

Arnold Wilczyński  
WSP w Bydgoszczy

## METODA BADANIA WŁAŚCIWOŚCI SPRĘŻYSTYCH SPOINY KLEJOWEJ ŁĄCZĄCEJ ELEMENTY DREWNIANE

### 1. Wstęp

W procesie projektowania drewnianych konstrukcji klejonych istotne znaczenie ma znajomość właściwości mechanicznych, w tym właściwości sprężystych spoin klejowych. Ze względu na sposób obciążenia większości złączy konstrukcyjnych – są one poddawane ścinaniu – podstawową stałą sprężystości spoiny jest jej moduł sprężystości postaciowej (moduł ścinania).

Wydawać by się mogło, że wyznaczenie tej stałej sprężystości może być zrealizowane w prosty sposób na specjalnych próbkach odlanych z kleju (np. [3, 8, 15]). Jednak, jak wykazuje wielu badaczy [1, 2, 5, 7, 10, 12, 19], właściwości sprężyste spoiny klejowej, czyli cienkiej warstwy zestalonego kleju powiązanej z powierzchniami sklejonych elementów, różnią się zasadniczo od właściwości tego samego kleju zestalonego w dużej masie, np. w postaci próbki walcowej. Dlatego też określanie modułu ścinania, który ma charakteryzować zachowanie się spoiny w konstrukcjach drewnianych, powinno odbywać się na próbkach zawierających naturalną spoinę klejową.

Wśród istniejących metod wyznaczania modułu ścinania spoiny klejowej przeważają metody bezpośrednie, polegające na pomiarze odpowiednich odkształceń połączenia. Stan ścinania spoiny wytwarza się albo przez wzajemny przesuw sklejonych elementów wzdłuż płaszczyzny sklejenia, albo przez wzajemny obrót tych elementów wokół osi prostopadłej do tej płaszczyzny.

Zasada przesuwu sklejonych elementów wykorzystana jest w normach amerykańskich ASTM D 3983–81 [21] i ASTM D 4027–81 [22] oraz w badaniach Hsu, Hoyle [6]; Kriegera [10]; Rivera [13] i Seago [14]. Obowiązuje przy tym założenie, że moduł ścinania spoiny klejowej jest znacznie mniejszy od modułu

klejonych materiałów, np. według ASTM D 3983 wartość modułu ścinania spoiny klejowej nie może w przypadku klejenia drewna przekraczać 50 MPa. Założenie to wynika z faktu, że dokonuje się pomiaru odkształcenia całego połączenia i pomija się odkształcenia elementów klejonych jako małe w porównaniu z odkształceniami spoiny.

Również zasadę przesuwu sklejonnych elementów stosował Clad [2, 3]. Mierzył on jednak nie całkowite odkształcenie próbki, lecz przemieszczenie dwóch przeciwnych, oddalonych od siebie na grubość spoiny punktów, wyznaczając kąt odkształcenia postaciowego spoiny. W celu uzyskania mierzalnych wartości tego przemieszczenia stosował duże obciążenie próbki, wywołując w spoinie średnie naprężenie ścinające o wartości 5 MPa. Przy cienkich spoinach przemieszczenie to wynosiło na ogół 3  $\mu\text{m}$  i było mierzone z dokładnością do 1  $\mu\text{m}$ . Następnie ekstrapolował uzyskane odkształcenia do poziomu naprężenia w spoinie równego 0,5 MPa i obliczał moduł ścinania spoiny. Duży błąd pomiarowy, a przede wszystkim niepewność co do sposobu ekstrapolacji odkształceń spoiny stanowią wadę metody Clada.

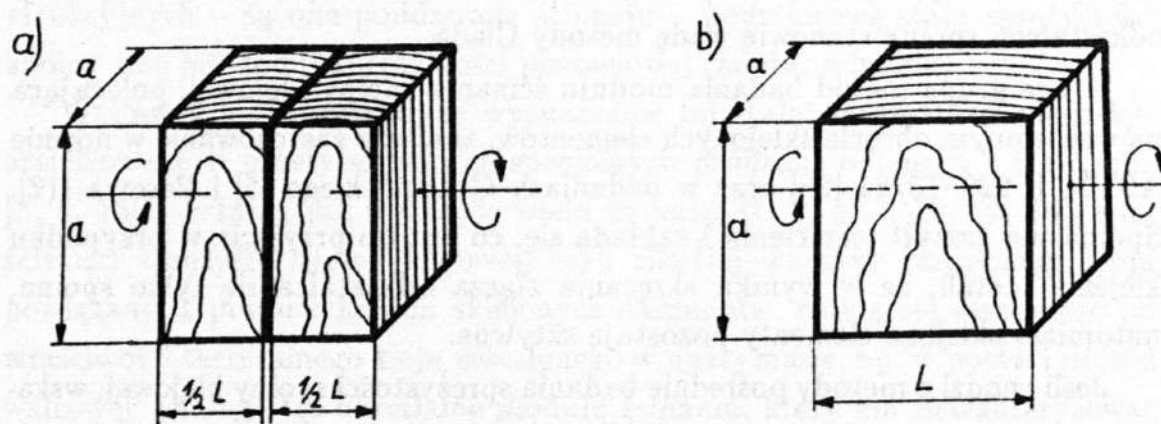
Druga grupa metod badania modułu ścinania spoiny klejowej, polegająca na wzajemnym obrocie sklejonnych elementów, znalazła zastosowanie w normie ASTM E 229-70/81 [20] oraz w badaniach Grudzińskiego [5] i Peretza [12]. Spoina ma kształt pierścienia i zakłada się, co jest do przyjęcia w przypadku klejenia metali, że w wyniku skręcania złącza odkształca się tylko spoina, natomiast sklezione elementy pozostają sztywne.

Jeśli chodzi o metody pośrednie badania sprężystości spoiny klejowej, wskazać należy na metodę akustyczną [7], polegającą na wykorzystaniu ultradźwiękowych fal powierzchniowych. Metoda ta ma jak dotychczas ograniczone zastosowanie, gdyż operuje wzorami empirycznymi zakładającymi izotropię sklejanym materiałów. Warto na zakończenie wspomnieć o metodach pośrednich, które zastosowali Okuma [11], Korzeniowski [9] i Dziegielewski, Wilczyński [4]. Polegają one na pomiarze odkształceń poddanych zginaniu układów sklejonnych warstwowo z fornirów lub deseczek i wykorzystaniu odpowiednich związków teoretycznych dla tych układów. Celem ich jest jednak wyznaczenie nie modułu ścinania, lecz modułu Younga spoiny klejowej.

Wymienione metody badania właściwości sprężystych spoiny klejowej dotyczą złączy utworzonych z różnych materiałów konstrukcyjnych. W odniesie-

niu do układu drewno – klej – drewno mają ograniczone zastosowanie, pozwalają na wyznaczenie (np. normy [21, 22]) modułu ścinania tylko dla spoin wykonanych z klejów, których podatność na odkształcenia jest znacznie większa niż podatność drewna.

Biorąc pod uwagę powyższy niedostatek, autor opracował nową metodę określania modułu ścinania spoiny klejowej, łączącej elementy drewniane, przedstawioną w pracy [16]. Wykorzystuje się w niej zasadę skręcania złącza wokół osi prostopadłej do płaszczyzny spoiny. Spoina klejowa ma postać kwadratu, a idea metody sprowadza się do porównania odkształceń dwóch próbek: klejonej (rys. 1a) i bliźniaczej geometrycznie i materiałowo próbki litej (rys. 1b). Badania opisane w pracy [16] potwierdziły poprawność metody, wskazując jednocześnie na jej wadę – duży, rzędu 30%, błąd pomiarowy.



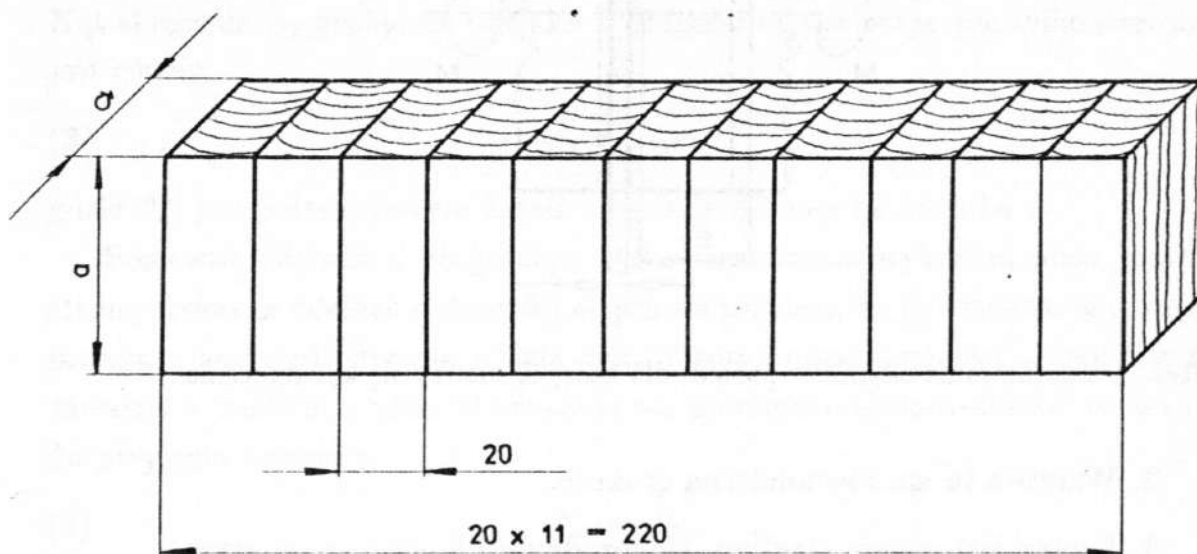
Rys. 1. Próbkę do badania modułu ścinania spoiny klejowej wykorzystane w pracy [16]: a – próbka klejona, b – bliźniacza próbka lita

Dążąc do opracowania pewniejszej metody wyznaczania modułu ścinania spoiny klejowej w drewnie w pracy niniejszej przedstawiono kolejną propozycję, polegającą na udoskonaleniu wcześniejszej metody autora. Ponadto omówiono badania, których celem była weryfikacja nowej metody badawczej. Badania te przeprowadzono na specjalnym, prototypowym stanowisku pomiarowym opisanym szczegółowo w pracy [17].



## 2. Metoda wyznaczania modułu ścinania spoiny klejowej

Podobnie jak w pracy [16] przyjęto, że stan ścinania spoiny klejowej uzyskuje się przez wzajemny obrót sklejoných elementów drewnianých oraz że powierzchnia spoiny ma kształt kwadratu. Próbkę zawierającą jedno złącze klejowe zastąpiono próbką wielospoinową przedstawioną na rys. 2.

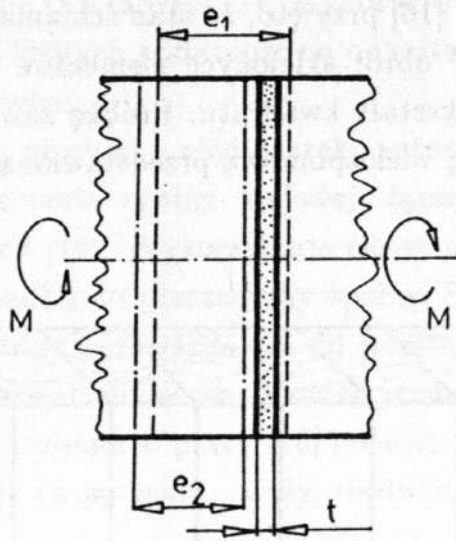


Rys. 2. Próbką wielospoinową do wyznaczania modułu ścinania spoiny klejowej,  
 $a = 50 \text{ mm}$

Podstawą określania wartości modułu ścinania spoiny klejowej jest pomiar jej odkształceń sprężystych wywołanych skręcaniem próbki. Ze względu na małą grubość spoiny bezpośredni pomiar tych odkształceń byłby trudny do przeprowadzenia z dostateczną dokładnością. Dlatego posłużono się metodą porównawczą mierząc i porównując odkształcenia dwóch odcinków próbki o długościach większych od grubości spoiny, z których pierwszy ( $e_1$ ) zawiera spoinę klejową, a drugi ( $e_2$ ) obejmuje strefę drewna sąsiadującego ze spoiną (rys. 3).

Przystępując do wyprowadzenia zależności teoretycznych przyjęto następujące założenia dotyczące spoiny klejowej:

1. Spoina klejowa jest warstwą zestalonej masy klejowej zawartą między powierzchniami sklejoných elementów,



Rys. 3. Usytuowanie odcinków próbki, dla których mierzy się kąt skręcenia

2. Warstwa ta ma równomierną grubość,
3. Spoina jest ciałem ciągłym, jednorodnym i liniowo sprężystym.

Założenie 1 odpowiada definicji zawartej w normie PN-64/D-01004 [23]. Wynika z niego, że do spoiny nie należą warstewki kleju, które wniknęły w drewno. Założenie 2 o równomiernej grubości spoiny jest oczywiście, przede wszystkim w związku z nieuniknioną chropowatością sklejaných powierzchni drewna, pewnym przybliżeniem, tym lepszym, im mniejsza jest ta chropowatość. Odpowiada zastąpieniu rzeczywistej spoiny klejowej modelem w postaci warstewki o stałej grubości, odkształcającym się tak jak spoina. Przyjęto, że grubość ta jest równa średniej grubości spoiny rzeczywistej. Założenie o liniowej sprężystości jest słuszne dla większości klejów i to dla dość dużego zakresu obciążeń. Jeśli tylko temperatura i wilgotność powietrza nie przekraczają określonych wartości, to jak wykazano w wielu pracach (np. [5, 8, 12, 14]), spoina charakteryzuje się liniową, zgodną z prawem Hooke'a, zależnością naprężenie – odkształcenie, a granica proporcjonalności jest nie niższa niż 30% wytrzymałości doraźnej spoiny.

Rozpatrzmy odkształcenia próbki. Kąt skręcenia  $\varphi_1$  próbki na jej odcinku o długości  $e_1$  zawierającym spoinę klejową o grubości  $t$  jest sumą kąta  $\varphi_d$

skręcenia drewna zawartego w tym odcinku i kąta  $\varphi_s$  skręcenia spoiny:

$$(1) \quad \varphi_1 = \varphi_d + \varphi_s.$$

Wprowadzając jednostkowy kąt  $\vartheta_{d1}$  skręcenia drewna na odcinku  $e_1$  otrzymujemy:

$$(2) \quad \varphi_1 = \vartheta_{d1}(e_1 - t) + \varphi_s.$$

Kąt skręcenia  $\varphi_2$  próbki na odcinku o długości  $e_2$  zawierającym tylko drewno jest równy:

$$(3) \quad \varphi_2 = \vartheta_{d2}e_2,$$

gdzie  $\vartheta_{d2}$  jest jednostkowym kątem skręcenia drewna na odcinku  $e_2$ .

Ponieważ odcinek o długości  $e_1$  tylko nieznacznie wykracza poza prawą stronę spoiny, a odcinek o długości  $e_2$  prawie przylega do jej lewej strony, więc przeważająca część drewna objęta tymi dwoma odcinkami jest jednocześnie zawarta w każdym z nich. Upoważnia to, pomimo niejednorodności drewna, do przyjęcia założenia:

$$(4) \quad \vartheta_{d1} = \vartheta_{d2},$$

po uwzględnieniu którego otrzymujemy na podstawie związków (2) i (3) następujący wzór:

$$(5) \quad \varphi_s = \varphi_1 - \varphi_2 \frac{e_1 - t}{e_2},$$

pozwalający określić kąt skręcenia spoiny klejowej poprzez pomiar kątów skręcenia  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$ .

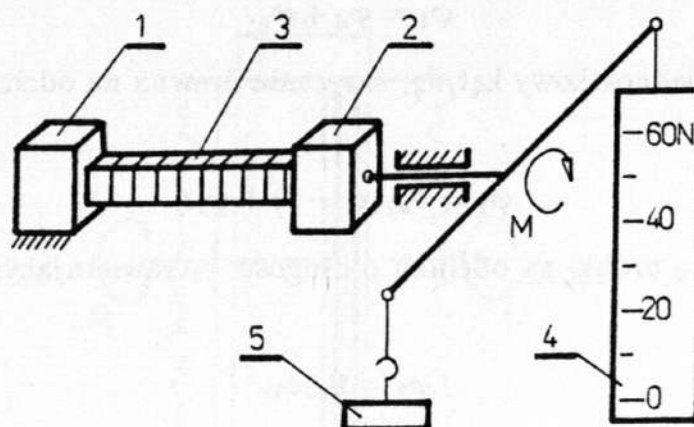
Znając kąt  $\varphi_s$ , możemy na podstawie teorii skręcania de Saint-Venanta dla pręta o przekroju prostokątnym wyznaczyć moduł ścinania  $G_s$  spoiny klejowej:

$$(6) \quad G_s = \frac{Mt}{\alpha a^4 \varphi_s},$$

gdzie  $M$  jest wartością momentu skręcającego próbkę,  $a$  – długością boku przekroju próbki,  $\alpha$  – współczynnikiem zależnym od stosunku długości boków przekroju próbki, dla przekroju kwadratowego  $\alpha = 0,1406$ .

W przedstawionej metodzie wymagana jest duża precyzja pomiaru odkształceń próbki, a także odpowiednia dokładność ustalania wartości jej obciążenia. Zapewnia to skręcarka, której konstrukcję i parametry techniczne

opisano szczegółowo w pracy [17]. Schemat tej skręcarki pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Schemat skręcarki: 1 – uchwyt nieruchomy, 2 – uchwyt obrotowy, 3 – próbka, 4 – zbiornik wodny, 5 – przeciwcieżar

Do pomiarów względnych kątów skręcenia  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  zastosowano specjalnie wykonany przyrząd tensometryczny (rys. 5). Składa się on z dwóch obejm duraluminiowych zaciskanych sprężyscie na próbce w ten sposób, że trzy stalowe ostrza każdej z obejm stykające się z próbką leżą w płaszczyznach  $\pi_1$  i  $\pi_2$  prostopadłych do osi próbki i oddalonych od siebie o odległość  $e$ . Wielkością mierzoną jest względne przemieszczenie końcówek obejm odległych o  $r$  od linii środkowej górnej ścianki próbki. Jako miernika tej wielkości użyto czujnika indukcyjnego VISTRONIC CE3, składającego się z głowicy pomiarowej MDKa i wskaźnika cyfrowego. Wykorzystano zakres pomiarowy czujnika równy  $200 \mu\text{m}$  przy rozdzielczości  $0,1 \mu\text{m}$ .

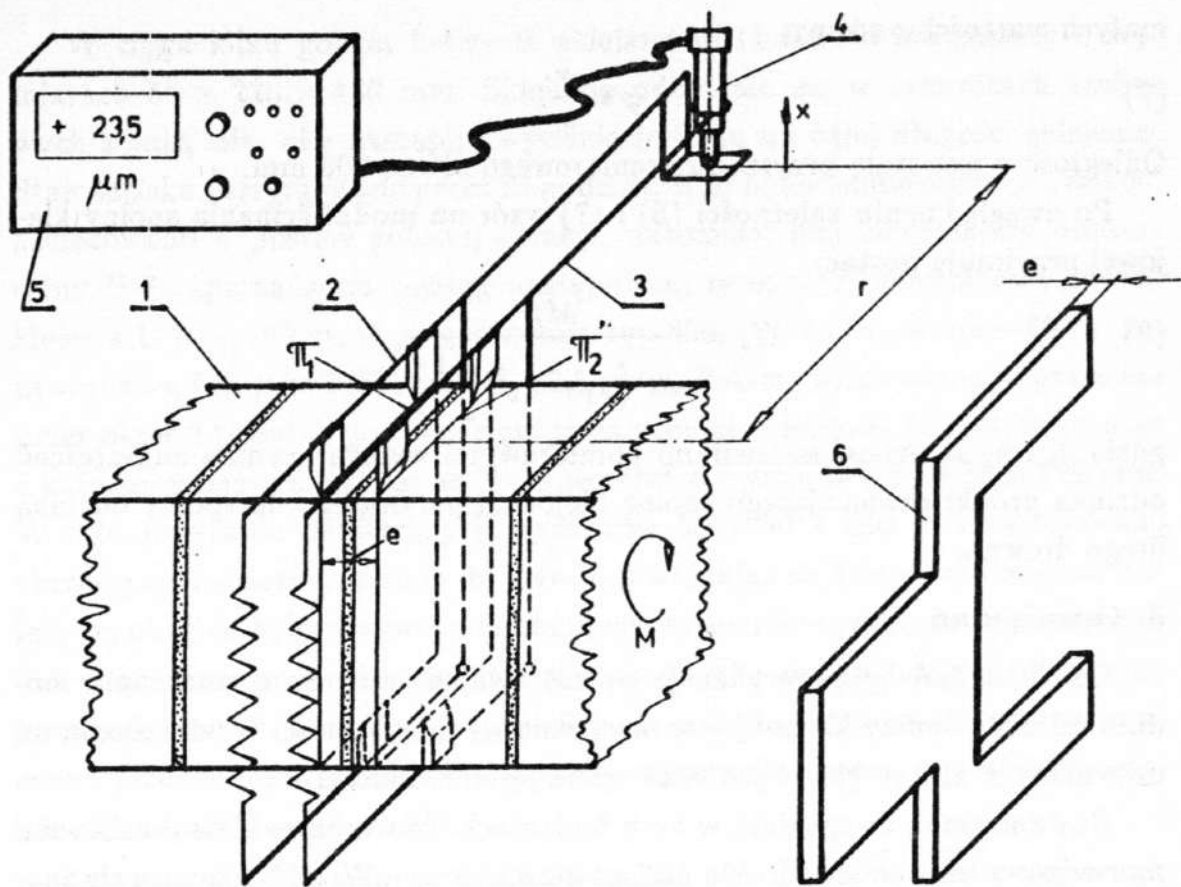
W celu ograniczenia do minimum błędów pomiarowych postanowiono operować równymi długościami  $e_1$  i  $e_2$  odcinków pomiarowych próbki. Przyjęto:

$$e_1 = e_2 = e = 1 \text{ mm}$$

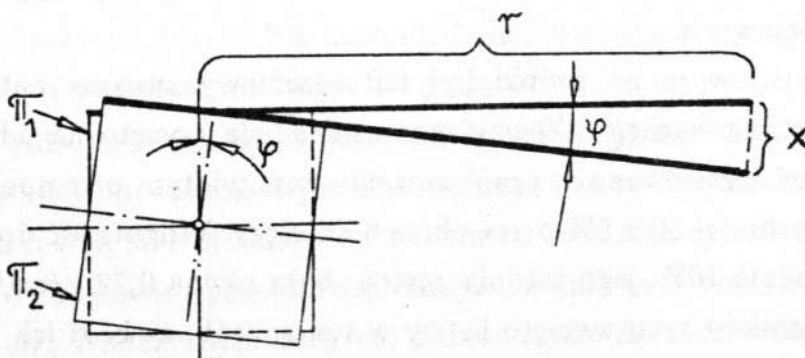
ustalając, podczas mocowania obejm na próbce, tę długość za pomocą szablonu dystansowego (rys. 5) o grubości  $1,00 \pm 0,01 \text{ mm}$ , dosuwając do niego obejmę do styku ich ostrzy z powierzchniami bocznymi szablonu. Przyjęcie powyższej wartości umożliwi dostatecznie dokładny pomiar kątów  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  przy znaczącym udziale spoiny w odkształceniu  $\varphi_1$ .

Jak wynika z rys. 6, względny kąt skręcenia  $\varphi$  na odcinku  $e$  próbki jest dla





Rys. 5. Schemat pomiaru odkształcenia próbki: 1 – próbka, 2, 3 – obejmy z ostrzami zaciskowymi, 4 – głowica pomiarowa czujnika indukcyjnego VISTRONIK CE3, 5 – cyfrowy wskaźnik czujnika, 6 – szablon dystansowy



Rys. 6. Kąt  $\varphi$  względnego skręcenia próbki na odcinku  $e$



małych wartości  $\varphi$  równy:

$$(7) \quad \varphi = \frac{x}{r}.$$

Odległość  $r$  jest stałą przyrządu pomiarowego równą 200 mm.

Po uwzględnieniu zależności (5) i (7) wzór na moduł ścinania spoiny klejowej przyjmuje postać:

$$(8) \quad G_s = \frac{Mtr}{\alpha a^4 \left( x_1 - x_2 \frac{e-t}{e} \right)}$$

gdzie  $x_1$  i  $x_2$  są przemieszczeniami pomiarowymi wynikającymi z odkształceń odcinka próbki zawierającego spoinę klejową i przyległego do spoiny odcinka litego drewna.

### 3. Opis badań

Celem badań była weryfikacja przedstawionej metody wyznaczania modułu ścinania spoiny klejowej – sprawdzenie jej przydatności w odniesieniu do drewnianych złączy klejowych oraz ocena jej dokładności.

Postanowiono uwzględnić w tych badaniach dwa typowe kleje do drewna: mocznikowy uniwersalny U-70 i polioctanowinyłowy „Wikol”, różniące się znacznie budową i właściwościami utworzonych z nich spoin, zwłaszcza właściwościami sprężystymi. Pierwszy charakteryzuje się po utwardzeniu dużą kruchością i sztywnością, drugi zaliczany jest do klejów, których spoiny są stosunkowo podatne na odkształcenia. Jeśli chodzi o drewno, przyjęto drewno bukowe jako typowy gatunek stosowany w konstrukcjach meblarskich oraz do wykonywania próbek połączeń klejowych.

Materiałem wyjściowym na próbki był bal rdzeniowy suszony naturalnie do stanu powietrzno-suchego. Zewnętrzne części bala pocięto na odcinki o długości 400 mm i sezonowano w pomieszczeniu zamkniętym o temperaturze  $20 \pm 2$  °C i wilgotności  $50 \pm 5\%$  przez okres 6 miesięcy. Wilgotność drewna osiągnęła poziom około 10%, jego średnia gęstość była równa  $0,72$  g/cm<sup>3</sup>.

Następnie z odcinków tych wycięto listwy w ten sposób, że boki ich przekroju poprzecznego miały długość 55 i 23 mm, przy czym bok o długości 55 mm był prostopadły, a bok o długości 23 mm – styczny do słojów rocznych. Listwy te sezonowano przez kolejne 4 tygodnie w tym samym pomieszczeniu, po czym ostrugano je dwustronnie, sprowadzając ich grubość do  $20 \pm 0,1$  mm.

W ciągu kilku godzin listwy te sklemano w 11-warstwowe pakiety o wymiarach  $55 \times 220 \times 400$  mm. Sklejanie odbywało się w zwornicach śrubowych z taką siłą, aby nastąpiło wyciśnięcie kleju na całej długości sklejenia. Stan zacisku utrzymywano przez 24 godziny. Klej polioctanowinyłowy „Wikol” zastosowano w postaci gotowej emulsji, natomiast klej mocznikowy uniwersalny U-70 sporządzono według następującej receptury: mocznikowa żywica klejowa U-70 – 100 cz. w., mąka żytnia typ 800 – 45 cz. w., woda – 50 cz. w., utwardzacz MZ jako 20% roztwór – 2,5 cz. w. Pakiety sezonowano w pracowni przez okres 2 tygodni, po czym cięto je na odcinki o długości 55 mm, uzyskując z każdego pakietu 5 elementów warstwowych o wymiarach  $55 \times 55 \times 220$  mm. W celu uzyskania ostatecznych wymiarów  $50 \times 50 \times 220$  mm zastosowano obróbkę na frezarce poziomej do metali, posługując się frezem walcowym. Zaletą tej obróbki było uzyskanie dokładnych wymiarów przekroju poprzecznego ( $50 \pm 0,1$  mm) oraz odpowiedniej równoległości i prostopadłości płaszczyzn bocznych próbek. Przed przystąpieniem do badań próbki sezonowano w pracowni przez okres 4 tygodni. Ostatecznie wilgotność drewna w próbkach ustaliła się na poziomie około 8%.

W celu ustalenia zakresu obciążeń próbki wykonano badania wstępne, na podstawie których przyjęto następującą dolną ( $M_d$ ) i górną ( $M_g$ ) wartość momentu skręcającego próbkę:

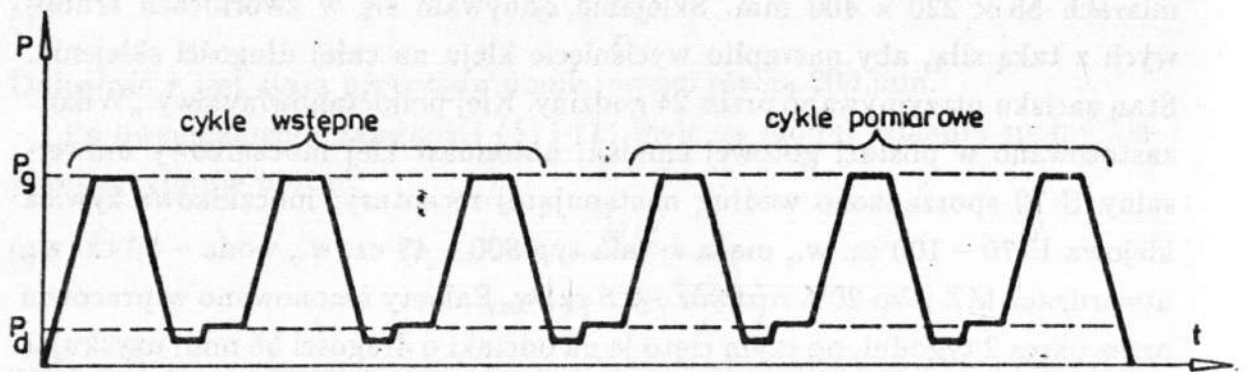
$$M_d = 5 \text{ Nm}, \quad M_g = 25 \text{ Nm}.$$

Górna wartość jest równa około 10% wartości momentu niszczącego próbkę. W zakresie od 0 do 25 Nm zachodziła liniowa zależność między odkształceniem próbki a wartością momentu skręcającego.

Próbkę obciążano cyklicznie od dolnej do górnej wartości momentu skręcającego według schematu przedstawionego na rys. 7. Stosowano prędkość obciążania równą 50 Nm/min. Podczas trzech ostatnich cykli mierzono przesunięcie końcówki głowicy pomiarowej, zerując czujnik przy obciążeniu próbki momentem  $M_d$  i odczytując przyrost przesunięcia  $\Delta x$  odpowiadający przyrostowi momentu:

$$(9) \quad \Delta M = M_g - M_d.$$

Jako wynik pomiaru przyjmowano średnią z trzech odczytów. Najpierw ba-



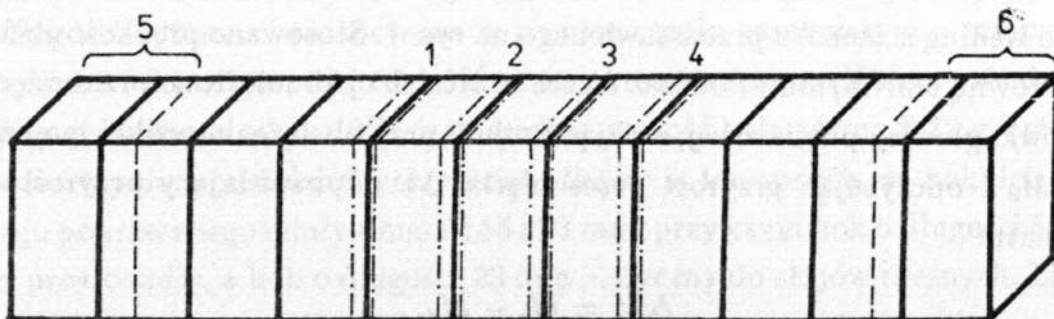
Rys. 7. Przebieg obciążania próbki

dano odkształcenia odcinka próbki zawierającego spoinę klejową, wyznaczając przyrost przemieszczenia pomiarowego  $\Delta x$ , następnie przesuwno przyrząd pomiarowy do sąsiadującej z tą spoiną porównawczej warstwy drewna i badano przyrost odkształcenia  $\Delta x_d$ .

Moduł ścinania spoiny klejowej jest teraz równy:

$$(10) \quad G_s = \frac{\Delta M r t}{\alpha a^4 \left( \Delta x - \Delta x_d \frac{e-t}{e} \right)}$$

Badania odkształceń próbki ograniczono do czterech stref pomiarowych zawierających środkowe spoiny próbki (rys. 8). Zabezpieczono się w ten sposób przed zniekształcającym czyste skręcanie próbki wpływem zacisku jej końcówek w uchwytach skręćarki. Poddano badaniom po 5 próbek sklejonych danym rodzajem kleju.



Rys. 8. Strefy pomiarowe (1, 2, 3, 4) i części chwytowe (5, 6) próbki

Bezpośrednio przed pomiarami odkształceń próbki mierzono grubości jej spoin klejowych, posługując się mikroskopem pomiarowym. W związku z założeniem, że spoina klejowa to warstwa utwardzonej masy klejowej zawarta między powierzchniami sklejonych elementów, pomiar jej grubości sprowadzał się do mierzenia odległości między tymi elementami. Nie było to jednak łatwe, gdyż po pierwsze – ze względu na wnikanie kleju w drewno niemożliwe było, i to niezależnie od stosowanego powiększenia obrazu spoiny, dokładne ustalenie granicy faz klej–drewno; po drugie – ze względu na nierównomierność powierzchni drewna warstwa kleju tworząca spoinę nie ma stałej grubości.

Niepewność w ustalaniu granicy faz klej–drewno powoduje, że wynik pomiaru jest obarczony pewnym błędem przypadkowym. W celu jego ograniczenia, a także ze względu na nierównomierność grubości spoiny, pomiaru dokonywano w wielu punktach rozmieszczonych równomiernie co 5 mm na całym obwodzie spoiny. Przyjęto, że wartość średnia wyników tych pomiarów może być uznana jako reprezentatywna dla całej spoiny. Pomiary przeprowadzono przy powiększeniu około 100 : 1, posługując się wzorcem kreskowym umieszczonym w układzie optycznym mikroskopu. Działce elementarnej tego wzorca odpowiadała długość 3  $\mu\text{m}$ . Przykładowe wyniki pomiaru grubości jednej z badanych spoin klejowych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przykładowe wyniki pomiaru grubości spoiny klejowej  
– klej mocznikowy, próbka II, strefa 4

Liczba punktów pomiarowych	Grubość spoiny			Odchylenie standardowe	Odchylenie standardowe średniej grubości spoiny
	najmniejsza	największa	średnia		
40	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
	57	97	79	9,5	1,5

#### 4. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań, tzn. wartości odkształceń pomiarowych  $\Delta x$  i  $\Delta x_d$ , średnia grubość  $t$  spoiny i obliczony na ich podstawie moduł ścinania  $G_s$ , każdej z badanych spoin podano w tabelach 2 i 3. Następnie w tabeli 4 zestawiono wartości średnie, odchylenia standardowe i współczynniki zmienności dla obu przypadków badanych spoin, tzn. spoin utworzonych z kleju polioctanowiny-



Tabela 2. Wyniki badań spoin wykonanych z kleju polioctanowinylowego

Numer próbki	Numer strefy pomiarowej	Odształcenie pomiarowe warstwy zawierającej spoinę klejową*	Odształcenie pomiarowe warstwy drewna sąsiadującej ze spoiną*	Średnia grubość $t$ spoiny klejowej	Moduł ścinania $G_s$ spoiny klejowej
		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	MPa
I	1	9,23	7,53	76	152
	2	9,83	8,80	64	184
	3	10,37	8,57	55	111
	4	10,00	8,40	70	146
II	1	9,13	7,70	73	168
	2	10,17	9,27	67	203
	3	10,03	8,40	60	128
	4	8,30	6,83	67	159
III	1	9,30	7,90	75	172
	2	9,53	8,43	65	178
	3	9,23	7,20	58	108
	4	8,93	7,13	64	129
IV	1	9,70	8,07	79	158
	2	10,67	9,73	68	193
	3	10,37	8,63	62	124
	4	8,70	7,30	61	151
V	1	9,80	8,23	70	148
	2	9,83	8,50	71	167
	3	9,80	8,07	65	132
	4	9,07	7,60	62	145

\* – wartości średnie z trzech pomiarów

lowego i spoin z kleju mocznikowego.

Widoczna jest znaczna różnica wartości modułu ścinania tych spoin – dla spoiny kleju mocznikowego jest on blisko czterokrotnie większy niż dla spoiny kleju polioctanowinylowego. Wynik ten jest zgodny z oczekiwaniami. Można stwierdzić, że proponowana metoda badawcza daje zadowalające wyniki zarówno dla spoin elastycznych (podatnych na odkształcenia), jak i sztywnych (mało podatnych na odkształcenia).

Duży rozrzut wyników badań, wyrażony wartością współczynnika zmienności: 17,1% dla spoiny kleju polioctanowinylowego i 23,3% dla spoiny kleju

Tabela 3. Wyniki badań spoin wykonanych z kleju mocznikowego

Numer próbki	Numer strefy pomiarowej	Odształcenie pomiarowe warstwy zawierającej spoinę klejową*	Odształcenie pomiarowe warstwy drewna sąsiadującej ze spoiną*	Średnia grubość t spoiny klejowej	Moduł ścinania $G_s$ spoiny klejowej
		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	MPa
I	1	7,97	7,80	72	448
	2	8,20	8,17	65	527
	3	7,13	7,13	70	638
	4	7,57	7,43	75	490
II	1	7,20	6,87	73	400
	2	7,93	7,93	63	574
	3	8,43	8,57	71	690
	4	8,83	8,90	79	568
III	1	7,07	6,93	75	517
	2	7,93	8,00	66	656
	3	8,47	8,70	75	808
	4	8,93	9,13	71	721
IV	1	7,80	7,50	79	396
	2	7,77	7,67	68	498
	3	8,47	8,63	70	717
	4	9,07	9,37	80	810
V	1	7,97	7,73	74	415
	2	8,10	8,27	72	770
	3	8,60	8,80	76	738
	4	8,17	8,37	81	771

\* – wartości średnie z trzech pomiarów

Tabela 4. Wartości modułu ścinania spoiny klejowej

Rodzaj kleju	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
	MPa	MPa	%
polioctanowinyłowy	152,8	26,1	17,1
mocznikowy	607,6	141,4	23,3

mocznikowego, wynika m.in. z niejednorodności drewna, nierównomierności grubości spoiny i trudności w określeniu tej grubości.

Oszacujmy dokładność uzyskanych wyników. Traktując wielkości  $e$  i  $r$  jako dokładnie określone stałe przyrządu pomiarowego, błąd względny wyznaczenia modułu ścinania spoiny klejowej można, wychodząc ze związku (10), określić za pomocą wzoru:

$$(11) \quad \frac{\Delta G_s}{G_s} = \left| \frac{\Delta(\Delta M)}{\Delta M} \right| + \left| 4 \frac{\Delta a}{a} \right| + \left| \frac{\Delta x - \Delta x_d}{\Delta x - \Delta x_d} \frac{e-t}{e} \cdot \frac{\Delta t}{t} \right| + \\ + \left| \frac{\Delta(\Delta x)}{\Delta x - \Delta x_d} \frac{e-t}{e} \right| + \left| \frac{\frac{e-t}{e} \Delta(\Delta x_d)}{\Delta x - \Delta x_d} \frac{e-t}{e} \right|$$

Wartości bezwzględne błędów wielkości mierzonych podano w tabeli 5.

Tabela 5. Wartości błędów pomiarowych związanych z wyznaczeniem modułu ścinania spoiny klejowej

$\Delta(\Delta M)$	$\Delta a$	$\Delta t$	$\Delta(\Delta x)$	$\Delta(\Delta x_d)$
Nm	mm	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
0,05	0,1	1,3–1,7	0,05	0,05

W związku z wielopunktowym pomiarem grubości spoiny, jako błąd pomiarowy przyjęto odchylenie standardowe wartości średniej tej grubości. Błędy  $\Delta(\Delta x)$  i  $\Delta(\Delta x_d)$  wskazań czujnika indukcyjnego wynikają z charakterystyki (atestu) stosowanej głowicy pomiarowej.

W tabeli 6 przedstawiono kształtowanie się błędu wyznaczenia modułu ścinania spoiny klejowej dla dwóch wybranych przypadków sklejeń. Znaczący, na tym samym poziomie, udział wnoszą dwa ostatnie składniki wzoru (11), związane z pomiarem przemieszczeń  $\Delta x$  i  $\Delta x_d$ . Dość duże, szczególnie w przypadku sklejenia klejem mocznikowym, wartości tych składników wynikają z porównawczego charakteru badania i z faktu, że przemieszczenia pomiarowe  $\Delta x$  i  $\Delta x_d$  dla danego sklejenia różnią się w niewielkim stopniu.

Błędy wyznaczenia modułu ścinania spoiny klejowej dla złączy utworzonych z kleju mocznikowego mieszczą się w przedziale 12,9–24,9%, natomiast dla złączy utworzonych z kleju polioctanowinyloвого – w przedziale 6,8–8,7%. Tak więc dla tych pierwszych są na ogół większe. Ogólnie można stwierdzić, że błąd

Tabela 6. Kształtowanie się błędu wyznaczenia modułu ścinania przykładowych spoin klejowych

Wielkość mierzona lub składnik błędu względnego (według wzoru (11))	Jednostka	Spoina wykonana z kleju poli-octanowinylowego – próbka II, strefa 4	Spoina wykonana z kleju mocznikowego – próbka II, strefa 4
$\Delta x$	$\mu\text{m}$	8,30	8,83
$\Delta x_d$	$\mu\text{m}$	6,83	8,90
$t$	$\mu\text{m}$	67	79
$\left  \frac{\Delta(\Delta M)}{\Delta M} \times 100 \right $	%	0,3	0,3
$\left  4 \frac{\Delta a}{a} \times 100 \right $	%	0,8	0,8
$\left  \frac{\Delta x - \Delta x_d}{\Delta x - \Delta x_d \frac{e-t}{e}} \times \frac{\Delta t}{t} \times 100 \right $	%	2,2	0,2
$\left  \frac{\Delta(\Delta x)}{\Delta x - \Delta x_d \frac{e-t}{e}} \times 100 \right $	%	2,6	7,9
$\left  \frac{\frac{e-t}{e} \Delta(\Delta x_d)}{\Delta x - \Delta x_d \frac{e-t}{e}} \times 100 \right $	%	2,4	7,3
$\left  \frac{\Delta G_s}{G_s} \times 100 \right $	%	8,3	16,5

wyznaczania modułu ścinania spoiny klejowej jest tym większy, im mniejsza jest wartość wyrażenia  $\Delta x - \Delta x_d \frac{e-t}{e}$ , czyli – jak wynika ze wzoru (10) – im większa jest wartość tego modułu. Pomimo tych dość dużych błędów pomiarowych należy pozytywnie ocenić przydatność zastosowanej metody, umożliwiającej wyznaczenie modułu ścinania spoiny klejowej w drewnie i to niezależnie od jej podatności na odkształcenia. Warto dodać, że metoda jest efektywniejsza i dokładniejsza od wcześniej przedstawionej przez autora w pracy [16].



## 5. Podsumowanie

Ze względu na ograniczoną przydatność i niedoskonałość istniejących, opracowano nową metodę wyznaczania podstawowej stałej sprężystości ścinanej spoiny klejowej, którą jest moduł ścinania. Polega ona na porównaniu odkształceń dwóch stref skręcanego połączenia klejowego: zawierającej spoinę i drewno oraz przyległej zawierającej tylko drewno. Próbką do badań jest próbką wielospoinową, spoiny klejowe mają postać kwadratu.

Do przeprowadzenia badań za pomocą przedstawionej metody wymagane jest specjalne stanowisko składające się ze skręcarki i przyrządu tensometrycznego. Pomiar odkształceń próbki muszą być przeprowadzone z odpowiednio dużą dokładnością, konieczny jest też pomiar grubości spoiny klejowej.

W celu zweryfikowania metody przeprowadzono badania sprężystości dla dwóch rodzajów spoin łączących elementy drewniane: spoiny utworzonej z kleju mocznikowego i z kleju polioctanowinyłowego. Zgodnie z oczekiwaniami wartość modułu ścinania dla pierwszej ze spoin (607,6 MPa) jest znacznie wyższa niż dla drugiej (152,8 MPa).

Określono błąd wyznaczania modułu ścinania spoiny klejowej. Jest on tym większy im większa jest wartość tego modułu. Dość duże wartości tego błędu są przede wszystkim wynikiem tego, że porównywane odkształcenia różnią się w niewielkim stopniu. Zaletą metody, na tle innych – np. wykorzystywanych w normach ASTM, jest możliwość wyznaczania modułu ścinania spoiny klejowej w drewnie niezależnie od jej podatności na odkształcenia.

## LITERATURA

1. В. М. Хрулев: Прочность клеевых соединений. Москва 1973  
Стройиздат
2. W. Clad: Über das Wesen einer Verklebung und die Fugenelelastizität ausgehärteter Leimfugen bei Holzverleimungen. Stuttgart 1964 Technische Hochschule
3. W. Clad: Über die Fugenelelastizität ausgehärteter Leimfugen bei Holzverleimungen. *Holz als Roh- u. Werkstoff* nr 2 1965 s. 58–67

4. S. Dziegielewski, A. Wilczyński: Sprężystość elementów meblowych sklejanych warstwowo. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* nr 379 1990 s. 89–107
5. K. Grudziński: Badania własności mechanicznych klejów i połączeń klejonych przy czystym ścinaniu. W: Problemy wytrzymałości konstrukcji klejonych. PTMTiS SIMP Szczecin 1972 s. 99–115
6. J. K. Hsu, J. Hoyle, Jr.: Factors affecting measurement of shear modulus for an elastomeric construction adhesive. *Wood Sc.* nr 3 1978 s. 105–110
7. G. C. Knollman: Variation of shear modulus through the interfacial bond zone of an adhesive. *Int. J. Adhesion and Adhesives* nr 3 1985 s. 137–141
8. A. Korzeniowski: Badanie możliwości pomiaru odkształceń układu drewno-klej za pomocą oporowych czujników tensometrycznych umieszczonych w skleinie. *Fol. For. Pol. B.* nr 6 1965 s. 5–62
9. A. Korzeniowski: Badania nad modulem sprężystości warstwowego układu drewno-klej mocznikowy. *Fol. For. Pol. B.* nr 6 1965 s. 181–269
10. R. B. Krieger, Jr.: Shear stress-strain properties of structural adhesives in hostile environments. W: Durability of adhesive bonded structures. *Appl. Polymer Symp.* nr 32 1977 s. 321–339
11. M. Okuma: Plywood properties influenced by the glue line. *Wood Sc. and Technol.* nr 1 1976 s. 57–68
12. D. Peretz: Shear stress-strain properties of adhesive layers. *J. Adhesion* nr 2 1978 s. 115–122
13. B. H. River: A method for measuring adhesive shear properties. *Adhes. Age* nr 12 1981 s. 30–33
14. R. A. Seago: A practical application of the thick adherent shear test. W: Durability of adhesive bonded structures. *Appl. Polymer Symp.* nr 32 1977 s. 341–352
15. Й. С. Соболёв: Методика определения механических характеристик клеевых отливок. *И. В. У. З. – Лес. З.* nr 6 1975 s. 83–87
16. A. Wilczyński: Badanie sprężystości spoiny klejowej w drewnie przez skrećanie złącza. W: III Sesja „Badania dla meblarstwa”. AR Poznań 1988 s. 141–152

17. A. Wilczyński: Urządzenie do badań wytrzymałościowych drewnianych połączeń klejowych poddawanych skręcaniu. *Zeszyty Naukowe. Studia Techniczne* nr 17 Bydgoszcz 1993 WSP s. 99–114
18. M. Zentkeler: Kleje i klejenie drewna. Warszawa 1984 WNT
19. M. Zentkeler, G. Fladzińska: Wpływ rodzaju kleju na odkształcenia sklejanego drewna przy obciążeniu. *Pr. Kom. Technol. Drew. PTPN* t. 9 1979 s. 113–126

Normy:

20. ASTM E 229–70 (Reapproved 1981): Standard test method for shear strength and shear modulus of structural adhesives
21. ASTM D 3983–81: Standard practice for measuring strength and shear modulus of nonrigid adhesives by the thick adherend tensile lap specimen
22. ASTM D 4027–81: Standard practice for measuring shear properties of structural adhesives by the modified-rail test
23. PN 64/D–01004: Klejenie drewna. Klasyfikacja i terminologia

Arnold Wilczyński

A METHOD FOR MEASURING ELASTIC PROPERTIES  
OF ADHESIVE LAYERS JOINING WOODEN ELEMENTS

Summary

A method for measuring shear modulus of an adhesive layer is presented. The method consists in the measurement of proper deformations of torsioned glue joint. Verifying experiments, in which two typical kinds of glue for wood have been used, are described. The results of experiments confirm the correctness and usefulness of the method.