

## SPRĘŻYSTOŚĆ ELEMENTÓW MEBLOWYCH SKLEJANYCH WARSTWOWO

Stanisław Dziągielewski, Arnold Wilczyński

Katedra Meblarstwa AR w Poznaniu

Katedra Techniki WSP w Bydgoszczy

Elementy drewniane sklejone warstwowo na grubość mają szerokie zastosowanie nie tylko w konstrukcjach budowlanych, ale także i w meblarstwie. Duże zalety takich elementów sprawiają, że są one stosowane w konstrukcjach o specjalnym przeznaczeniu i wysokich wymaganiach jakościowych.

Poznanie właściwości sprężystych tych elementów pozwala na lepsze wykorzystanie drewna, co ma szczególne znaczenie przy produkcji elementów giętych i gięto-klejonych. Elementy takie winny wykazywać niezbędną sztywność przy zginaniu, jako właściwości proporcjonalnej do modułu sprężystości materiału. Znajomość modułu sprężystości, poza wykorzystaniem go w obliczeniach konstrukcyjnych, ma także inne szerokie znaczenie. Wskaźnik ten odwzorowuje właściwości jakościowe drewna i ma znaczący udział w wytrzymałościowej metodzie sortowania tarcicy czy też w niszczących metodach badania materiałów lub konstrukcji.

Badaniami sprężystości drewna warstwowo sklejonego z desek lub deseczek nie zajmowano się dotychczas zbyt szeroko. W literaturze fachowej na ten temat [3, 11] spotyka się najczęściej badania wpływu liczby warstw oraz jakości desek na sprężystość belek warstwowych. W badaniach tych stwierdzono wzrost modułu sprężystości belek wraz ze wzrostem liczby warstw, natomiast badania [5, 9] wpływu różnych kompozycji warstw o różnej gęstości drewna i jego sztywności na moduł sprężystości przy zginaniu belki warstwowo sklejanej wykazały, iż wpływ ten jest nieznaczny.

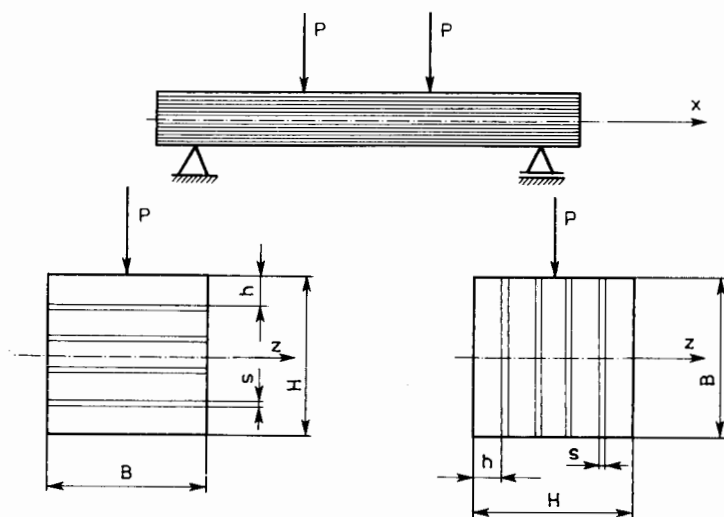
We wspomnianych opracowaniach nie uwzględniono wpływu spoin klejowych na sprężystość układu warstwowego. Wpływ ten jest tym większy, im cieńsze są warstwy sklejonego drewna. Jak dowiodły badania [4] drewna warstwowego, sklejonego z cienkich fornirów, to moduł przy ścisaniu lub rozciąganiu jest od kilku do kilkunastu procent większy niż dla drewna litego. Wyniki te potwierdzono licznymi bada-

niami [6]. Wzrost sprężystości belek wykonanych z cienkich warstw sklejonych tłumaczy się znacznym przesyleniem drewna przez klej, a otrzymany kompozyt znacznie różni się swoimi właściwościami od drewna naturalnego. Brak danych literaturowych dotyczących znajomości modułów sprężystości spoin klejowych utrudnia z kolei określenie modułu sklejonych elementów wielomateriałowych, można jedynie znaleźć [1, 2] moduły spoin określone przy ich ścinaniu. Dlatego zasadne wydaje się przeprowadzenie badań zmierzających do określenia właściwości sprężystych elementów sklejaných warstwowo.

### CEL I METODYKA BADAŃ

Bezpośrednim celem pracy są badania właściwości sprężystych drewna warstwowego sklejanego równolegle do przebiegu włókien deseczek o jednakowej grubości. Dodatkowym celem jest ponadto: ustalenie zależności pomiędzy modułami sprężystości warstwowych elementów badawczych a modułami sprężystości użytego na te elementy drewna, liczby warstw, spoin klejowych i ich grubości oraz kierunku zginania.

Mając na uwadze ewentualność wykorzystania wyników badań w konstrukcjach meblowych postanowiono do doświadczeń użyć drewna bukowego i kleju poliocetanowinylowego Wikol. Jako stałe czynniki badawcze przyjęto więc: gatunek drewna, wilgotność drewna, typ i wymiary próbek, gatunek kleju oraz sposób obciążania łącznie z metodą oznaczania modułu sprężystości.



Rys. 1. Sposoby obciążania próbek warstwowo sklejaných; wariant I - zginanie w płaszczyźnie prostopadłej do warstw belki, wariant II - zginanie w płaszczyźnie równoległej do warstw belki

W celu określenia modułu sprężystości drewna należało przyjąć następujące założenia:

- wszystkie warstwy sklejonej próbki wykonane są z tego samego gatunku drewna i mają jednakowe właściwości sprężyste oraz jednakową grubość ( $h$ ),
- słoje warstw sklejonej próbki drewna przebiegają równolegle do osi  $x$  (rys. 1),
- spoiny klejowe są z tego samego kleju i mają jednakową grubość ( $s$ ),
- moduły sprężystości drewna i spoiny klejowej przy ściskaniu wzdłuż długości warstwy są równe modułom sprężystości przy rozciąganiu w tymże samym kierunku,
- drewno i spoina klejowa są ciałami liniowo sprężystymi i zbliżonymi do jednorodnych,
- grubość spoiny klejowej ( $s$ ) jest bardzo mała w porównaniu z wymiarami ( $H$ ,  $B$ ) przekroju poprzecznego belki (rys. 1).
- liczba ( $n$ ) warstw drewna jest nieparzysta.

#### Oznaczenia

- $E_w$  - moduł sprężystości układu warstwowego,
- $J$  - moment bezwładności przekroju poprzecznego próbki względem osi obojętnej  $z$ ,
- $E_d$  - moduł sprężystości drewna,
- $J_i$  - moment bezwładności  $i$ -tej warstwy drewna względem osi obojętnej  $z$ ,
- $E_s$  - moduł sprężystości spoiny klejowej,
- $J_j$  - moment bezwładności  $j$ -tej spoiny klejowej względem osi obojętnej  $z$ ,
- $h$  - liczba warstw drewna,  $n = 3, 5, 7, \dots$ ,
- $d_{i,e_i}$  - odległości środka ciężkości danej warstwy drewna lub spoiny klejowej od osi obojętnej,
- $B, H$  - wymiary przekroju poprzecznego próbki,
- $f$  - strzałka ugięcia próbki.

Jako spoinę traktuje się nie tylko warstwę zestalonego kleju, lecz również przylegające do niej warstewki drewna przesyconego klejem. Mówiąc o właściwościach spoiny ma się więc na myśli właściwości uśrednione układu warstwowego, którym jest spoina klejowa.

Sprężystość drewna warstwowego zależy od sprężystości jego warstw składowych, a więc od modułów sprężystości drewna i spoiny klejowej, a także od liczby warstw układu, stosunku grubości spoiny do grubości warstw drewna oraz od kierunku przyłożenia siły zginającej w stosunku do warstw belki (rys. 1, przypadki I i II).

W celu określenia modułu sprężystości giętej drewna warstwowego skorzystano z faktu, że sztywność zginania belki warstwowej jest równa sumie sztywności poszczególnych warstw drewna i spoin klejowych:

$$E_{wJ} = \sum_{i=1}^n E_d \cdot J_i + \sum_{j=1}^{n-1} E_s J_j. \quad (1)$$

Oś obojętna ( $z$ ) przekroju poprzecznego belki pokrywa się z jego osią symetrii. Wynika to z przyjętych założeń.

Następnie należy rozpatrzyć przypadki I i II działania siły zginającej względem belki (rys. 1).

Dla przypadku I poszczególne momenty bezwładności wynoszą:

$$J_I = \frac{1}{12} BH^3 = \frac{1}{12} B [nh + (n-1)s]^3 \quad (2)$$

$$J_{iI} = \frac{1}{12} Bh^3 + Bhd_i^2, \quad (3)$$

$$J_{jI} = \frac{1}{12} Bs^3 + Bse^2. \quad (4)$$

Porównując równania (1, 2, 3, 4) otrzymano równanie (5) opisujące moduł sprężystości  $E_{wL}$  układu warstwowego dla I przypadku obciążenia:

$$E_{wL} = \frac{n \frac{1}{12} BH^3 + \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} 2Bh(ih+is)^2}{\frac{1}{12} B [nh + (n-1)s]^3} E_d + \frac{(n-1) \frac{1}{12} Bs^3 + \sum_{j=1}^{\frac{n-1}{2}} 2Bs [(2j-1)\frac{h}{2} + (2j-1)\frac{s}{2}]^2}{\frac{1}{12} B [nh + (n-1)s]^3} E_s. \quad (5)$$

Wprowadzając współczynnik  $\beta$  określający względną grubość spoiny:

$$\beta = \frac{s}{H} \quad (6)$$

i mając na uwadze, że zgodnie z założeniem, że względna grubość spoiny jest:

$$\beta \ll 1$$

otrzymano po pominięciu liczb małych wyższego rzędu równanie:

$$E_{wL} = \frac{n+24(1+2n\beta) \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} i^2}{n^3 [1+3(n-1)\beta]} E_d + \frac{6n\beta \sum_{j=1}^{\frac{n-1}{2}} (2j-1)^2}{n^3 [1+3(n-1)\beta]} E_s. \quad (7)$$

Po zastąpieniu sum występujących w powyższym równaniu wyrażeniami:

$$\sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} i^2 = \frac{1}{24} n(n^2-1), \quad \sum_{j=1}^{\frac{n-1}{2}} (2j-1)^2 = \frac{1}{6} n(n-1)(n-2)$$

i po dalszych przekształceniach uzyskano ostatecznie równanie przedstawiające moduł sprężystości  $E_{w\perp}$ :

$$E_{w\perp} = \left[ 1 - \frac{(n-1)(n-2)}{n} \beta \right] E_d + \left[ \frac{(n-1)(n-2)}{n} \beta \right] E_s. \quad (8)$$

Dla II przypadku obciążenia (rys. 1) wzory na poszczególne momenty bezwładności są następujące:

$$J_{II} = \frac{1}{12} HB^3 = \frac{1}{12} [nh + (n-1)s] B^3, \quad (9)$$

$$J_{iII} = \frac{1}{12} hB^3, \quad (10)$$

$$J_{jII} = \frac{1}{12} sB^3. \quad (11)$$

Moduł sprężystości giętej  $E_{w\parallel}$  układu warstwowego dla tego przypadku obciążenia zgodnie z zależnością (1) wynosi:

$$E_{w\parallel} = \frac{n \frac{1}{12} hB^3}{\frac{1}{12} [nh+(n-1)s] B^3} E_d + \frac{(n-1) \frac{1}{12} sB^3}{\frac{1}{12} [nh+(n-1)s] B^3} E_s. \quad (12)$$

Po wprowadzeniu współczynnika  $\beta$ , pominięciu małych liczb wyższego rzędu i przekształceniach, otrzymano:

$$E_{w\parallel} = [1-(n-1)\beta] E_d + [(n-1)\beta] E_s. \quad (13)$$

Równania (8) i (13) można przedstawić w innej, dogodniejszej do ich analizy, postaci:

$$E_{w\perp} = E_d + (E_s - E_d) \frac{(n-1)(n-2)}{n} \beta, \quad (14)$$

$$E_{w\parallel} = E_d + (E_s - E_d)(n-1)\beta, \quad (15)$$

przy czym  $n = 3, 5, 7, \dots$

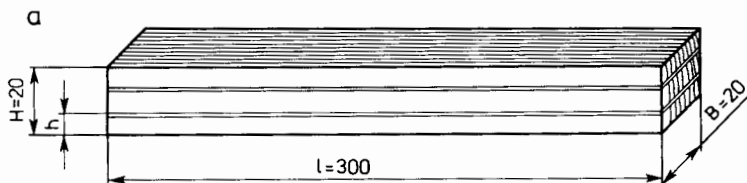
Analiza powyższych równań pozwala na stwierdzenie, że przy założeniu  $E_s > E_d$  moduł sprężystości  $E_{w||}$  układu warstwowego zginanego w płaszczyźnie równoległej do warstw jest większy od modułu  $E_{w\perp}$  odpowiadającemu zginaniu w płaszczyźnie prostopadłej do warstw układu warstwowego. Różnica wartości tych modułów

$$E_{w||} - E_{w\perp} = \frac{2(n-1)}{n} \beta (E_s - E_d)$$

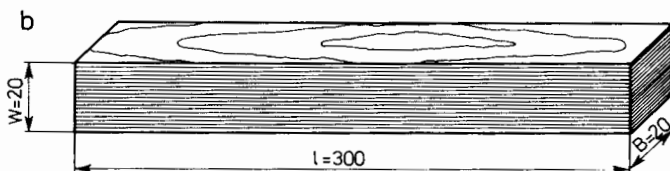
wzrasta przy tym ze wzrostem liczby warstw drewna.

#### OPIS BADAŃ

Przyjęto do badań próbki (rys. 2a) o osiach równoległych do przebiegu słoju drewna, sklejone równoległe płaszczyznami stycznymi lub promieniowymi. Zdecydowano się na wykonanie próbek 3- i 5-warstwowych sklejanych z deseczek o grubości (h), z drewna bukowego (rys. 2b) o jednakowych wymiarach.



Rys. 2a. Kształt i wymiary próbki 3-warstwowej sklejanej płaszczyznami promieniowymi



Rys. 2b. Kształt i wymiary próbki litej (nie sklejanej)

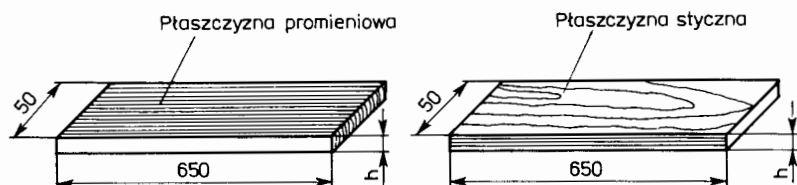
Wydaje się, że ze względu na przyjęte założenia badań wymagających idealnie równoległego przebiegu włókien do osi próbki i braku jakichkolwiek wad drewna ustalone wymiary próbek można uznać za optymalne. Pokrywają się one z wymiarami zalecanymi przez odpowiednie normy polskie i zagraniczne.

W sumie wykonano 5 typów próbek:

- 3-warstwowe, sklejane płaszczyznami promieniowymi i stycznymi,
- 5-warstwowe, sklejane płaszczyznami promieniowymi i stycznymi,
- z drewna litego nie sklejane wykonano z drewna bukowego.

Próbki wykonano z jednego bala rdzeniowego, pocięto na łąty o wymiarach 50 × 50 × 650 mm zachowując zgodność krawędzi przekroju poprzecznego wyciętych listew z kierunkami stycznymi i promieniowymi. Pocięty materiał przechowy

wano w pomieszczeniu o temperaturze 18-20°C i wilgotności powietrza 55-60%, aż do osiągnięcia przez nie wilgotności około 12%. Następnie cięto je na deseczki, które z kolei strugano na wymiar h. Wykonano dwa rodzaje deseczek. Deseczki pierwszego rodzaju (rys. 3) służyły do otrzymywania próbek warstwowych poprzez sklejenie warstw płaszczyznami promieniowymi, drugiego rodzaju (rys. 3) - poprzez sklejenie płaszczyznami stycznymi.



Rys. 3. Deseczki do wykonania układów warstwowych

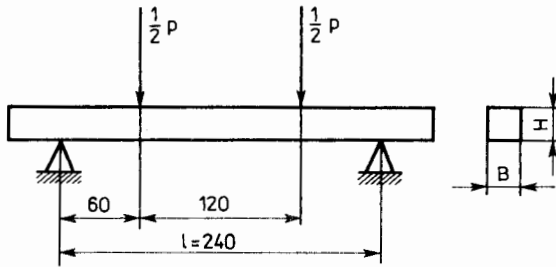
Deseczki do wykonywania belek 3-warstwowych miały wymiar  $h = 6,5 \pm 0,1$  mm, natomiast do wykonywania belek 5-warstwowych -  $h = 4,0 \pm 0,1$  mm.

Z danej łąty wykonywano deseczki jednego rodzaju o jednakowej grubości h, lub też przeznaczano ją na wykonanie próbek litych. Przestrzegano zasady pobierania z sąsiednich miejsc bala, łąt służących do wykonywania próbek różnego typu.

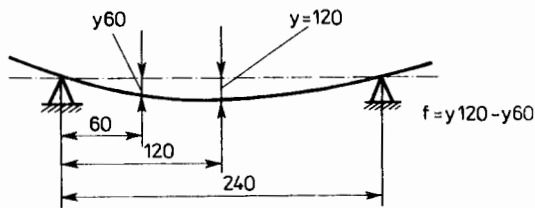
Bezpośrednio po wykonaniu deseczek sklejało je w układy 3 lub 5-warstwowe eliminując deseczki mające jakiegokolwiek wady lub też nieprawidłowości przebiegu włókien, czy też orientacji słoży rocznych względem krawędzi deseczek. Sklejone układy warstwowe przetrzymywano w ściskach stolarskich przez okres 24 godzin, a następnie wycinano z nich po 4 próbki danego typu, odcinając boczne części układów zawierające wyciśnięty klej. W końcu próbki te strugano na stały wymiar B. Jednocześnie z próbkami warstwowymi wykonywano próbki lite o identycznych wymiarach oraz stycznymi i promieniowymi zorientowaniu słoży rocznych, po 30 próbek w każdej grupie. Przeznaczone do badań próbki klimatyzowano przez okres 6 tygodni w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  przy wilgotności powietrza  $65 \pm 5\%$ .

Rozważając możliwe metody oznaczania modułu sprężystości przy zginaniu statycznym zdecydowano się zastosować, zgodnie z normą [8], metodę polegającą na czystym zginaniu próbki dwoma siłami (rys. 4). W przypadku tym na środkowym odcinku belki istnieje stan czystego zginania, co jest zaletą przyjętej metody. Moduł sprężystości E, który oznacza się poprzez pomiar wartości siły zginającej P i wielkości ugięcia f, jest w tym przypadku równy

$$E = \frac{3}{64} \frac{Pl^3}{BH^3f} 6,48 \cdot 10^6 \frac{P}{BH^3f} \text{ [MPa]}, \quad (16)$$



Rys. 4. Schemat obciążenia próbki przez zginanie

Rys. 5. Sposób określania strzałki ugięcia ( $f$ )

przy czym siła  $P$  wyrażona jest w daN, natomiast  $B$ ,  $H$  i  $f$  w mm. Sposób określania ugięcia  $f$  przedstawiono na rysunku 5.

Oznaczenie modułu sprężystości przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZD10/90 firmy Rauenstein posługując się specjalnie wykonanym układem napór oraz przyrządem zapewniającym pomiar ugięcia  $f$  według schematu przedstawionego na rysunku 5.

Przed pomiarami zasadniczymi wykonano badania wstępne w celu określenia wartości siły zginającej, tak aby z jednej strony była ona możliwie duża, a z drugiej aby nie powodowała powstawania naprężeń zbyt zbliżonych do granicy proporcjonalności lub sprężystości. Badania te przeprowadzone na kilku próbkach każdego typu wykazały, że przy wartości siły zginającej wynoszącej  $200 \div 250$  daN jeszcze nie pojawiają się odkształcenia trwałe, a przyrost odkształceń sprężystych jest proporcjonalny do przyrostu siły. Wartość siły niszczącej mieściła się w przedziale  $550 \div 650$  daN. W wyniku tych badań przyjęto wartość siły zginającej równą 80 daN, co jest zgodne z PN-75/D-04123.

Podczas badań zasadniczych próbkę obciążano równomiernie z prędkością 150 daN/min do wartości 80 daN, a następnie płynnie obciążano do wartości 30 daN powtarzając te czynności czterokrotnie. Przy ostatnich trzech obciążeniach mierzone ugięcie  $f_1$  przy sile zginającej  $P_1 = 30$  daN i ugięcie  $f_2$  przy sile  $P_2 = 80$  daN. Odczytu ugięć dokonywano po upływie 10 sekund od ustalenia siły  $P_1$  lub  $P_2$ . Po wy-



konaniu opisanej serii pomiarów próbkę obracano o  $180^{\circ}$  wokół jej osi i powtarzano pomiary ugięć w ten sam sposób.

Do badań wykorzystano zakres pomiarowy maszyny wynoszący  $0 \pm 200$  daN, przy którym mierzono wartość siły zginającej z dokładnością do  $0,5$  daN. Dokładność pomiaru ugięć wynosiła  $1 \mu\text{m}$ , co zapewniał czujnik zegarowy firmy Mitutoyo zamocowany w specjalnym przyrządzie.

Moduł sprężystości obliczano za pomocą następującego równania

$$E = 6,48 \cdot 10^9 \frac{\Delta P}{BH^3 \Delta f} \text{ [MPa]}, \quad (17)$$

w którym różnica  $\Delta P$  wartości sił zginających wynosi

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 50 \text{ daN},$$

B i H są wyrażone w mm, natomiast różnica ugięć  $\Delta f$  w  $\mu\text{m}$ .

Różnicę tę obliczano za pomocą wzoru

$$\Delta f = \frac{\Delta f' + \Delta f''}{2},$$

przy czym  $\Delta f'$  jest średnią różnicą ugięć  $f_2$  i  $f_1$  z trzech pomiarów przy pierwszym ustawieniu próbki,  $\Delta f''$  - średnią różnicą ugięć z trzech pomiarów dla drugiego, obróconego o  $180^{\circ}$ , ustawienia próbki.

Należy zaznaczyć, że różnice między  $\Delta f'$  i  $\Delta f''$  były nieznaczne, w większości przypadków bliskie zeru, w skrajnych przypadkach nie przekraczały 5%. Przy różnicach ugięć  $\Delta f$  wynoszących  $100 \pm 120 \mu\text{m}$  nie przekraczały więc  $6 \mu\text{m}$ .

Wymiary B i H przekroju poprzecznego mierzono w połowie długości próbki oraz w odległości  $60$  mm od każdego z jej końców, przyjmując do obliczeń średnie arytmetyczne wartości tych pomiarów. Posłużono się mikrometrem, tak że dokładność pomiaru była równa  $0,01$  mm.

Zarówno dla belek warstwowych, jak i dla litych moduły sprężystości oznaczano dwukrotnie. Belki warstwowe zginano siłami bądź prostopadłymi do warstw (przypadek I), bądź równoległymi (przypadek II). Belki lite zginano natomiast siłami skierowanymi stycznie do słoży rocznych, a następnie skierowanymi promieniowo.

W przypadku zginania siłami równoległymi do warstw, a dla belek litych w przypadkach zginania siłami skierowanymi stycznie wzór (17) należy zastąpić równaniem

$$E = 6,48 \cdot 10^9 \frac{\Delta P}{HB^3 \Delta f} \text{ [MPa]}. \quad (18)$$

Poza modułami sprężystości określano gęstość próbek poprzez pomiar ich mas oraz wymiarów B, H, L, a także ich wilgotność. Tę ostatnią oznaczano dla co piątej próbki danego typu stosując metodę suszarkowo-wagową.

#### DOKŁADNOŚĆ WYKONANIA BADAŃ

Błąd oznaczania modułu sprężystości zależy od błędów pomiaru mierzonych wielkości, a więc od błędów pomiaru: siły zginającej P, ugięcia  $\Delta f$  oraz wymiarów B i H. Błędy te, które oznaczono odpowiednio przez  $\Delta(\Delta P)$ ,  $\Delta(\Delta f)$ ,  $\Delta B$  i  $\Delta H$ , wynikają z dokładności urządzeń pomiarowych i wynoszą

$$\Delta(\Delta P) = 0,5 \text{ daN}, \quad \Delta(\Delta f) = 1 \text{ } \mu\text{m}, \quad \Delta B = \Delta H = 0,01 \text{ mm}.$$

Błąd bezwzględny oznaczania modułu sprężystości określony jest następującym wzorem, który można uzyskać m.in. za pomocą metody różniczki zupełnej

$$\Delta E = \left| \frac{\partial E}{\partial P} \right| \Delta(\Delta P) + \left| \frac{\partial E}{\partial B} \right| \Delta B + \left| \frac{\partial E}{\partial H} \right| \Delta H + \left| \frac{\partial E}{\partial f} \right| \Delta(\Delta f). \quad (19)$$

Na podstawie zależności (17) i (18) otrzymano

$$\Delta E = \left[ \frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} + \frac{\Delta B}{B} + 3 \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta(\Delta f)}{\Delta f} \right] E \quad (20)$$

dla belek warstwowych zginanych w płaszczyźnie prostopadłej do warstw i dla belek zginanych w płaszczyźnie promieniowej oraz

$$\Delta E = \left[ \frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P} + 3 \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta(\Delta f)}{\Delta f} \right] E \quad (21)$$

dla belek warstwowych zginanych w płaszczyźnie równoległej do warstw i dla belek litych zginanych w płaszczyźnie stycznej.

Błędy względne określenia modułów sprężystości określono na podstawie równania

$$\delta E = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100\%. \quad (22)$$

Bazując na wartościach nominalnych wymiarów B i H, a więc przyjmując  $B = H = 20 \text{ mm}$  oraz przyjmując  $\Delta P = 50 \text{ daN}$ ,  $\Delta f = 100 \div 120 \text{ } \mu\text{m}$  otrzymano

$$\delta E = 1,00\% + 0,0\% + 0,15\% + (0,83 \div 1,00) \%,$$

przy czym pierwszy składnik (1%) dotyczy siły zginającej, a ostatni (0,83%÷1,00%) - ugięcia belki. Jak widać dokładność pomiaru tych wielkości odgrywa decydującą rolę, jeśli chodzi o dokładność oznaczania modułu sprężystości.

W tabeli 3 podano błędy oznaczania modułów sprężystości dla poszczególnych typów próbek odniesione do wartości  $\bar{E}$  modułów sprężystości dla danego typu próbek.

#### ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań nad sprężystością drewna warstwowego podano w tabelach 1 i 2, w których poza wartościami modułów sprężystości zamieszczono także wyniki oznaczania gęstości i wilgotności drewna. Średnia gęstość drewna warstwowego składającego się z 3 warstw była równa średniej gęstości drewna litego, natomiast dla drewna sklejanego z 5 warstw była nieco większa (o 2,8%) w związku ze zwiększonym udziałem kleju. Przyjęto zatem, że gęstość drewna jest stała dla wszystkich typów próbek, podobnie jak jego wilgotność wynosząca około 12%.

Współczynniki zmienności będące miarą rozrzutu wyników badań wynosiły 2,2;4,3%. Tak niskie, jak dla właściwości mechanicznych drewna, wartości tych współczynników wynikają z faktu wykonania wszystkich próbek z jednej próbki pierwotnej oraz z dużej staranności ich wykonania i eliminowania próbek z jakimikolwiek wadami.

Przechodząc do średnich wartości modułów sprężystości można zauważyć bardzo małe różnice między poszczególnymi typami próbek. Przy tym wartości te dla próbek warstwowych są nieco większe niż dla próbek litych, z wyjątkiem próbek 5-warstwowych sklejanych płaszczyznami promieniowymi i zginanych prostopadłe do warstw. Zaznaczyć należy, że różnice między średnimi wartościami modułów sprężystości dla różnych typów próbek są przeważnie mniejsze od wartości błędów bezwzględnych oznaczania modułów sprężystości (tab. 3). W związku z tym dalsze porównania wartości modułów sprężystości należy traktować jako przybliżone.

Jednym z celów badań sprężystości belek warstwowych było ustalenie wpływu kierunku zginania w stosunku do słoży rocznych. Było to możliwe dzięki wykorzystaniu próbek warstwowych sklejanych płaszczyznami promieniowymi i próbek sklejanych płaszczyznami stycznymi. Próbki te umożliwiły wyznaczenie modułów sprężystości przy stycznym i promieniowym kierunku działania siły zginającej względem słoży rocznych. Zarówno przy zginaniu próbek w płaszczyźnie prostopadłej do warstw, jak i w płaszczyźnie równoległej do warstw różnice między wartościami średnimi modułów sprężystości przy promieniowym i stycznym działaniu siły zginającej są nieduże, zwłaszcza dla próbek 3-warstwowych. Podobnie jest dla próbek litych zginanych w płaszczyźnie promieniowej i stycznej. W związku z tym uznano, że wartość modułu sprężystości przy zginaniu nie zależy od kierunków zginania i postanowiono potraktować próbki o danej liczbie warstw jako jedną partię niezależnie od tego, czy warstwy są sklezione płaszczyznami promieniowymi, czy stycznymi. Dla tak rozumianych partii próbek warstwowych obliczono średnie wartości modułów sprężystości, które zamieszczono w tabeli 4.

T a b e l a 1

Wartości modułów sprężystości dla próbek sklejaných warstwowo płaszczynami styczynymi

Kierunek zginania w stosunku do słoĩ rocznych	Gęstość drewna g/cm <sup>3</sup>		Wilgotność drewna (%)	Moduł sprężystości MPa		Odchylenie standardowe (MPa)	Współczynnik zmienności (%)		
	min	średnio maks		E <sub>min</sub>	E <sub>maks</sub>				
Z drewna litego i obciążane promieniowo	0,69	0,71	0,73	11,6-12,1	17 100	18 500	19 600	690	3,7
styczynnie					17 300	18 400	19 400	590	3,2
Trzywarstwowe i obciążane prostopadle do płaszczyny sklejaną promieniowo	0,70	0,71	0,73	11,7-11,9	17 600	18 500	19 900	800	4,3
równolegle do płaszczyny sklejaną, styczynnie					17 400	18 500	19 200	630	3,4
Pięciowarstwowe i obciążane prostopadle do płaszczyny sklejaną, promieniowo	0,71	0,73	0,73	11,9-12,4	18 200	18 900	20 000	590	3,1
równolegle do płaszczyny sklejaną, styczynnie					17 600	18 900	20 100	730	3,9

Wartości modułów sprężystości dla próbek sklejaných warstwowo płaszczyznami promieniowymi

Kierunek zginania w stosunku do słoż rocznych	Gęstość drewna g/cm <sup>3</sup>		Wilgotność drewna (%)	Moduł sprężystości (MPa)		Odchylenie standardowe (MPa)	Współczynnik zmienności (%)		
	min	średnio maks		E <sub>min</sub>	E			E <sub>maks</sub>	
Z drewna litego i obciążane stycznie	0,69	0,71	0,73	11,6-12,1	17 300	18 400	19 400	590	3,2
promieniowo					17 100	18 500	19 600	690	3,7
Trzywarstwowe i obciążane równolegle do płaszczyzny sklejanania stycznie	0,68	0,71	0,73	11,5-11,9	17 700	18 500	19 200	530	2,9
promieniowo					17 800	18 600	19 400	480	2,6
Pięciowarstwowe i obciążane równolegle do płaszczyzny sklejanania stycznie	0,70	0,73	0,75	11,7-12,2	17 500	18 300	19 000	400	2,2
promieniowo					17 600	18 500	19 200	500	2,7

T a b e l a 3

## Błędy oznaczania modułów sprężystości

Liczba warstw	Warstwy sklejjane płaszczyznami	Kierunek zginania w stosunku do słoii rocznych i płaszczyzny sklejjania	Średnia wartość modułu sprężystości (MPa)	Błąd bezwzględny (MPa)	Błąd względny (%)
1	drewno lite	styczny	18 400	370	2,0
		promieniowy	18 500	390	2,1
3	promieniowymi	prostopadłe	18 500	370	2,0
		równoległe	18 600	370	2,0
	stycznymi	prostopadłe	18 500	370	2,0
		równoległe	18 500	370	2,0
5	promieniowymi	prostopadłe	18 300	380	2,1
		równoległe	18 500	380	2,1
	stycznymi	równoległe	18 900	420	2,2
		prostopadłe	18 900	400	2,1

T a b e l a 4

## Moduły sprężystości dla próbek warstwowych i litych oraz próbek zginanych prostopadłe i równoległe dla płaszczyzn sklejjanych

Rodzaj próbki	Kierunek zginania w stosunku do płaszczyzn sklejjania	Średnia wartość modułu sprężystości (MPa)	Względny przyrost modułu sprężystości próbek warstwowych względem próbek litych (%)	Względna różnica modułów sprężystości próbek zginanych prostopadłe i równoległe do płaszczyzn sklejjania (%)
Lita		18 450	-	-
Trzywarstwowa	prostopadły	18 500	0,27	0,27
	równoległy	18 550	0,54	
Pięciowarstwowa	prostopadły	18 600	0,81	0,54
	równoległy	18 700	1,35	

Podobnie potraktowano próbki lite obliczając moduł  $E_1$  będący średnią arytmetyczną modułów odpowiadających zginaniu tych próbek w płaszczyźnie promieniowej i stycznej. Otrzymane w ten sposób średnie wartości modułów sprężystości próbek warstwowych i litych należy uznać za bardziej reprezentatywne, jako odniesione do większej liczby próbek, czy też większej liczby pomiarów.

W tabeli 4 podano też względne przyrosty modułów sprężystości próbek warstwowych względem próbek litych. Jak widać przyrosty te dla próbek 5-warstwowych są większe niż dla 3-warstwowych, co potwierdza rozważania teoretyczne przy założeniu, że moduł sprężystości spoiny klejowej jest większy niż moduł sprężystości drewna. Potwierdzeniem tych rozważań jest również fakt, że moduły  $E_{wII}$  odpowiadające belkom zginanym w płaszczyźnie równoległej do warstw są większe od modułów  $E_{wI}$  odpowiadających zginaniu w płaszczyźnie prostopadłej do warstw. Względna różnica wartości tych modułów podana w tabeli 4 jest przy tym większa dla belek 5-warstwowych niż dla 3-warstwowych. Dodać można, że dla poszczególnych próbek różnica ta nie przekroczyła 4,4%, co pokrywa się z innymi wynikami badań [9].

#### ANALIZA OKREŚLANIA MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI SPOINY KLEJOWEJ

Doświadczalne potwierdzenie zależności teoretycznych opisanych równaniem 14 i 15 określających moduły sprężystości belek warstwowych okazało się niemożliwe z dwóch powodów. Po pierwsze ze względu na brak znajomości modułu sprężystości spoiny klejowej, po drugie z powodu niemożności dokładnego ustalenia grubości spoiny klejowej. Ewentualne oznaczanie modułu sprężystości kleju na próbkach wykonanych z kleju miałyby się z celem, gdyż właściwości spoiny klejowej różnią się zasadniczo od właściwości utwardzonej masy klejowej. W literaturze brak jest, o czym wspominało, danych dotyczących modułów sprężystości spoin klejowych wykonanych z różnych gatunków klejów. Ten stan jest spowodowany trudnością pomiaru odkształceń sprężystych tak cienkiej i w dodatku nieregularnej warstwy jaką tworzy spoina klejowa. Druga trudność to pomiar grubości tej warstwy, która poza nieregularnością charakteryzuje się brakiem wyraźnej granicy penetracji kleju w drewno.

Możliwość pominięcia tych trudności należy szukać w metodach pośrednich oznaczania modułu sprężystości spoiny, eliminujących bezpośredni pomiar jej odkształceń. Metoda jaką opisano w literaturze [8], polegała na obliczaniu modułu sprężystości spoiny utworzonej z kleju taninowo-formaldehidowego, łączącej forniry sklejk sosnowej. Porównywano wzory teoretyczne określające moduł sprężystości giętej sklejki z zależnościami empirycznymi, wyznaczając moduł sprężystości spoiny jako wielkość niewiadomą. Obliczona wartość modułu sprężystości spoiny wynosząca 21980 MPa była znacznie wyższa od wartości modułu sprężystości drewna, bo wynosząca 13200 MPa.

Próbie określenia modułu sprężystości spoiny klejowej za pomocą metody pośredniej podjęto również w niniejszej pracy. W tym celu wyznaczono najpierw wzory teoretyczne określające moduł sprężystości  $E_s$  spoiny klejowej. Na podstawie równań 14 i 15, po uwzględnieniu zależności (6), otrzymano

$$E_s = E_d + (E_{w\perp} - E_d) \frac{n}{(n-1)(n-2)} \frac{H}{s} \quad (23)$$

oraz

$$E_s = E_d + (E_{w\parallel} - E_d) \frac{1}{n-1} \frac{H}{s}. \quad (24)$$

Jednym z czynników wpływających na wielkość modułu sprężystości spoiny klejowej jest jej grubość  $s$ . Jak już zaznaczono, ustalenie tej grubości jest bardzo trudne ze względu na jej zmienność i brak wyraźnej granicy warstwy kleju, która wniknęła w drewno. Wyrywkowe pomiary tej grubości za pomocą mikroskopu pomiarowego wykazały, że zmienia się ona w granicach 150÷250  $\mu\text{m}$ . Pomiary te obarczone były dużym błędem wynikającym z określonej dokładności przyrządu pomiarowego i z niepewności w ustaleniu granicy spoiny klejowej. Zrezygnowano więc z określenia grubości spoiny na poszczególnych próbkach tym bardziej, że wymagałoby ono przeprowadzenia wielopunktowych, zmuśnych pomiarów. Opierając się na danych literaturowych [1, 6, 10] dotyczących grubości spoiny klejowej dla różnych klejów i gatunków drewna przyjęto, że może zawierać się ona w przedziale 100÷400  $\mu\text{m}$ .

Podstawiając do wzorów (23) i (24) wartości  $E_d$  i  $E_w$  z tabeli 4,  $H = 20$  mm oraz przyjmując dla grubości spoiny 4 możliwe wartości: 100, 200, 300 i 400  $\mu\text{m}$ , obliczono wartości modułu sprężystości spoiny klejowej (tab. 5). Ponadto zobrazowano na wykresie 6 zależność modułu sprężystości spoiny od jej grubości. Wartość modułu  $E_s$  obliczano 4-krotnie bazując na 4 wartościach  $E_w$  odpowiadających zginaniu belek 3 i 5-warstwowych w dwu różnych płaszczyznach. Widoczna jest duża zbieżność wyników, np. dla grubości spoiny  $s = 200$   $\mu\text{m}$ , wartość modułu  $E_s$  wynosi 23450–25950 MPa. Wydaje się, że grubość ta może być przyjęta jako średnia grubość spoiny wykonanej z kleju polioctanowinyloвого Wikol łączącej równoległowiądknicie drewno bukowe i w związku z tym można przyjąć, że wartość modułu sprężystości tej spoiny mieści się w granicach 23450÷25950 MPa przy dodatkowym założeniu, że średnia wartość modułu sprężystości giętej drewna bukowego wynosi 18450 MPa.

## WNIOSKI

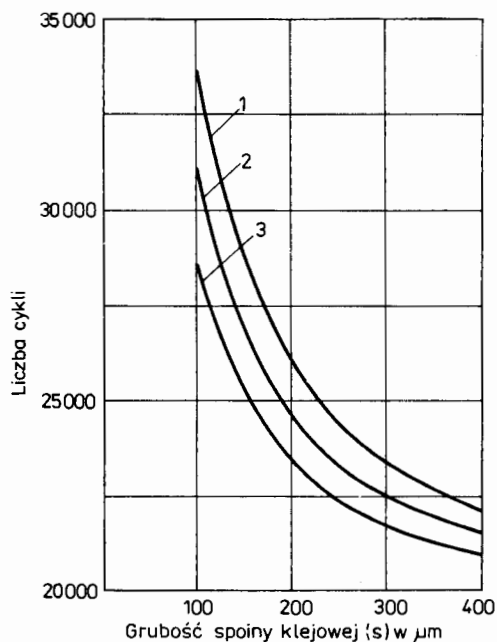
1. Moduł sprężystości elementów z drewna bukowego warstwowo sklejanych, aczkolwiek nieznacznie wzrasta wraz z powiększaniem liczby warstw, to jednak dla ce-



T a b e l a 5

Wielkość modułów sprężystości spoiny klejowej o różnej grubości spoiny (s)

Podstawa ustalenia mo- dułu sprężystości spoi- ny klejowej	Moduł sprężystości $E_s$ spoin klejowych o różnej grubości (w $\mu\text{m}$ )			
	100	200	300	400
<b>Belka 3-warstwowa</b>				
zginana prostopadłe do warstw sklejanania	33 450	25 950	23 450	22 200
zginana równoległe do warstw sklejanania	28 450	23 450	21 800	20 950
<b>Belka 5-warstwowa</b>				
zginana prostopadłe do warstw sklejanania	30 950	24 700	22 600	21 600
zginana równoległe do warstw sklejanania	30 950	24 700	22 600	21 600



Rys. 6. Zależność modułu sprężystości spoiny klejowej od jej grubości: 1 - próbka trzywarstwowa, obciążana prostopadłe do powierzchni sklejanania, 2 - próbka pięciwarstwowa, obciążana równoległe i prostopadłe do powierzchni sklejanania, 3 - próbka trzywarstwowa, obciążana równoległe do powierzchni sklejanania

łów praktycznych można przyjąć, iż wspomniany moduł nie zależy od liczby sklejaných warstw drewna.

2. Wartość modułu sprężystości elementów warstwowo sklejaných określona przez zginanie nie zależy od kierunku zginania w odniesieniu do płaszczyzny sklejanía.

3. Stwierdzono nieznaczne różnice między modułem sprężystości elementów sklejaných warstwowo i elementów z drewna litego, nie sklejaných. Być może, wynika to z faktu doboru próbek o niewielkich wymiarach i pozbawionych naturalnych wad drewna.

4. Stwierdzone nieznaczne różnice między modułem sprężystości elementów sklejaných warstwowo a drewnem litym mogą być pomocne przy określeniu modułu sprężystości spoiny kleju poliocetanowinylowego Wikol .

5. Przeprowadzone teoretyczne rozważania i otrzymane stąd równania opisujące związki pomiędzy poszczególnymi czynnikami, pozwalają na przybliżone określenie modułów sprężystości elementów warstwowo sklejaných (równania 14 i 15 oraz 23 i 24).

#### LITERATURA

1. Clad W.: Über das Wesen einer Verklebung und die Fugenelastizität ausgeharterter Leimfugen bei Holzverleimungen. Technischen Hochschule, Stuttgart 1964.
2. Clad W.: Über die Fugenelastizität ausgeharterter Leimfugen bei Holzverleimung. Holz als Roh- und Werkstoff, 1965, 23, 2, 58-67.
3. Curry W. I.: Grade Stresses for Structural Laminated Timber. For. Prod. Res. Bull., 53, London 1970.
4. Keylwerth R.: Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenholzer. VDJ-Forschungsheft 430, Deutscher Ingenieur-Verlag GmbH, Düsseldorf 1951.
5. Koch P., Bohannon B.: Beam strength as affected by placement of laminae. For. Prod. J., 1965, 1965, 15, 7, 289-295.
6. Korzeniowski A.: Badania nad modułem sprężystości warstwowego układu drewno-klej mocznikowy. Fol. For. Pol., Ser. B, 1965, 6, 181-269.
7. Okuma M.: Plywood properties influenced by the glue line. Wood Sci. Techn., 1976, 10, 57-68.
8. PN-75/D-04123: Drewno. Oznaczenie modułu sprężystości przy zginaniu statycznym w strefie czystego zginania.
9. Sobolev J. S.: Issliedovanie zavisimosti modulja uprygosti klejenoj drevesiny pri statičeskom izgibie ot masštabnowo faktora. Lesn. Žur., 1976, 5, 58-63.
10. White M. S.: Influence of resin penetration on the fracture toughness of wood adhesive bonds. Wood Sci., 1977, 10, 1, 6-14.
11. Wolfe R. W., Moody R. C.: Bending strength of vertically glued laminated beams with one to five plies. USDA Forest Serv. Res. Pap., FPL 333, Forest Prod. Lab., Madison, Wisconsin 1979.

Станислав Дзєнгєлевски, Арнольд Вильчиньски

## УПРУГОСТЬ СКЛЕИВАЕМЫХ ПОСЛОЙНО МЕБЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

## Р е з ю м е

Соответствующие исследования охватывали послойно склеиваемую букую древесину предназначенную на выбранные конструкционные мебельные элементы. Целью исследований было определение упругостных свойств этих элементов совместно с определением зависимости между модулями упругости послойно склеиваемых элементов с различным числом слоев, их толщины и направления сгиба. Для достижения указанной цели проводились теоретические исследования с последующей проверкой на основании результатов экспериментальных изысканий. Проведенные анализы показали, что модуль упругости элементов из буковой древесины склеиваемой послойно не зависит от числа слоев ни от вида используемого клея. Примерно так же представляются прочность и деформации.

Stanisław Dzięgielewski, Arnold Wilczyński

## ELASTICITY OF FURNITURE ELEMENTS GLUED BY LAYERS

## S u m m a r y

The respective investigations comprised the beech wood glued by layers, designed for selected constructional furniture elements. The aim of the investigations was to determine elastic properties of the wooden elements jointly with determination of relationships between the elasticity modules of the by-layer glued elements of different number of layers, their thickness and bending direction. To attain this aim, theoretical investigations were carried out with their subsequent verification on the basis of the experimental investigation results. The investigations have proved that the elasticity module of beech wood elements glued by layers does not depend on the number of layers and the glue kind used. Strength and deformations are formed similarly.