\pm$ 5%, która jest w przybliżeniu równa wartości błędu pomiarowego.

Zasadniczy cel pracy stanowiło zbadanie zależności modułu sprężystości warstwowego układu drewno — klej mocznikowy od zawartości w kleju skrobiowego wypełniacza. Wyniki tych badań przedstawiają się następująco.

5. Ze wzrostem zawartości wypełniacza w kleju moduł sprężystości układu maleje, przy czym spadek modułu nie jest proporcjonalny do zawartości wypełniacza.

6. Wpływ zawartości wypełniacza zależy od jego rodzaju. Mąka ziemniaczana bardziej obniża moduł sprężystości układu niż mąka żytnia. Przy wzroście zawartości wypełniacza w przedziale 0 ... 60% ciężaru kleju obniżenie to wynosi dla mąki ziemniaczanej 27%, a dla mąki żytniej 18% wartości modułu, stwierdzonej przy zastosowaniu kleju bez wypełniacza.

Dalszym celem badań zasadniczych było ustalenie wpływu wilgotności i czasu składowania po sklejeniu na moduł sprężystości warstwowego układu drewno — klej mocznikowy. Cząstkowy wpływ wilgotności, która stopniowo malała przez okres 88 tygodni od chwili sklejenia, jest następujący.

7. Moduł sprężystości układu drewno — klej oraz moduł sprężystości drewna litego (zbadanego w celach porównawczych) zmniejszają się liniowo ze wzrostem wilgotności w przedziale 7 ... 30%.

8. Ze wzrostem zawartości wypełniacza skrobiowego w kleju maleje wpływ wilgotności na moduł sprężystości układu. Przy zawartości wypeł-

niacza równej 60% ciężaru kleju wpływ ten jest tego samego rzędu jak dla drewna litego.

9. Rodzaj wypełniacza kleju (mąka żytnia lub ziemniaczana) nie wpływa w istotny sposób na zależność modułu sprężystości układu od wilgotności.

Cząstkowy wpływ czasu składowania — określony po wyeliminowaniu wpływu wilgotności — można sformułować następująco.

10. Z upływem czasu składowania moduł sprężystości układu drewno — klej oraz moduł sprężystości drewna litego maleją wprostproporcjonalnie do czasu, przy czym moduł drewna litego maleje bardziej niż moduł układu drewno — klej.

11. Wpływ czasu składowania na moduł sprężystości układu zależy od rodzaju i zawartości wypełniacza w kleju. Przy wypełnieniu kleju mąką ziemniaczaną wpływ czasu jest mniejszy niż przy wypełnieniu kleju mąką żytnią. Niezależnie natomiast od rodzaju mąki wpływ czasu jest większy przy zawartości wypełniacza wynoszącej 15 ... 45% ciężaru kleju aniżeli przy jego zawartości równej 0 lub 60% ciężaru kleju.

Oprócz powyższych wniosków, wynikających z doświadczeń objętych zakresem pracy, godne uwagi są niektóre wnioski, jakie można wyciągnąć z badań pomocniczych, przeprowadzonych w celu scharakteryzowania jakości materiału doświadczalnego. Wnioski te można ująć następująco.

12. Przy klejeniu na zimno (w temperaturze 23 ± 3° C) klej mocznikowy MC-60 z mąką ziemniaczaną nie daje w pełni zadowalających rezultatów. Wobec głębokiego wnikania kleju w drewno warstewka utwardzonej masy klejowej składa się głównie z ziarn wypełniacza, wskutek czego wytrzymałość na ścinanie a zwłaszcza wodoodporność skleiny są mniejsze niż normalnie uzyskiwane przy klejeniu na gorąco.

13. Między współczynnikiem kurczliwości utwardzonych mas klejowych a modułem sprężystości sklein tych samych mas klejowych zachodzi prawdopodobnie zależność, którą należałoby sprawdzić doświadczalnie.

Na podstawie tych wniosków szczegółowych można postawić kilka hipotez o charakterze ogólnym, zmierzających do przyczynowego wyjaśnienia stwierdzonych zależności.

a. Pozytywny wpływ dodatku wypełniaczy skrobiowych na właściwości spoiny kleju mocznikowego należy przypisać zmniejszeniu kurczliwości utwardzonego kleju, wskutek czego powinna zmniejszyć się wartość naprężeń wstępnych w skleinie bezpośrednio po sklejeniu materiału; oprócz tego dodatek wypełniaczy skrobiowych zmniejsza moduł sprężystości skleiny i powoduje uplastycznienie utwardzonego kleju, co ułatwia relaksację naprężeń wstępnych oraz naprężeń sorpcyjnych lub desorpcyjnych, wywołanych późniejszymi zmianami wilgotności sklejonego materiału w higroskopijnym przedziale wilgotności.

b. Wobec stosunkowo dużych wymiarów ziarn wypełniaczy, niezbyt równomiernego ich rozmieszczenia w skleinie oraz braku hydrolitycznego rozkładu skrobi, moduł sprężystości skleiny maleje nierównomiernie ze wzrostem zawartości wypełniacza skrobiowego.

c. Z tych samych przyczyn dostateczne zmniejszenie kurczliwości i uplastycznienie kleju w skleinie, umożliwiające skuteczną relaksację naprężeń desorpcyjnych w miarę spadku wilgotności układu z upływem czasu, staje się możliwe dopiero przy znacznej zawartości wypełniacza skrobiowego; zmniejszenie kurczliwości utwardzonego kleju oraz uplastycznienie skleiny stanowią przyczynę zmniejszenia się wpływu wilgotności i czasu na moduł sprężystości układu drewno — klej.

d. Stwierdzone zmniejszanie się wpływu wilgotności na moduł sprężystości drewna warstwowego w miarę spadku prędkości jego wysychania upoważnia do przypuszczenia, że za główną przyczynę obniżania się modułu sprężystości z upływem czasu należy przyjąć naprężenia desorpcyjne. Przy gwałtownej zmianie wilgotności powstają znaczne naprężenia, które nie mogą ulec relaksacji i działają niszcząco na strukturę materiału, obniżając tym samym jego moduł sprężystości. Prawdopodobnie przy ustalonej wilgotności materiału proces ten uległby prawie całkowitemu zahamowaniu.

e. Ponieważ przy podwyższonej temperaturze klejenia hydrolityczne działanie utwardzacza na wypełniacze skrobiowe powinno być znacznie silniejsze aniżeli przy klejeniu na zimno, należy przypuszczać, że skuteczne zmniejszenie kurczliwości utwardzonego kleju oraz dostateczne uplastycznienie skleiny można by uzyskać w tym przypadku przy znacznie mniejszych zawartościach wypełniaczy. Tą samą przyczyną oraz jednoczesnym znacznym skróceniem czasu utwardzania kleju można objaśnić większą wodoodporność skleiny, uzyskiwanej przy klejeniu w podwyższonej temperaturze za pomocą kleju mocznikowego z wypełniaczami skrobiowymi.

Praca oparta na materiałach rozprawy doktorskiej, wykonanej w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Praca wpłynęła do Komitetu Redakcyjnego 13 września 1963 r.

LITERATURA

1. Acena B.: The effect of high drying temperature on the physical and chemical characteristics of cassava starch. „Die Stärke" 1956.

2. Acton F. S.: Analysis of Straight-line Data. Wiley and Sons, New York 1959.

3. Andres H.: Ein Verfahren zur Messung des komplexen dynamischen Elastizitätsmoduls. „Hochfrequenztechnik und Elektroakustik" 1959; Bd. 67.

4. Arnoldt W.: Das Strecken des Kauritleims — technisch betrachtet. „Holztechnik" 1952.

5. Arnoldt W.: Wissenswertes aus dem Kauritleimgebiet. „Holztechnik" 1953.

6. Bażenow W. A.: Dinamiczeskij modul uprugosti driewiesiny kak pokazatiel jejo fiziko-miechaniczeskich swojstw. „Trudy Instituta Lesa" 1953; t. IX.

7. Blomquist R. F., Olson W Z.: Durability of Urea-Resin Glues at Elevated Temperatures. „Forest Prod. Journal" 1957; Vol. VII.

8. Bruyne (de) N. A., Houwink R.: Adhesion and Adhesives. Elsevier Publ. Co., New York — Amsterdam — London — Brussels 1951.

9. Curry W. T.: The Strength Properties of Plywood. Part 2: Effect of the Geometry of Construction. „Forest Prod. Res. Bull." London 1954; nr 33.

10. Curry W. T.: The Strength Properties of Plywood. Part 3: The Influence of the Adhesive. „Forest Prod. Res. Bull." London 1957; nr 39.

11. Czechowicz J.: Dokładność obliczenia wyników badania technicznych własności drewna. „Prace ITB", Warszawa 1951; nr 94.

12. Dalewski B., Lendzion A.: Rozciągacze do krajowego kleju mocznikowego (na gorąco). ITD, Warszawa 1953 (maszynopis).

13. Dobrowolski R.: Badania nad wpływem parowania uplastyczniającego na własności sprężysto-plastyczne i wytrzymałościowe drewna bukowego. Praca doktorska wykonana w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna SGGW, Warszawa 1960 (maszynopis).

14. Fetzer W. R.: Methods in the Starch and Dextrose Industry. „Analytical Chemistry" 1952, Vol. 24.

15. Gauthier M. P.: Charpente collée — théorie et réalisation des assemblages. „Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics", Paris 1950; nr 161.

16. Gratzl A., Wallpach G.: Über die tatsächlichen E-moduli an Druckproben von Buchensperrholz. „Holzforschung und Holzverwertung" 1957.

17. Hertel H.: Die Schubmoduln von Furnier und Sperrholz. „Luftfahrtforschung" 1932.

18. Keylwerth R.: Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer. VDI-Forschungsheft 430. Deutscher Ingenieur-Verlag. Düsseldorf 1951.

19. Keylwerth R.: Erreichte und erreichbare Verminderung der Anisotropie in Holzwerkstoff-Platten. „Holz als Roh- und Werkstoff" 1959.

20. Kesler C. E., Chang T. S.: A Review of Sonic Methods for the Determination of Mechanical Properties of Solid Materials. „ASTM Bulletin" 1957.

21. Klemm H.: Neue Leim-Untersuchungen mit besonderer Berücksichtigung der Kalt-Kunstharzleime. Verl. R. Oldenbourg, München und Berlin 1938.

22. Kollmann F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer-Verlag, Berlin — Göttingen — Heidelberg 1951; Bd. I, 1955; Bd. II.

23. Kollmann F., Krech H.: Dynamische Messung der elastischen Holzeigenschaften und der Dämpfung; ein Beitrag zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. „Holz als Roh- und Werkstoff" 1960.

24. Korzeniowski A., Piłat K.: Wpływ rodzaju i ilości wypełniacza w 60-procentowym kleju mocznikowym na wytrzymałość spoiny klejowej na ścinanie. „Przemysł Drzewny" 1960.

25. Krajčinović M., Djukić-Jovanović J.: Über den Einfluss der Salzsäure auf den hydrolytischen Abbau von Stärke und Stärkerohstoffen im Zusammenhang mit der quantitativen Bestimmung der Stärke. „Zeitschr. für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung", 1956; Bd. 103.

26. Krzysik F.: Nauka o drewnie. PWRiL, Warszawa 1957.

27. Krzysik F., Orlicz T.: Wpływ układu słojów rocznych na wielkość siły zginającej. „Sylwan" 1954.

28. Lee I. G. D.: A non-destructive Method for Measuring the Elastic Anisotropy of Wood using an Ultrasonic Pulse Technique. „Journal of the Inst. of Wood Science" 1958; nr 1.

29. Nawrocki Z.: Zarys metodyki doświadczeń rolniczych. PWN, Warszawa 1958.

30. Neusser H.: Versuche mit Leimstreckmitteln für Harnstoffharze. „Holz als Roh- und Werkstoff" 1956.

31. Norén B., Saarman E.: Schubversuche an Sperrholz. „Holz als Roh- und Werkstoff" 1958.

32. Pirt S. J., Whelan W. J.: „Journ. Sci. Food Agric." 1951.

33. Plath E.: Die Holzverleimung. Wissenschaftliche Verlagsges., Stuttgart 1951.

34. Plath E., Plath L.: Färbemethoden für Mikrotomschnitte aus verleimten und oberflächenbehandelten Holzwerkstoffen. „Holz als Roh- und Werkstoff" 1959.

35. Rivat-Lahousse A.: Les colles industrielles. Dunod, Paris 1956.

36. Rowiński Cz.: Zależność wytrzymałości spoiny klejowej 40-procentowego kleju mocznikowego od procentowego udziału wypełniacza — mąki żytniej. Praca magisterska wykonana w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna SGGW, Warszawa 1958 (maszynopis).

37. Sadowskij F. F.: K metodikie opriedielenija dinamiczeskogo modula uprugosti driewiesiny. „Trudy Instituta Lesa" 1953; t. IX.

38. Schmidt A. X., Marlies Ch. A.: Principles of High-polymer Theory and Practice. Mc Graw-Hill, New York — Toronto — London 1948.

39. Sodhi J. S.: Die Abhängigkeit der Bindefestigkeit von Harnstoff- und Melamin-Formaldehyd-Harzen von Viskosität, Konzentrazion und Streckmittelzusatz. „Holz als Roh- und Werkstoff" 1957.

40. Tickle C. G.: Electronic Methods of Wood-Testing. „Br. Col. Lumberman" 1958.

41. Tiemkina R. Z., Płotnikowa G. P., Mirkowicz R. A.: Napołnitieli dla klejaszczych karbamidnych smoł i biełkowych klejew. Gos. Nauczno-Tiechniczeskij Komitiet Sowieta Ministrow RSFSR, Moskwa 1958.

42. Wroński J.: Badania porównawcze nad sprężystością i ciężarem właściwym płyt stolarskich i wiórowych w celu sprawdzenia ich przydatności do produkcji obudowy pianin. Praca magisterska wykonana w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna SGGW, Warszawa 1960 (maszynopis).

ИССЛЕДОВАНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ СЛОИСТОЙ СИСТЕМЫ ДРЕВЕСИНА — МОЧЕВИННЫЙ КЛЕЙ

Краткое содержание

Практические наблюдения, проведенные в течение многих лет по применению мочевинных клеев, вызывают предположение, что упругость шва этих клеев зависит в значительной степени от рода и количества наполнителей, прибавляемых к клею для облегчения склеивания и улучшения качества клеевого шва. Основой для такого предположения является тоже физический характер этих наполнителей. Экспериментальная проверка правильности такого предположения, путем определения упругости слоистой древесины склеенной мочевинным клеем с различным содержанием некоторых крахмальных наполнителей, являлась главной целью настоящей работы.

Из проведенного теоретического анализа следует, что модуль упругости слоистой системы древесина-клей зависит от модуля упругости слоев древесины и от модуля упругости слоев клея (швов). Зависимость эта выражена в следующих формулах:

а) при сжатии, растяжении и изгибе в направлении параллельном к слоям

$$E = \frac{n \cdot E_1 + (n-1) \cdot u \cdot E_2}{n + (n-1) \cdot u}$$

б) при сжатии или растяжении в направлении перпендикулярном к слоям

$$E = \frac{[n + (n-1) \cdot u] \cdot E_1 E_2}{n \cdot E_2 + (n-1) \cdot u \cdot E_1}$$

в) при изгибе в направлении перпендикулярном к слоям

$$E = E_1 + (E_2 - E_1) \cdot \frac{n \cdot [u^3 + 2\,u \cdot (n^2 - 1) \cdot (1 + u)^2]}{[n + (n-1) \cdot u]^3}$$

где:

E — модуль упругости системы древесина — клей,
E_1 — модуль упругости слоев древесины,
E_2 — модуль упругости слоев клея,
n — число слоев древесины в системе,
$(n-1)$ — число слоев клея в системе,
u — отношение толщины слоев клея к толщине слоев древесины.

Вышеприведенные формулы правильны, если толщина всех слоев древесины одинакова и толщина всех слоев клея тоже одинакова а число слоев древесины чётное. Влияние составляющих модулей E_1 и E_2 на модуль E системы самое большое при изгибе в направлении перпендикулярном к слоям, а наименьшее при сжатии или растяжении в том же направлении.

Для экспериментальной проверки зависимости модуля упругости от содержания клея в системе, были проведены исследования со слоистой березовой древесиной, склеенной из шпонов толщиной 0,2; 0,35; 0,5 и 1,0 мм. Во всех слоях шпона направление волокон древесины было одинаковое. Модуль упругости определялся при изгибе динамическим и статическим методами, применяемыми В. А. Баженовым (6). Добавочно был определен модуль упругости и сопротивление растяжению шпона (рис. 15), а также сопротивление изгибу и ударному изгибу слоистой древесины (рис. 20).

Экспериментальное подтверждение полученных зависимостей оказалось невозможным, так как нерегулярность клеевых швов и глубокое проникание клея в древесину, делали невозможным точное измерение толщины слоев клея. Констатировано зато, что модуль упругости слоистой древесины зависит от толщины шпона. Максимальные величины мо-

дуля были получены при толщине шпона, составляющей 0,55—0,60 мм (рис. 14). Числовая величина статического и динамического модулей упругости оказалась практически одинаковой (рис. 16 и 17). Констатировано тоже, что модуль упругости при изгибе в направлении перпендикулярном к слоям, является бо́льшим от модуля, определенного при изгибе в направлении параллельном к ним (рис. 18 и 19). В исследованном интервале $(120 \cdots 180) \cdot 10^3$ кГ/см² разности этих модулей постепенно уменьшаются с ростом числовой величины модуля и, начиная с $160 \cdot 10^3$ кГ/см², не превышают ошибки измерения.

Главной целью исследований было определение зависимости модуля упругости от содержания ржаной или картофельной муки в мочевинном клее. Исследование это проводилось со слоистой древесиной, склеенной из березового шпона толщиной 0,35 мм. К 100 частям веса клея прибавляли 15, 30, 45 или 60 частей муки. Так как величины динамического и статического модулей были одинаковые, определения проводились только динамическим методом, при изгибе в направлении перпендикулярном к слоям шпона. Констатировано, что модуль упругости уменьшается с ростом содержания муки в клее, причем картофельная мука вызывала большее снижение величины модуля, чем ржаная (рис. 24). При содержании муки равным 60% веса клея, уменьшение модуля составляло для картофельной муки 27%, а для ржаной — 18% величины модуля, установленной для слоистой древесины, склеенной клеем без добавки муки.

Дальнейшей целью исследований было определение влияния изменений влажности слоистой древесины на ее модуль упругости во время хранения, после склеивания. Во время хранения в течение 80 недель, влажность постепенно снижалась от 30 до 7% (рис. 7). Несмотря на постоянное снижение влажности, модуль упругости повышался только до двенадцатой недели, а потом начал снижаться (рис. 13). Это доказывает, что в слоистой древесине и в исследованной для сравнения цельной березовой древесине, появились структурные изменения или изменения напряжений под влиянием десорбции влажности. С ростом содержания муки в клее, изменения модуля упругости во время хранения уменьшаются; при содержании муки равном 60% веса клея, снижение модуля упругости слоистой древесины приблизительно такое же, как цельной древесины.

Кроме модуля упругости исследовались тоже сопротивление изгибу и ударному изгибу (рис. 21), а также микроструктура слоистой древесины. Констатировано, что при холодном склеивании мочевинный клей проникает глубоко в шпон (рис. 8a), а большинство зерен муки задерживается в слое клеевого шва, особенно в случае картофельной муки (рис. 8d, e). Трещин клеевых швов и шпона не обнаружено.

При склеивании слоистой древесины были изготовлены образцы клея

с различным содержанием ржаной и картофельной муки, который затвердился на холодно в стеклянных пробирках (рис. 5а). Образцы эти послужили для определения усушки затвердевшего клея, который высыхал в таких же условиях, как и слоистая древесина. Измерения усушки были проведены методом описанным Г. Клеммом (21), одновременно с измерениями модуля упругости. Констатировано, что с ростом содержания муки, усушка затвердевшего клея снижается, причем картофельная мука более сильно снижает усушку, чем ржаная (рис. 9).

Положительное влияние добавки крахмальных наполнителей на свойства швов мочевинного клея, следует поэтому приписать, главным образом, снижению усушки затвердевшего клея. Кроме того, добавка крахмальных наполнителей снижает модуль упругости клеевых швов и вызывает пластификацию затвердевшего клея, что облегчает релаксацию напряжений, возникающих во время затвердевания клея, а также сорбционных или десорбционных напряжений, вызванных изменениями влажности склеенной древесины.

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DEN ELASTIZITÄTSMODUL DER SCHICHTANORDNUNG HOLZ-HARNSTOFFLEIM

Zusammenfassung

Praktische, während vieljähriger Verwendung der Harnstoffleime gemachte Beobachtungen führten zu der Vermutung, dass die Elastizität der Fugen dieser Leime im hohen Grade von der Art und Menge der den Leimen zwecks Erleichterung der Verleimung und Verbesserung der Fugeneigenschaften zugegebenen Füllstoffe abhängig ist. Prämissen für die Aufstellung solcher Hypothese ergeben sich auch aus dem physikalischen Charakter dieser Füllstoffe. Das Hauptziel dieser Arbeit ist der experimentelle Nachweis der Richtigkeit der oben erwähnten Hypothese durch Bestimmung der Elastizität des mit Harnstoffleim von verschiedenem Gehalt an einigen Stärkefüllstoffen verleimten Schichtholzes.

Aus der durchgeführten theoretischen Analyse erfolgt, dass der Elastizitätsmodul der Schichtanordnung Holz-Leim vom Elastizitätsmodul der Holzschichten und vom Elastizitätsmodul der Leimschichten (Fugen) abhängig ist. Diese Abhängigkeit wird mit folgenden Formeln ausgedrükt:

a) bei Druck-, Zug- und Biegebelastung in der parallelen Richtung zu den Schichten

$$E = \frac{n \cdot E_1 + (n\text{-}1) \cdot u \,.\, E_2}{n + (n\text{-}1) \cdot u}$$

b) bei Druck- oder Zugbelastung in der senkrechten Richtung zu den Schichten

$$E = \frac{[n + (n\text{-}1) \cdot u] \cdot E_1 E_2}{n \cdot E_2 + (n\text{-}1) \cdot u \cdot E_1}$$

c) bei Biegebelastung in der senkrechten Richtung zu den Schichten

$$E = E_1 + (E_2 - E_1) \cdot \frac{n \cdot [u^3 + 2u \cdot (n^2-1) \cdot (1 + u)^2]}{[n + (n-1) \cdot u]^3}$$

wo

E — Elastizitätsmodul der Anordnung Holz-Leim,
E_1 — Elastizitätsmodul der Holzschichten,
E_2 — Elastizitätsmodul der Leimschichten,
n — Zahl der Holzschichten in der Anordnung,
$(n-1)$ — Zahl der Leimschichten in der Anordnung,
u — Verhältnis der Stärke der Leimschichten zur Stärke der Holzschichten.

Die obengenannten Formeln sind dann brauchbar, wenn die Stärke aller Holzschichten und aller Leimschichten gleich ist, und die Zahl der Holzschichten gerade ist. Der Einfluss der Komponentenmodule E_1 und E_2 auf den resultierenden Modul E der Anordnung ist bei Biegung in der senkrechten Richtung zu den Schichten am grössten und bei Druck oder Zug in derselben Richtung am kleinsten.

Um die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls vom Gehalt an Leim in der Anordnung experimentell nachzuprüfen, hat man Untersuchungen mit aus 0,2, 0,35, 0,5 und 1,0 mm starken Furnieren verleimtem Birkenschichtholz durchgeführt. In allen Furnierschichten war die Holzfaserrichtung gleich. Den Elastizitätsmodul bestimmte man bei Biegung nach der dynamischen und der statischen Methode, die W. A. Bashenow (6) verwendet hatte. Zusätzlich bestimmte man den Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit der Furniere (Abb. 15), sowie die Biege- und die Schlagbiegefestigkeit des Schichtholzes (Abb. 20).

Die experimentelle Bestätigung der abgeleiteten Beziehungen erwies sich unmöglich, da die Unregelmässigkeit der Leimfugen und das tiefe Eindringen des Leimes ins Holz eine genaue Vermessung der Stärke der Leimschichten unmöglich machte. Dafür wurde festgestellt, dass der Elastizitätsmodul des Schichtholzes von der Furnierstärke abhängt. Maximale Werte des Moduls erreichte man bei Furnierstärke gleich 0,55 . . . 0,60 mm (Abb. 14). Der Zahlenwert des statischen und des dynamischen Elastizitätsmoduls erwies sich praktisch gleich (Abb. 16 und 17). Es wurde auch festgestellt, dass der Elastizitätsmodul bei Biegung in der senkrechten Richtung zu den Schichten grösser als der bei Biegung in der zu den Schichten parallelen Richtung bestimmte Modul ist (Abb. 18 und 19). Im untersuchten Bereich $(120 \ldots 180) \cdot 10^3$ kG/cm² vermindern sich die Unterschiede dieser Module allmählich mit der Steigerung des Zahlenwertes des Moduls, und von $160 \cdot 10^3$ kG/cm² an überschreiten sie den Vermessungsfehler nicht.

Hauptziel der Untersuchungen war die Bestimmung der Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls vom Gehalt an Roggen- oder Kartoffelmehl im

Harnstoffleim. Diese Untersuchungen wurden mit einem aus 0,35 mm starkem Birkenfurnier verleimten Schichtholz durchgeführt. Zu 100 Gewichtsteilen Leim gab man 15, 30, 45 und 60 Teile Mehl. Da die Werte des dynamischen und des statischen Moduls gleich sind, führte man die Bestimmungen nur nach der dynamischen Methode bei Biegung in der senkrechten Richtung zu den Furnierschichten durch. Es wurde festgestellt, dass der Elastizitätsmodul sich mit der Steigerung des Gehalts an Mehl im Leim vermindert, wobei Kartoffelmehl den Modulwert stärker vermindert als Roggenmehl (Abb. 24). Beim Mehlgehalt gleich 60% des Leimgewichtes beträgt die Verminderung des Moduls für Kartoffelmehl 27% und für Roggenmehl 18% des Modulwertes, der für das mit Leim ohne Mehlzugabe verleimte Schichtholz nachgewiesen wurde.

Weiteres Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung des Einflusses der Feuchtigkeitsveränderungen während der Lagerung nach der Verleimung des Schichtholzes auf seinen Elastizitätsmodul. Während der 88 Wochen langen Lagerung verminderte sich die Feuchtigkeit allmählich von 30 bis 7% (Abb. 7). Trotz ständiger Verminderung der Feuchtigkeit steigerte sich der Elastizitätsmodul nur bis zur zwölften Woche, und dann begann er wieder kleiner zu werden (Abb. 13). Dieses beweist, dass im Schichtholz und im vergleichweise untersuchten Birkenvollholz Struktur- oder Spannungsveränderungen unter dem Einfluss der Feuchtedesorption eingetreten sind. Mit der Steigerung des Mehlgehalts im Leim werden die Veränderungen des Elastizitätsmoduls während der Lagerung kleiner; beim Mehlgehalt gleich 60% des Leimgewichtes ist die Verminderung des Elastizitätsmoduls während der Lagerung des Schichtholzes derselben Grösse wie beim Vollholz.

Ausser dem Elastizitätsmodul untersuchte man auch die Biege- und die Schlagbiegefestigkeit (Abb. 21), sowie die Mikrostruktur des Schichtholzes. Es wurde festgestellt, dass beim Kaltleimen der Harnstoffleim tief ins Furnier eindringt (Abb. 8a), und dass die Mehlkörner zum grössten Teil in der Schicht der Leimfuge bleiben, insbesondere im Fall des Kartoffelmehls (Abb. 8d, e). Fugen- und Furniersprünge wurden nich wahrgenommen.

Beim Leimen des Schichtholzes hat man auch Leimproben von verschiedenem Gehalt an Roggen- und Kartoffelmehl hergestellt und in Glaseprouvetten kaltgehärtet (Abb. 5a). Diese Proben dienten zur Bestimmung der Schwindung des gehärteten Leimes, der unter gleichen Bedingungen wie das Schichtholz trocknete. Die Vermessungen der Schwindung führte man nach der von H. Klemm (21) beschriebenen Methode gleichzeitig mit den Vermessungen des Elastizitätsmoduls durch. Es wurde festgestellt, dass sich mit der Steigerung des Mehlgehaltes die Schwindung des gehärteten Leimes vermindert, wobei Kartoffelmehl die Schwindung stärker vermindert als Roggenmehl (Abb. 9).

Den vorteilhaften Einfluss der Zugabe von Stärkefüllstoffen auf die Eigenschaften der Harnstoffleimfungen muss man also hauptsächlich der Verminderung der Schwindung des gehärteten Leimes zuschreiben. Ausserdem vermindert die Zugabe von Füllstoffen den Elastizitätsmodul der Leimfugen und führt eine Plastifizierung des gehärteten Leimes herbei, was die Relaxation der während der Leimhärtung entstehenden Spannungen, sowie der Sorptions- und Desorptionsspannungen, die durch die Feuchtigkeitsveränderungen des verleimten Holzes hervorgerufen werden, erleichtert.

TREŚĆ

Wstęp 181
I. Przegląd literatury 182
1. Rola wypełniaczy w kleju mocznikowym 182
2. Metody określania modułów sprężystości 184
3. Sprężystość warstwowego układu drewno-klej 187
II. Cel i metodyka badań 190
1. Cel pracy 190
2. Analiza sprężystości warstwowego układu drewno-klej 191
3. Założenia metodyczne 198
III. Materiał doświadczalny 200
1. Surowce 200
2. Masy klejowe 203
3. Klejenie i składowanie materiału doświadczalnego 204
IV. Badania pomocnicze 209
1. Grubość warstw i zawartość kleju w drewnie warstwowym . . . 209
2. Mikrostruktura drewna warstwowego 211
3. Kurczliwość utwardzonych mas klejowych 214
V. Badania metodyczne 216
1. Cel badań metodycznych 216
2. Pomiary modułów sprężystości 216
3. Określanie wilgotności 225
4. Dokładność określania modułów sprężystości 226
5. Opracowanie i analiza wyników 229
VI. Badania zasadnicze 239
1. Opis i wyniki badań 239
2. Analiza wyników 240
VII. Synteza wyników i wnioski 258
Literatura 261
Краткое содержание 263
Zusammenfassung 266