FOLIA FORESTALIA POLONICA
SERIA B, ZESZYT 6 1965

Aleksander Korzeniowski

BADANIE MOŻLIWOŚCI POMIARU ODKSZTAŁCEŃ UKŁADU DREWNO-KLEJ ZA POMOCĄ OPOROWYCH CZUJNIKÓW TENSOMETRYCZNYCH UMIESZCZONYCH W SKLEINIE

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМИЦИЙ СИСТЕМЫ ДРЕВЕСИНА-КЛЕЙ ПРОВОЛОЧНЫМИ ДАТЧИКАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ В КЛЕЕВОМ ШВЕ

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE VERMESSUNGSMÖGLICHKEIT DER DEHNUNGEN VON HOLZ-LEIMANORDNUNG MITTELS DER IN DIE LEIMFUGE EINGELEIMTEN WIDERSTANDS-DEHNUNGSMESSSTREIFEN

WSTĘP

Tensometria stanowi dziedzinę techniki pomiarowej, zajmującą się pomiarami odkształceń materiałów konstrukcyjnych. Pomiary te mają na celu określenie odkształceń względnych oraz związanych z nimi naprężeń albo też sił, ciśnień lub momentów sił, które wywołały pomierzone odkształcenie badanego materiału. Przyrządy służące do pomiarów tensometrycznych nazywa się tensometrami.

Jeden z najbardziej nowoczesnych rodzajów tensometrów stanowią elektryczne tensometry oporowe. Pierwsze prace w zakresie ich budowy i stosowania prowadzili E. E. Simmons oraz A. G. Ruge (18) w roku 1937 w Stanach Zjednoczonych AP, gdzie od roku 1939 rozpoczęto już produkcję tych przyrządów.

Podstawowe części tensometru oporowego stanowią oporowy czujnik tensometryczny, przyrząd pomiarowy w postaci miernika wychyłowego lub mostka Wheatstone'a oraz zasilacz sieciowy lub bateryjny. Zasada działania takiego układu pomiarowego polega na pomiarze zmian oporności czujnika naklejonego na powierzchni badanego elementu konstrukcji; zmiany te wywołane są liniowymi odkształceniami długości cienkich przewodników z drutu lub folii metalowej zawartych w czujniku, który odkształca się łącznie z badanym materiałem.[1] Jeśli odkształcenie przewod-

[1] Szczegółowe dane co do konstrukcji, zasad działania i obsługi oporowych tensometrów elektrycznych można znaleźć w podręcznikach Z. Rolińskiego (18) i R. Zimmermanna (25).

nika w czujniku nie przekracza określonej wartości, zależnej od elektrycznych właściwości użytego metalu, to zależność między względnym przyrostem oporności elektrycznej czujnika a jego względnym odkształceniem jest liniowa

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l}$$

gdzie

R — początkowa oporność czujnika,

ΔR — przyrost oporności czujnika,

l — początkowa długość przewodnika,

Δl — przyrost długości przewodnika,

k — współczynnik proporcjonalności, czyli tzw. współczynnik czułości odkształceniowej czujnika [1].

Stosunek przyrostu długości do początkowej długości przewodnika stanowi jego odkształcenie względne

$$\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$$

można więc napisać

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{l}{k}$$

Aby pomiar czujnikiem oporowym dawał w wyniku rzeczywiste względne odkształcenie badanego materiału, muszą być spełnione dwa podstawowe warunki:

1) odkształcenie czujnika musi być równe odkształceniu materiału, na którym czujnik jest naklejony,

2) mierzony przyrost oporności czujnika musi być wywołany wyłącznie jego odkształceniem.

---

[1] Wykaz symboli

Symbol	Wielkość	Miano	Symbol	Wielkość	Miano
R	oporność elektryczna	Ω	ν	liczba Poissona	1
t	temperatura	°C	ε	odkształcenie względne	‰
P	siła, obciążenie	kG	φ	względna wilgotność powietrza	%
σ	naprężenie normalne	kG/cm²	W	bezwzględna wilgotność drewna lub utwardzonego kleju	%
τ	naprężenie styczne	kG/cm²	d	grubość skleiny	μ
E	moduł sprężystości podłużnej	kG/cm²	a	grubość elementu złącza	mm
G	moduł sprężystości poprzecznej	kG/cm²	x	zawartość wypełniacza w kleju	%

Z pierwszego warunku wynika, iż zarówno podkładka nośna czujnika, jak klej, którym przytwierdza się czujnik do badanego materiału, muszą odkształcać się tak samo jak badany materiał. Odpowiedni dobór materiału podkładki nośnej i kleju zapewnia spełnienie tych wymagań we współczesnych czujnikach tensometrycznych.

Do spełnienia drugiego warunku dąży się również przez zastosowanie materiałów możliwie nieczułych na zmiany temperatury i wilgotności otoczenia. Tak więc materiał drutu oporowego w czujniku powinien mało zmieniać oporność właściwą ze zmianą temperatury, a podkładka nośna i klej powinny być mało higroskopijne. Całkowita eliminacja wpływów ubocznych na tej drodze nie jest jednak możliwa. Dlatego mierząc przyrost oporności (odkształcenie) czujnika za pomocą miernika wychyłowego osiąga się mniejszą dokładność aniżeli przy użyciu mostka Wheatstone'a. Tym ostatnim można bowiem mierzyć różnicę oporności dwu jednakowych czujników. Pierwszy z nich, tzw. czujnik czynny, naklejony na badanym materiale, włącza się w jedną gałąź układu pomiarowego, drugi zaś, tzw. kompensacyjny — w drugą gałąź układu. Czujnik kompensacyjny nakleja się na takim samym materiale, znajdującym się w jednakowych warunkach z materiałem badanym. Materiału z czujnikiem kompensacyjnym nie poddaje się jednak działaniu siły lub innego czynnika, powodującego zamierzone odkształcenie badanego materiału. W ten sposób mierzy się jedynie przyrost oporności czujnika czynnego spowodowany działaniem zamierzonego czynnika, gdyż czujnik kompensacyjny eliminuje przypadkowe, nie zamierzone zmiany oporności w układzie.

Pomiar odkształceń materiałów higroskopijnych, zmieniających wymiary przy sorpcji lub desorpcji wilgoci, nasuwa dodatkowe trudności, albowiem równocześnie z kontrolowanymi zmianami naprężenia (obciążenia, siły, ciśnienia itp.) mogą w nich zachodzić nie zamierzone zmiany wilgotności. W takim przypadku wynik pomiaru odkształcenia nie może być przypisany wyłącznie działaniu celowo zmienianego czynnika deformującego materiał, lecz stanowi wypadkową działania dwu czynników deformujących — kontrolowanego i niekontrolowanego. Liczbowa korekcja wpływu wilgotności nie jest możliwa, gdyż zmiana wilgotności materiału higroskopijnego, takiego jak drewno lub tworzywa drewnopochodne, pociąga za sobą nie tylko zmiany wymiarowe, lecz również zmiany wartości stałych sprężystych materiału, tj. modułu sprężystości podłużnej i poprzecznej oraz liczby Poissona.

W trakcie więc pomiaru odkształceń drewna i tworzyw drzewnych należałoby zapewnić zachowanie ich niezmiennej wilgotności zawartej w przedziale higroskopijnym, umożliwiającym właściwe naklejenie czujników tensometrycznych. Spełnienie tego warunku nie eliminuje jednakże lokalnych zmian właściwości drewna w miejscu naklejenia czujników. Zmiany te mogą być spowodowane wydzielaniem ciepła Joule'a przy włączony w obwód prądu oporowy czujnik tensometryczny. Ciepło

bowiem rozprasza się w drewnie powoli wskutek jego małej przewodności cieplnej i dlatego podwyższenie temperatury pod czujnikiem może powodować lokalne wysychanie i skurcz badanego materiału oraz zmiany jego właściwości sprężystych. To ostatnie zjawisko może mieć również miejsce w przypadku niehigroskopijnych materiałów termoplastycznych.

I. PRZEGLĄD LITERATURY

W pomiarach odkształceń drewna, tworzyw drzewnych i konstrukcji drewnianych tensometria oporowa nie znalazła dotychczas szerszego zastosowania. Nieliczne publikacje dotyczą prawie wyłącznie badań naukowych, mających na celu sprawdzenie stosowalności tej metody do badania drewna. Spotyka się również wzmianki o użyciu tej techniki pomiarowej w laboratoryjnych pomiarach sprężystych właściwości drewna i materiałów drewnopochodnych.

Najwcześniejsze wydają się prace australijskie (20, 21, 23),[1] dotyczące przygotowania, cechowania i zastosowania oporowych czujników tensometrycznych do pomiaru odkształceń drewna i sklejki. Prace amerykańskie (17, 22, 24) i japońskie (1)[1] mają charakter badań, zmierzających do sprawdzenia wpływu podstawowych czynników na dokładność wskazań naklejonych na drewnie czujników oporowych oraz do sprawdzenia ich przydatności do eksperymentalnego określania sprężystej anizotropii drewna. Natomiast w wykonanych w Europie badaniach nad drewnem jedynie sporadycznie stosowano tę metodę pomiarową w celu uzyskania liczbowych wartości odkształceń lub stałych sprężystych drewna (6) i tworzyw drzewnych (15).

Najistotniejsze dane, mające znaczenie dla oceny możliwości stosowania oporowych czujników tensometrycznych do pomiaru odkształceń drewna, wnoszą prace W. G. Youngquista (24) i A. Slikera (22). Pierwszy z nich wykonał porównawcze pomiary natychmiastowych odkształceń drewna przy rozciąganiu i ściskaniu wzdłuż włókien, stosując do tego celu konwencjonalne tensometry mechaniczne i mechaniczno-optyczne oraz oporowe czujniki tensometryczne długości 25 mm w mostkowym układzie pomiarowym. Obliczone na podstawie tych pomiarów moduły sprężystości podłużnej wykazały rozbieżność wyników nie przekraczającą 10% wartości średnich, w przybliżeniu jednakową dla wszystkich trzech typów tensometrów. Bardzo zbliżone wyniki porównawczych pomiarów za pomocą tensometrów oporowych i tensometrów mechanicznych Huggenbergera otrzymali B. Norén i E. Saarman (15) przy badaniu modułu poprzecznej sprężystości sklejki. Natomiast przy ściskaniu w kierunku

[1] Prace niedostępne autorowi, znane jedynie na podstawie powołań w publikacjach amerykańskich (17, 22).

prostopadłym do włókien tensometr oporowy wykazał mniejsze odkształcenia niż pozostałe rodzaje tensometrów; wynik ten tłumaczy Youngquist prawdopodobieństwem większej sztywności czujnika tensometrycznego aniżeli drewna. Oprócz tego stwierdził on, że ze wzrostem długości bazy pomiarowej (czynnej długości) oporowego czujnika tensometrycznego od 8 do 25 mm rośnie wartość względnego odkształcenia przy stałej wartości naprężenia w tym samym materiale. Prace J. Milczarek-Dobrzyńskiej (14) i S. Kowieskiego (12), wykonane w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna SGGW,[1] potwierdziły powyższe wyniki Youngquista.

Bardzo istotne jest również stwierdzenie tego samego autora, że po $10 \cdot 10^6$ cykli obciążeń czujniki oporowe naklejone na zginanej belce drewnianej pozostały nie uszkodzone; pozwala to stosować czujniki oporowe do pomiaru odkształceń podczas dynamicznych obciążeń drewna, co zostało praktycznie zrealizowane przez W. Gillwalda (6).

Wreszcie Youngquist stwierdził bardzo znaczne zmiany wskazania tensometru oporowego wskutek wystawienia próbki z czujnikiem czynnym na działanie innych warunków wilgotnościowych aniżeli próbki z czujnikiem kompensacyjnym. Na tej podstawie wyciągnął on wniosek, że tylko przy pomiarach odkształceń natychmiastowych można nie klimatyzować pomieszczenia i próbek z naklejonymi czujnikami oporowymi, natomiast podczas pomiarów długotrwałych bardzo staranna klimatyzacja jest nieodzownym warunkiem dokładności pomiaru. Potwierdzenie i rozwinięcie badań Youngquista w tym zakresie stanowi praca A. Prędkiewiczówny (16), wykonana w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna SGGW.[1]

Badania A. Slikera (22) dotyczyły wpływu ciepła Joule'a, wydzielanego przez oporowy czujnik tensometryczny włączony w obwód prądu elektrycznego w układzie pomiarowym, na dokładność pomiaru odkształcenia. Sliker stwierdził, że wydzielające się ciepło powoduje znaczne przesunięcie punktu zerowego na mierniku wychyłowym nawet po bardzo krótkim czasie przepływu prądu przez czujnik naklejony na drewno i że to przesunięcie powiększa się z czasem, nie ustając nawet po 24 godzinach od momentu włączenia prądu. Natomiast przy zastosowaniu czujnika kompensacyjnego w układzie mostkowym przesunięcie punktu zerowego w ciągu 30 sekund od włączenia prądu jest bardzo nieznaczne, a następnie rośnie jednokierunkowo ze stałą prędkością, proporcjonalną do napięcia prądu w układzie pomiarowym i do oporności czujnika. Taki stan rzeczy można objaśnić nieznacznymi różnicami w warunkach odprowadzania ciepła i brakiem skurczu desorpcyjnego w drewnie pod czujnikiem czynnym i kompensacyjnym podczas pierwszych 30 sekund, kiedy strumień

[1] Wykonano z inicjatywy i pod współkierownictwem autora.

cieplny w drewnie nie jest ustalony, a wilgotność jego nie ulega jeszcze zmianie. W późniejszym okresie różnice prędkości strumienia cieplnego i prędkości termodyfuzji wilgoci w drewnie pod czujnikiem czynnym i kompensacyjnym narastają, co powoduje stopniowe jednokierunkowe zwiększanie się przesunięcia punktu zerowego na mostku pomiarowym. Dlatego w konkluzji swych badań Sliker zaleca stosowanie wyłącznie układu mostkowego, niskiego napięcia prądu pomiarowego i możliwie małej oporności czujników tensometrycznych oraz włączanie prądu tylko w momencie odczytu, który powinien być dokonany w ciągu okresu nie przekraczającego 30 sekund od chwili włączenia prądu. Dalsze wskazania Slikera dotyczą możliwie jednakowych fizycznych właściwości drewna i niskiej jego wilgotności w próbkach z czujnikiem czynnym i kompensacyjnym oraz — w przypadku bardzo dokładnych pomiarów — stosowania oddzielnego czujnika kompensacyjnego dla każdego czujnika czynnego. Wreszcie — aby zmniejszyć natężenie strumienia cieplnego — Sliker proponuje zastosowanie czujników o znacznej odległości poszczególnych drucików siatki oporowej od siebie oraz naklejanie na ich powierzchni folii metalowej, która rozprowadzałaby powstające ciepło na większej przestrzeni i ułatwiała jego przekazywanie powietrzu.

II. ZAŁOŻENIA, CEL I ZAKRES BADAŃ

Na podstawie wyników uprzednio omówionych prac autor doszedł do przekonania, że wklejanie oporowych czujników tensometrycznych pomiędzy płaskie warstwy badanego materiału drzewnego (lub innego materiału konstrukcyjnego o właściwościach dielektrycznych) mogłoby znacznie rozszerzyć zakres informacji o badanych elementach w porównaniu z danymi, jakie można uzyskać za pomocą czujników naklejanych na powierzchni tych elementów.

Taki sposób umieszczenia czujników tensometrycznych powinien umożliwić pomiar odkształceń w różnych punktach wewnątrz badanego elementu; dałoby to możność określenia rozkładu odkształceń — a tym samym wnioskowania o rozkładzie naprężeń — wewnątrz materiału, co nie jest możliwe przy naklejaniu czujników na powierzchni elementu. Odizolowanie czujnika od otaczającego powietrza stosunkowo grubą warstwą materiału powinno również zabezpieczyć go przed bezpośrednim wpływem szybkich zmian wilgotności w otoczeniu, a tym samym umożliwić pomiar odkształceń drewna przy sorpcji i desorpcji wilgoci, która nie może w takim przypadku powodować szybkich zmian oporności czujnika, pociągających za sobą błędy pomiarowe. Wreszcie wklejenie czujników tensometrycznych w złącze konstrukcyjne mogłoby dać możność doświadczalnej analizy rozkładu naprężeń w złączu i ustalenia ich zależności od

kształtu i wymiarów elementów złącza oraz od właściwości użytego materiału konstrukcyjnego i kleju utwardzonego w skleinie.

Zasadniczym warunkiem realizacji tego sposobu pomiaru jest sprawdzenie wpływu klejów do drewna na oporność czujników tensometrycznych. Kleje o kwaśnym odczynie mogłyby bowiem wywoływać stopniowo postępującą korozję cienkich drucików oporowych i po pewnym czasie uniemożliwić normalne działanie czujników. Dalszą trudność może stanowić dobra izolacyjność termiczna grubej warstwy drewna, która mogłaby spowodować szybki lokalny wzrost temperatury badanego materiału w bezpośredniej bliskości wklejonego czujnika, co zmniejszyłoby dokładność pomiaru. Ponieważ w niektórych rodzajach doświadczeń nie można skrócić czasu ich trwania, należałoby wreszcie sprawdzić, czy wpływ zmian wilgotności otaczającego powietrza na wskazania czujnika wklejonego między warstwy drewna jest tak samo znaczny, jak na wskazania czujnika naklejonego na jego powierzchni.

Te trzy zagadnienia stanowiły tematykę doświadczeń wstępnych, warunkujących dalsze badania, które miały na celu doświadczalne sprawdzenie słuszności postawionej hipotezy. Badania te obejmują pomiary odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych drewna w kierunku prostopadłym i równoległym do włókien, pomiary odkształceń natychmiastowych forniru, utwardzonego kleju i drewna warstwowego oraz pomiary odkształceń natychmiastowych niektórych rodzajów złączy konstrukcyjnych. W trakcie tych badań wykonano również pomiary porównawcze za pomocą tensometrów oporowych i za pomocą konwencjonalnego tensometru mechanicznego lub mikromierzy zegarowych, mierzących równocześnie odkształcenia tych samych próbek.

III. METODYKA BADAŃ

1. Dobór materiałów i kleju

Jako podstawowy rodzaj drewna zastosowano w większości doświadczeń drewno brzozowe, odznaczające się równomierną strukturą i dobrą sklejalnością. Jedynie w badaniach nad odkształceniami sorpcyjnymi i desorpcyjnymi użyte zostało głównie drewno bukowe, gdyż wykazuje ono znaczne wartości skurczu i pęcznienia. Do zbadania wpływu zróżnicowanego modułu sprężystości drewna na wartość pomierzonych odkształceń złączy konieczne było dodatkowe użycie drewna sosnowego i lipowego.

Zastosowane do badań drewno nie wykazywało wad strukturalnych i śladów rozkładu przez grzyby ani innych wad, mogących obniżać jego właściwości wytrzymałościowe i sprężyste. Wilgotność drewna zawierała się w granicach 6 do 12%, przy czym różnice wilgotności poszczególnych próbek w jednym doświadczeniu nie przekraczały 2%, z wyjątkiem po-

miaru odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych, w trakcie którego wilgotność tę celowo zmieniano.

Próbki sklejono z listewek obrobionych gładkotnącą piłą tarczową, wymiary przekroju listewek wynosiły 5 × 25 mm, 10 × 25 mm, 15 ×25 mm i 14 × 20 mm, a odchyłki tych wymiarów nie przekraczały ± 0,2 mm. Do sklejenia drewna warstwowego użyto obwodowo skrawanego forniru brzozowego grubości 0,20 + 0,03 mm. Kierunek włókien w sklejanych ze sobą warstwach drewna był zawsze równoległy do długości próbek.

Oprócz drewna do wykonania próbek zastosowano plexiglas (żywicę polimetakrylową) w postaci listewek, ciętych z płyt grubości 4 do 8 mm. To izotropowe tworzywo wprowadzono do badań porównawczych w celu sprawdzenia wpływu anizotropii drewna na wyniki pomiarów. Plexiglas wykazuje znacznie mniejszy moduł sprężystości niż drewno wzdłuż włókien, jest materiałem termoplastycznym i niehigroskopijnym, co umożliwia wyprowadzenie dalszych wniosków, wynikających z tych właściwości odmiennych od właściwości drewna.

Wreszcie do porównawczego badania wpływu wilgotności powietrza na wskazania tensometru oporowego użyto próbek wykonanych ze szkła, a więc z materiału nie obarczonego ani higroskopijnością, ani termoplastycznością, a tym samym gwarantującego wyeliminowanie ubocznego wpływu tych właściwości materiału na wyniki badania.

Do klejenia drewna zastosowano kleje różniące się pod względem higroskopijności i właściwości mechanicznych w stanie utwardzonym, aby w ten sposób sprawdzić wpływ tych właściwości kleju na wyniki pomiaru odkształcenia.

Klej mocznikowy odznacza się małą higroskopijnością oraz znaczną kruchością i sztywnością skleiny, wynikającą z dużej wartości modułu sprężystości po utwardzeniu. Przez dodatek mąki skrobiowej można jednakże w znacznym stopniu zmniejszyć moduł sprężystości, zwiększając jednocześnie higroskopijność tego kleju. W ten sposób zróżnicowano powyższe właściwości kleju mocznikowego, aby sprawdzić ich wpływ na mierzone odkształcenie.

Klej polioctanowinylowy jest również mało higroskopijny, daje jednak skleinę o znacznej elastyczności, czym różni się od kleju mocznikowego.

W porównaniu z obu wymienionymi klejami syntetycznymi użyte w badaniach kleje naturalne, a mianowicie glutynowy i kazeinowy, odznaczają się znacznie większą higroskopijnością skleiny. Zwłaszcza klej glutynowy jest bardzo higroskopijny, w większym nawet stopniu aniżeli drewno; daje on skleinę o bardzo znacznej elastyczności, podobną pod tym względem do skleiny polioctanowinylowej. Natomiast skleina kazeinowa jest sztywna i dość krucha, jednak w mniejszym stopniu aniżeli skleina kleju mocznikowego, do którego nie dodano mąki skrobiowej.

Roztwory tych klejów różnią się także odczynem. Klej polioctanowinylowy i glutynowy mają odczyn obojętny, klej kazeinowy — zasadowy

(pH 8 do 10), a klej mocznikowy po dodaniu utwardzacza ma odczyn kwaśny (pH 3 do 5). Tak więc prawdopodobieństwo powodowania korozji drutu oporowego w czujnikach istnieje zasadniczo tylko w odniesieniu do kleju mocznikowego oraz w odniesieniu do innych klejów, w których stosuje się kwaśne utwardzacze.

Skład i podstawowe właściwości klejów do drewna podano w tabeli 1. Do klejenia plexiglasu użyto roztworu tego tworzywa w chloroformie, a więc roztworu o odczynie obojętnym.

Tabela 1

Skład i właściwości klejów do drewna

Klej	Składniki roztworu w częściach wagowych				Właściwości roztworu	
	substancja klejąca	wypełniacz — mąka żytnia	utwardzacz — 10-proc. roztwór wodny NH_4Cl	woda	lepkość	odczyn pH [d]
Glutynowy	30	—	—	70	6 °E [b]	7
Kazeinowy nr 416	40	—	—	60	2620 cP [c]	10
Polioctanowinylowy „Wikol" [a]	—	—	—	—	2610 cP [c]	7
Mocznikowy MC-60	100	—	10	—	3160 cP [c]	5
„	100	15	10	15	—	—
„	100	30	10	30	—	—
„	100	45	10	45	—	—

[a] Roztwór gotowy do użytku z wypełniaczem kredowym, przygotowany przez Instytut Tworzyw Sztucznych.

[b] Oznaczono przy temperaturze 40 °C wiskozymetrem Englera.

[c] Oznaczono przy temperaturze 20 °C wiskozymetrem Höpplera.

[d] Oznaczono papierkami indykatorowymi.

Do klejenia szkła zastosowano żywicę epoksydową Epidian 5, utwardzaną na zimno za pomocą utwardzacza aminowego o odczynie zasadowym; po dodaniu tego utwardzacza odczyn kleju jest zasadowy (pH 10 do 11).

Do naklejania czujników tensometrycznych na powierzchni drewna, utwardzonego kleju mocznikowego i szkła użyto normalnego nitrocelulozowego kleju tensometrycznego w roztworze acetonowym, a do naklejania ich na powierzchni plexiglasu — tego samego tworzywa rozpuszczonego w chloroformie. Czujniki naklejone na powierzchni badanego materiału izolowano od zewnątrz w zwykły sposób za pomocą roztopionego wosku, nanoszonego na powierzchnię czujnika i materiału, uprzednio lekko podgrzaną promiennikiem podczerwieni.

Przy naklejaniu czujników na powierzchni materiału stosowano się do ogólnych wskazówek, podawanych w literaturze (18).

2. Wykonanie pomiarów

W celu osiągnięcia możliwie znacznej dokładności pomiarów tensometrycznych użyto mostkowego układu pomiarowego, stosując czujniki czynne i kompensacyjne typu RL o budowie kratowej, nieczułe na odkształcenia poprzeczne. W ten sposób całkowicie wyeliminowano wpływ odkształceń prostopadłych do podłużnej osi czujnika, czyli prostopadłych do zamierzonego kierunku pomiaru odkształcenia. Czujniki były wykonane z drutu konstantanowego średnicy 25 μ, na papierowej podkładce nośnej i z papierową osłoną, sklejone nitrocelulozowym klejem tensometrycznym. Grubość czujników wynosiła 150 ± 15 μ, oporność znamionowa — 120 ± 1 Ω, a współczynnik czułości k — 2,15. Odchyłki oporności czujników przeznaczonych do jednego doświadczenia nie przekraczały ± 0,5Ω. Długość pomiarowa (baza) czujników użytych do pomiaru odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych wynosiła 15,0 mm, a czujników użytych do pozostałych badań — 12,6 mm.

We wszystkich przeprowadzonych pomiarach zastosowano układ złożony z pary czujników tensometrycznych — czynnego i kompensacyjnego — połączonych z mostkiem tensometrycznym typu T-2 za pomocą dolutowanych przewodów miedzianych o jednakowej oporności, która nie przekraczała 0,1 Ω. Jeżeli próbka zawierała więcej niż jeden czujnik czynny, stosowano wspólny czujnik kompensacyjny dla wszystkich czujników czynnych, wklejonych w taki sam sposób i pracujących w jednakowych warunkach. Układ pomiarowy zasilano prądem zmiennym o napięciu 4 V i częstotliwości 1000 Hz poprzez zasilacz wbudowany w mostek tensometryczny.

Przed rozpoczęciem pomiarów próbki klimatyzowano w pomieszczeniu laboratorium przez okres co najmniej 2 tygodni od wklejenia czujników. Klimatyzacja ta miała na celu całkowite utwardzenie kleju i wyrównanie rozkładu wilgotności w próbkach oraz zmniejszenie do minimum różnic wilgotności poszczególnych próbek w jednym doświadczeniu.

Istotne dla danego doświadczenia wymiary elementów próbki mierzono po zakończonej klimatyzacji bezpośrednio przed pomiarami odkształceń. Wymiary liniowe elementów złączy mierzono dwukrotnie, a wymiar grubości skleiny — sześciokrotnie, po trzy razy na przeciwległych powierzchniach każdej próbki, wykonując kolejne pomiary w odstępach co 5 mm wzdłuż skleiny. Za miarodajną przyjęto średnią grubość skleiny, obliczoną na podstawie wykonanych pomiarów odległości dwu przyległych do skleiny krawędzi sklejonych elementów. Odległość tę zmierzono na wygładzonych podłużnych przekrojach drewna za pomocą mikroskopu pomiarowego typu MM-36 o powiększeniu 30 : 1. Przesunięcia krzyża optycznego mikroskopu mierzono czujnikiem zegarowym, którego końcówka trzpienia stykała się z przesuwanym śrubą pociągową tubusem

mikroskopu. Dokładność pomiaru określona za pomocą mikrometru obiektowego i sprawdzona na rzeczywistych skleinach wynosiła 2 μ.

Sorpcję lub desorpcję wilgoci powodowano działając na próbki z czujnikami czynnymi powietrzem o wilgotności odmiennej od wilgotności powietrza równoważnej z początkową wilgotnością drewna, zachowując przy tym stałą temperaturę. Próbki z czujnikami kompensacyjnymi[1] przechowywano w tym czasie w zamkniętym pomieszczeniu, w którym wilgotność i temperatura powietrza znajdowały się w równowadze z wilgotnością drewna, nie powodując tym samym zmian jego wilgotności i wymiarów. W taki sam sposób postępowano z próbkami szklanymi, na których określano wpływ zmiennej wilgotności powietrza na wskazania tensometru oporowego.

Zmiany wilgotności drewna podczas sorpcji i desorpcji wilgoci oraz jego wilgotność przed wykonaniem próbek i po ich klimatyzacji określano metodą suszarkowo-wagową na próbkach z tych samych listew (na próbkach bliźniaczych), przechowywanych w jednakowych warunkach z próbkami służącymi do badania odkształceń. Próbki suszono w temperaturze 100 + 5°C do stałego ciężaru. Dokładność ważenia była nie mniejsza niż 0,01% ciężaru próbki suchej.

W odniesieniu do próbek utwardzonego kleju mocznikowego, przeznaczonych do pomiaru odkształceń, zastosowano taki sam sposób postępowania jak w przypadku próbek z drewna.

Przy pomiarze odkształceń spowodowanych siłami mechanicznymi obciążano próbki na maszynie wytrzymałościowej, stosując co najmniej 5 jednakowych stopni obciążenia, dobranych tak, aby obciążenie wstępne powodowało naprężenie równe w przybliżeniu 10% naprężenia niszczącego, a obciążenie maksymalne nie wywoływało naprężenia większego niż 35% naprężenia niszczącego. W ten sposób można było prawie całkowicie uniknąć odkształceń trwałych, co każdorazowo sprawdzano odciążając próbkę ponownie do obciążenia wstępnego. Zakres mierniczy maszyny wytrzymałościowej dobierano tak, aby nie przekraczał on dwukrotnego obciążenia maksymalnego. Przyrost naprężenia był równomierny i w ciągu 1 sekundy wynosił około 0,25% maksymalnego naprężenia.

Po osiągnięciu danego stopnia obciążenia włączono prąd w obwodzie pomiarowym i po upływie okresu 15 ± 5 sekund dokonywano odczytu na mostku tensometrycznym, po czym wyłączano prąd. Taki sam okres od włączenia prądu pomiarowego do odczytu na mostku zachowywano również przy pomiarach odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych.

---

[1] Termin „czujnik kompensacyjny" nie oddaje w tym przypadku funkcji tego czujnika, która nie polegała na kompensacji wpływu wilgotności, lecz przeciwnie — umożliwiała jego uwydatnienie. Termin ten zachowano jednak jako powszechnie używany w odniesieniu do mostkowego układu pomiarowego.

Tabela 2

Charakterystyka i zastosowanie przyrządów pomiarowych i regulacyjnych

Przyrząd pomiarowy lub regulacyjny	Wielkość mierzona lub sterowana	Zakres pomiaru lub sterowania	Dokładność pomiaru lub sterowania	Zastosowanie
Maszyna wytrzymałościowa typ 0,5-ZD-44 A. J. Amsler	siła	0 ... 50 kG 0 ... 100 kG 0 ... 250 kG 0 ... 500 kG	1%	a) obciążanie próbek przy pomiarach odkształceń b) obciążanie próbek przy określaniu wytrzymałości
Maszyna wytrzymałościowa typ FMGw-250 VEB Thüringer Industriewerk	siła	0 ... 50 kG 0 ... 100 kG 0 ... 250 kG	1%	
Komora klimatyzacyjna typ HFT G. Müller K. G., Heiligenstadt	wilgotność powietrza temperatura powietrza	40 ... 98% 20 ... 70 °C	10% 2 °C	nawilżanie i suszenie próbek przy pomiarach odkształceń
Galwanometr lusterkowy RFT-106	natężenie prądu elektr.	(0 ... 210) · 10^{-8}A	$2{,}8 \cdot 10^{-8}$A = = 0,08 °C	pomiar temperatury skleiny
Mostek tensometryczny typ T-2 Z-d Konstr. Tel. i Radiofonii Pol. Warsz.	odkształcenie	+ 14 ... — 14‰	± 0,005‰[a]	pomiary odkształceń
Tensometr mechaniczny typ Mk-3 VEB Werkstoffprüfmaschinen, Leipzig	odkształcenie	0 ... 3 mm baza 100 mm	0,01 mm = 0,1‰	pomiary odkształceń
Mikromierz zegarowy	wymiar liniowy	0 ... 10 mm	0,01 mm	a) odkształcenia sorpcyjne i desorpcyjne b) strzałka ugięcia próbki przy zginaniu

Mikromierz zegarowy	wymiar liniowy	0 . . . 1 mm	0,001 mm	a) grubość skleiny
Mikroskop pomiarowy typ MM-36 A. J. Amsler	wymiar liniowy	0 . . . 20 mm	0,01 mm	b) grubość forniru w drewnie warstwowym
Ultratermostat typ UT-12 WAT „Horyzont", Kraków	temperatura wody	0 . . . 100 °C	0,1 °C	cechowanie mikrotermoelementów i regulacja temperatury sklein
Mostek Wheatstone'a — laboratoryjny z opornikiem strunowym i suwakiem	oporność elektryczna	$R \pm (0 \ldots 10)\ \Omega$	0,05 Ω	pomiar zmian oporności czujników tensometrycznych
Waga analityczna typ WA-31 Zakł. Mech. Precyzyjnej, Gdańsk	ciężar	0 . . . 200 G	0,0001 G	wazenie próbek przy określaniu wilgotności
Suszarka laboratoryjna z termoregulacją typ HZ, WAT „Horyzont"	temperatura powietrza	50 . . . 200 °C	5 °C	suszenie próbek przy określaniu wilgotności
Śruba mikrometryczna	wymiar liniowy	0 . . . 25 mm	0,01 mm	pomiar grubości forniru
Suwmiarka	wymiar liniowy	0 . . . 130 mm	0,05 mm	pomiary elementów złączy
Kątomierz warsztatowy z noniuszem	kąt	0 . . . 360°	10′	ustawianie obrabiarki przy wykonywaniu uciosów

[a] Czułość przyrządu.

Aby zapewnić właściwą jakość sklejenia próbek, stosowano normalnie przyjęte parametry klejenia dla danego kleju i w każdym doświadczeniu sprawdzano wytrzymałość skleiny na ścinanie.

Na podstawie wartości średnich obliczonych z pojedynczych pomiarów przedstawiono graficznie wyniki poszczególnych doświadczeń, co umożliwia określenie stopnia regularności otrzymanych krzywych. Ponieważ przeprowadzone badania mają charakter metodyczny i zmierzają do ustalenia ogólnych zależności, pozwalających sprawdzić przydatność zastosowanej metody pomiarowej, znacznie zmniejszono liczbę próbek w porównaniu z liczbą normalnie przyjmowaną w badaniach mających na celu określenie liczbowej charakterystyki technicznych właściwości drewna. Zależnie od spodziewanego rozrzutu wyników liczba próbek użytych w jednym doświadczeniu wynosiła od 2 do 5.

Zastosowane urządzenia i przyrządy pomiarowe oraz ich dokładność podano w tabeli 2.

IV. DOŚWIADCZENIA WSTĘPNE

1. Wpływ rodzaju kleju na oporność czujnika tensometrycznego

Do pomiarów przygotowano próbki z drewna bukowego o wilgotności 6 ± 0,5%, sklejone klejem glutynowym, kazeinowym, mocznikowym i polioctanowinylowym. Kształt i wymiary próbki były zgodne z rys. 1 z tą różnicą, że w próbki nie wklejono mikrotermoelementów; kierunek włókien drewna był równoległy do długości czujnika tensometrycznego.

W jedną z gałęzi mostka Wheatstone'a włączano czujnik wklejony w próbkę drewnianą, w drugą zaś — czujnik o takiej samej oporności znamionowej, naklejony na powierzchni płytki szklanej klejem nitrocelulozowym i zaizolowany woskiem. Pierwszy pomiar wykonano po 2 tygodniach od sklejenia próbek a drugi — po 9 miesiącach od pierwszego pomiaru. W okresie pomiędzy pomiarami wszystkie próbki przechowywano w laboratorium, w którym wilgotność względna powietrza wynosiła 60 ± 15%. Wyniki pomiarów podano w tabeli 3.

Jak widać z liczb tabeli 2, we wszystkich próbkach, z wyjątkiem próbek sklejonych klejem glutynowym, nastąpiło zwiększenie oporności o 0,27 do 0,82 Ω, czyli o 0,23 do 0,71% oporności stwierdzonej przy pierwszym pomiarze; najmniejsze wartości tych zmian odnoszą się do próbek sklejonych klejem mocznikowym. Ponieważ tylko w przypadku tego kleju można było oczekiwać korozji drutu oporowego w czujnikach i — co za tym idzie — największego wzrostu oporności czujników, należy sądzić, że stwierdzone zmiany oporności nie zostały spowodowane korozją, lecz wpływem ubocznych czynników. Fakt, że w próbkach sklejonych najsilniej

Tabela 3

Zmiany oporności elektrycznej czujników tensometrycznych wklejonych między płytki z drewna bukowego; wartości średnie z czterech pomiarów

Klej	Oporność czujnika tensometrycznego Ω		Zmiana oporności	
	początkowa	po 9 miesiącach	bezwzględna Ω	względna %
Glutynowy	117,45	117,05	—0,40	—0,34
Kazeinowy	116,23	117,15	0,82	0,71
Mocznikowy	117,88	118,15	0,27	0,23
Polioctanowinylowy	116,15	116,70	0,65	0,56
Średnio	116,93	117,26	0,34	0,29

higroskopijnym klejem glutynowym nastąpił spadek oporności czujników, zdaje się przemawiać za tym, iż podczas składowania próbek pomiędzy pierwszym i drugim pomiarem zaszły istotne zmiany ich wilgotności. Prawdopodobnie te zmiany stanowiły zasadniczą przyczynę stwierdzonych przyrostów oporności, zacierającą ewentualny niewielki wpływ odczynu kleju, którego w tych warunkach nie udało się określić. Niezależnie od tego jednak wpływ odczynu klejów do drewna na oporność czujników tensometrycznych można uznać za nieistotny dla dokładności pomiarów krótkotrwałych, gdyż stwierdzone zmiany oporności nie wpływają na dokładność pomiaru odkształceń.

2. Wpływ ciepła wydzielanego przez czujnik tensometryczny na temperaturę skleiny

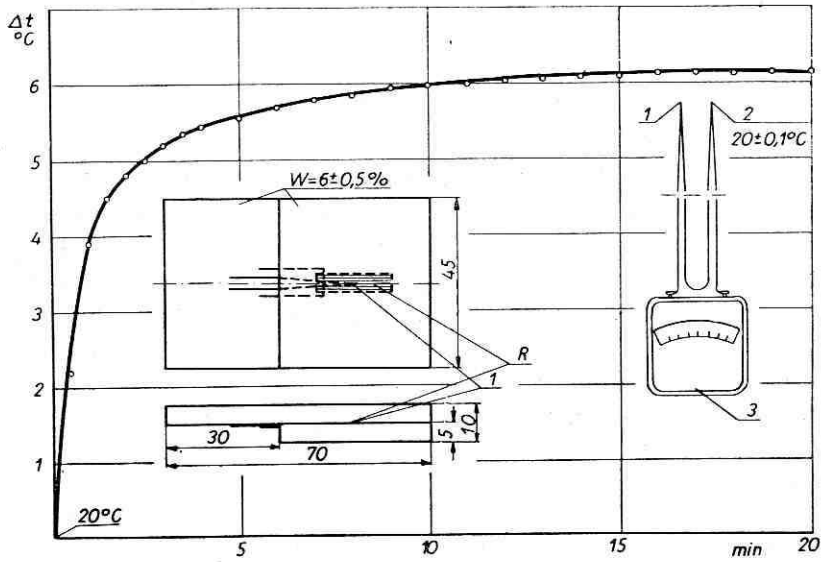
Wpływ ten zbadano mierząc temperaturę skleiny w miejscu wklejenia czujnika. Pomiar temperatury przeprowadzono za pomocą mikrotermoelementu miedziowo-konstantanowego, wklejonego łącznie z czujnikiem tensometrycznym między płytki z drewna brzozowego grubości 5 mm (rys. 1). Mikrotermoelementy zostały wykonane z drutu średnicy około 25 μ; dla wzmocnienia tak cienkiego drutu osłonięto je na całej długości (poza spoiną) otuliną wykonaną z bibułki sklejonej klejem nitrocelulozowym, tak samo jak w czujnikach tensometrycznych.[1]

Pomiary temperatury przeprowadzono w układzie kompensacyjnym za pomocą galwanometru lusterkowego RFT-106. Mikrotermoelement kompensacyjny wklejono w taką samą próbkę jak mikrotermoelement pomiarowy. Próbki umieszczono w zamkniętym naczyniu szklanym w zbiorniku wodnym ultratermostatu, utrzymującego temperaturę 20 ± 0,1°C. Pomiar rozpoczęto po upływie 5 godzin od włączenia ultratermostatu tak, aby temperatura wewnątrz próbek była równa temperaturze wody. Następnie włączono czujnik tensometryczny w obwód pomiarowego prądu mostka

[1] Mikrotermoelementy wykonał inż. H. Jungowski w Instytucie Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa w Warszawie.

tensometrycznego T-2 i co 30 sekund odczytywano przyrost temperatury skleiny. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rys. 1.

Jak widać z tego wykresu, przyrost temperatury w ciągu pierwszej minuty jest prawie prostoliniowy i wynosi około 4°C, następnie zaś prędkość jego maleje według krzywej zbliżającej się asymptotycznie do wartości przewyższającej mniej więcej o 6,2°C temperaturę początkową.



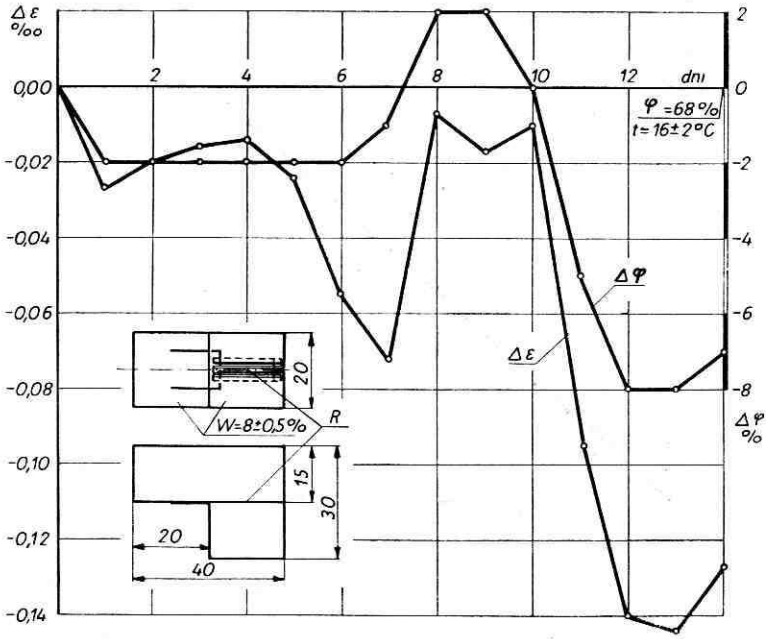
Rys. 1. Przyrost temperatury skleiny Δt wskutek wydzielania się ciepła Joule'a w oporowym czujniku tensometrycznym R: *1* — mikrotermoelement pomiarowy, *2* — mikrotermoelement kompensacyjny, *3* — galwanometr lusterkowy; wartości średnie z dwu pomiarów na próbkach z drewna brzozowego, sklejonego klejem glutynowym

Tę prawie już niezmienną wartość przyrostu temperatury osiąga się po upływie 20 minut od włączenia prądu pomiarowego.

Stwierdzony przebieg zjawiska stanowi doświadczalny dowód słuszności przypuszczeń A. Slikera (22) co do przyczyny stopniowego przesuwania się zerowego punktu tensometru przy badaniu odkształceń drewna. Ponieważ jednak w ciągu 30 sekund od włączenia prądu przyrost temperatury skleiny nie przekracza 2,5°C, nie może on spowodować istotnych zmian właściwości kleju ani drewna w trakcie pomiaru odkształceń natychmiastowych. Tylko przy długotrwałych pomiarach i termoplastycznym materiale badanych elementów można obawiać się błędów pomiarowych z tej przyczyny, a mianowicie zwiększenia pomierzonych odkształceń wskutek uplastycznienia się badanego materiału. Jednak nawet w tym przypadku włączanie prądu pomiarowego tylko w chwili dokonywania odczytu powinno znacznie ograniczyć wielkość błędów powstałych z tej przyczyny.

3. Wpływ wilgotności powietrza na wskazania czujnika tensometrycznego umieszczonego w skleinie

W doświadczeniu tym zastosowano próbki z drewna bukowego, których kształt i wymiary przedstawia rys. 2. Próbki z czujnikami czynnymi umieszczono w laboratorium, w którym wilgotność powietrza zmieniała się samorzutnie, a temperatura wynosiła 16 ± 2°C. Analogiczną próbkę



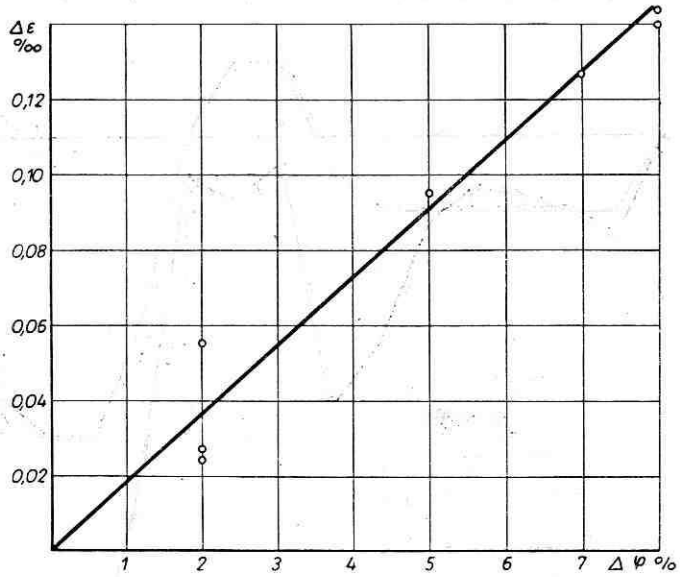
Rys. 2. Zmiany wskazań $\Delta\varepsilon$ oporowego czujnika tensometrycznego R wywołane zmianą względnej wilgotności powietrza $\Delta\varphi$; wartości średnie z dwu pomiarów na próbkach z drewna bukowego, sklejonego klejem glutynowym; kierunek pomiaru odkształcenia ε równoległy do włókien drewna

z czujnikiem kompensacyjnym przechowywano w takich samych warunkach, razem z próbkami zawierającymi czujniki czynne. Odczyty na mostku tensometrycznym powtarzano co 24 godziny przez okres 14 dni.

Wyniki tego doświadczenia przedstawiono na rys. 2, podając różnice względnej wilgotności powietrza i odpowiadające im różnice wskazań tensometru. Uzyskane krzywe tych wielkości mają podobny kształt, dowodzący znacznej zależności wskazań tensometru od wilgotności powietrza pomimo zastosowanej kompensacji. Otrzymane wartości liczbowe naniesiono na wykres, przedstawiający zależność różnicy wskazań tensometru $\Delta\varepsilon$ od różnicy względnej wilgotności powietrza $\Delta\varphi$ (rys. 3). Zależność ta okazała się zbliżona do prostoliniowej, przy czym zmianie wilgotności po-

wietrza o 1% odpowiada zmiana wskazania tensometru wynosząca około 0,018‰.

Wynik ten dowodzi, że w pomieszczeniach nieklimatyzowanych nie można prowadzić długotrwałych pomiarów odkształceń drewna, gdyż wpływ zmiennej wilgotności powietrza powodowałby istotne błędy pomiaru odkształcenia. Dla dokonywania takich pomiarów należałoby



Rys. 3. Przybliżona zależność zmiany wskazania oporowego czujnika tensometrycznego $\Delta\varepsilon$ od zmiany względnej wilgotności powietrza $\Delta\varphi$; drewno bukowe, pomiar odkształcenia ε w kierunku równoległym do włókien

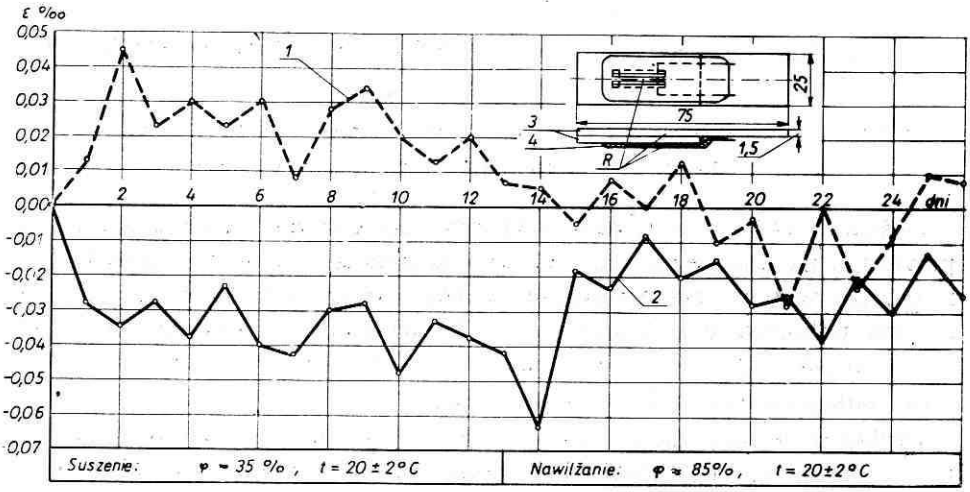
zapewnić bardzo staranną klimatyzację pomieszczenia, utrzymującą założoną wilgotność powietrza z tolerancją nie większą niż ± 1%, co jest praktycznie nieosiągalne. Natomiast przy pomiarach odkształceń natychmiastowych nie należy spodziewać się istotnych błędów pomiarowych, pod warunkiem uprzedniego doprowadzenia próbek z czujnikami czynnymi i kompensacyjnymi do jednakowej wilgotności, zbliżonej do równoważnej z wilgotnością względną i temperaturą otaczającego powietrza. Praktycznie można to osiągnąć przez składowanie próbek w laboratorium co najmniej przez kilka tygodni przed pomiarami.

Dla porównania przeprowadzono podobne doświadczenie z czujnikami wklejonymi za pomocą żywicy epoksydowej pomiędzy dwie płytki szklane; na powierzchni tych płytek naklejono klejem nitrocelulozowym dodatkowe czujniki, które zaizolowano woskiem. Próbki z czujnikami czynnymi poddano najpierw przez 13 dni osuszającemu działaniu powietrza o wilgotności około 35%, a następnie przez dalszych 13 dni nawilżano je w po-

wietrzu o wilgotności zbliżonej do 85%. W tym celu próbki przechowywano w eksykatorach nad roztworem kwasu siarkowego o różnym stężeniu, który ustalał wewnątrz eksykatora klimat o żądanej wilgotności powietrza. Próbki wyjmowano z eksykatora tylko raz dziennie w celu dokonania pomiaru. Taką samą próbkę z czujnikami kompensacyjnymi przechowywano przez cały czas doświadczenia w oddzielnym eksykatorze, w którym panowała wilgotność powietrza około 60%.

Doświadczenie to miało na celu sprawdzenie zmiany wskazań czujników wklejonych między płytki z niehigroskopijnego materiału za pomocą również niehigroskopijnego kleju i porównanie tej zmiany ze zmianą wskazań czujników naklejonych na powierzchni tego samego materiału klejem o niewielkiej higroskopijności. Wyniki doświadczenia podaje rys. 4.

Jak można było przypuszczać, zmiany wskazań czujników naklejonych na powierzchni okazały się zależne od wilgotności powietrza; przy suszeniu obserwowano stopniowo zwiększające się pozorne skrócenie, a przy nawilżaniu — pozorne wydłużenie się materiału, co należy tłumaczyć skurczem i pęcznieniem papierowej osłony i podkładki nośnej czujnika. Zmiany te



Rys. 4. Wpływ względnej wilgotności powietrza φ na wskazania ε oporowego czujnika tensometrycznego R: *1* — w skleinie, *2* — na powierzchni próbek szklanych sklejonych żywicą epoksydową, *3* — szkło, *4* — wosk; wartości średnie z dwu pomiarów

były jednak niewielkie i nie przekraczały 0,07‰ w ciągu całego doświadczenia. Zmiany wskazań czujników wklejonych między płytki szklane okazały się prawie takie same, lecz znak odkształceń pozornych w trakcie suszenia był dodatni (wydłużenie), a podczas nawilżania — ujemny (skrócenie), co nie da się objaśnić wpływem tych zabiegów. Przyczynę stwierdzonych pozornych odkształceń należy w tym przypadku uznać za niewyjaśnioną. Wydaje się, że określenie tej przyczyny byłoby możliwe na

podstawie analogicznych badań, przeprowadzonych na próbkach z drewna sklejonych klejem niehigroskopijnym oraz na próbkach szklanych sklejonych klejami higroskopijnymi.

Na podstawie liczbowych wartości stwierdzonych odkształceń pozornych dochodzi się do wniosku, że w przypadku niehigroskopijnego podłoża i kleju zmiany wskazań tensometru wywołane pęcznieniem lub skurczem czujników czynnych są nieznaczne, nawet przy dużych i dość długotrwałych zmianach względnej wilgotności powietrza; dlatego też nie mają one praktycznego znaczenia dla dokładności pomiarów tensometrycznych, gdyż normalna kompensacja jest w stanie całkowicie je zlikwidować.

Porównanie wyników doświadczeń przeprowadzonych na próbkach szklanych i drewnianych prowadzi do dalszego wniosku, że zasadniczą przyczynę odkształceń wykazywanych przez czujniki wklejone w drewno stanowi zmiana jego wymiarów, wywołana sorpcją lub desorpcją wilgoci. Tak więc pomiar tych odkształceń drewna za pomocą tensometru oporowego powinien dać wyniki nie obarczone błędami, spowodowanymi przez czynniki uboczne.

V. BADANIE ODKSZTAŁCEŃ SORPCYJNYCH I DESORPCYJNYCH

1. Pomiary porównawcze tensometrem oporowym i mikromierzami zegarowymi

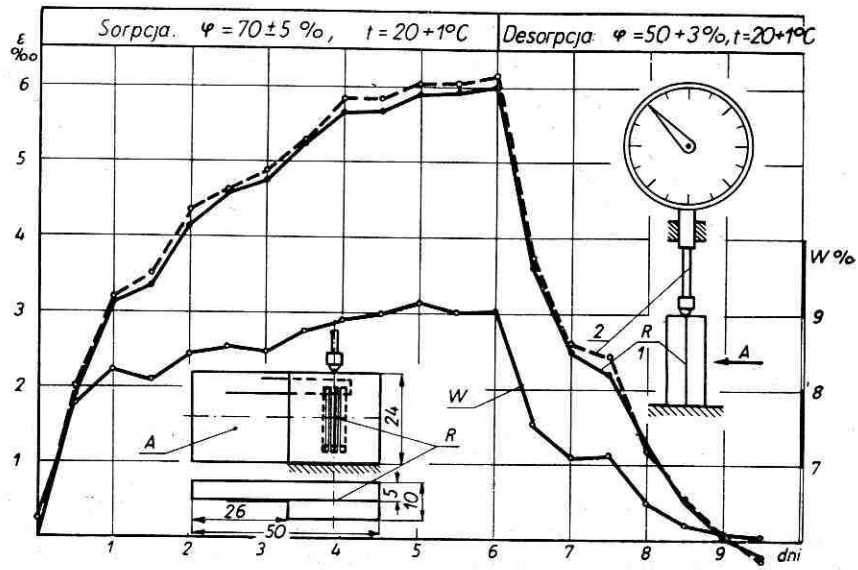
Doświadczenie to wykonano podobnie, jak badanie wpływu wilgotności powietrza na wskazania czujnika umieszczonego w skleinie próbek szklanych. Do badania przygotowano próbki z drewna brzozowego, sklejone klejem polioctanowinylowym; czujniki wklejono w kierunku prostopadłym do włókien drewna, aby nawet przy małych zmianach jego wilgotności odkształcenie było możliwie duże.

Próbki po klimatyzacji w laboratorium ustawiono na podstawach mikromierzy zegarowych, którymi mierzono odkształcenia w celu porównania ich wartości z wartością odkształceń pomierzonych tensometrem oporowym. Próbki z czujnikami czynnymi wstawiono do komory klimatyzacyjnej, w której wilgotność powietrza przy nawilżaniu próbek wynosiła 70 ± 5%, przy suszeniu zaś — 50 + 3%; próbkę z czujnikiem kompensacyjnym zamknięto w drugiej komorze, w której utrzymywano stałą wilgotność powietrza, wynoszącą 60 ± 2%.

Obok próbek z czujnikami tensometrycznymi umieszczono próbki bliźniacze, przeznaczone do określania bieżącej wilgotności drewna. Obie komory otwierano tylko dwa razy w ciągu doby na okres niezbędny do wyjęcia tych próbek do ważenia; wskazania mikromierzy zegarowych odczytywano przez oszklone drzwi komory klimatyzacyjnej.

Mostek tensometryczny połączono na cały czas badania z czujnikami w stały układ pomiarowy, zasilany prądem tylko podczas pomiarów, które wykonywano również dwa razy w ciągu doby. Kształt i wymiary próbek przedstawia rys. 5, na którym podano również graficznie wyniki pomiarów.

Zgodnie z przewidywaniami opartymi na doświadczeniach wstępnych odkształcenia pomierzone tensometrem oporowym okazały się prawie

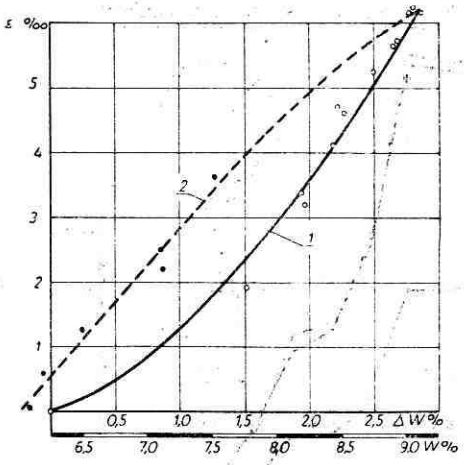


Rys. 5. Porównawczy pomiar odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych ε w poprzek włókien za pomocą oporowych czujników tensometrycznych R (*1*) i mikromierzy zegarowych (*2*): W — wilgotność drewna, φ — względna wilgotność powietrza, t — temperatura; drewno brzozowe, klej polioctanowinylowy; wartości średnie z pięciu pomiarów

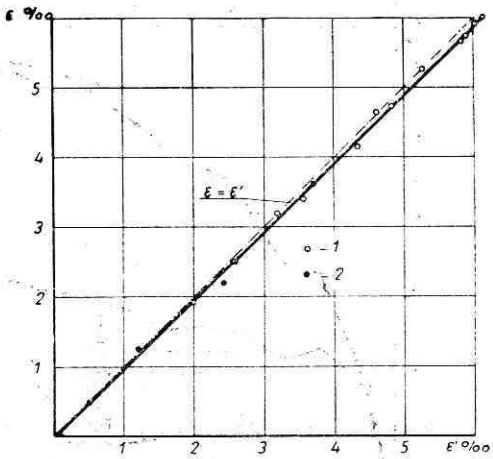
jednakowe z odkształceniami obliczonymi na podstawie wyników pomiaru mikromierzami. Współbieżność obu krzywych odkształceń z krzywą zmian wilgotności drewna jest również zupełnie wyraźna. Na podstawie uzyskanych wyników wykreślono krzywą zależności odkształcenia pomierzonego tensometrem oporowym od przyrostu wilgotności drewna (rys. 6); zależność ta wykazała charakterystyczną dla drewna histerezę odkształceń przy sorpcji i desorpcji wilgoci. Wreszcie na rys. 7 przedstawiono charakter współzależności odkształceń pomierzonych tensometrem oporowym i odkształceń obliczonych na podstawie wskazań mikromierzy zegarowych. Zależność ta okazała się prostoliniowa i bardzo mało odbiegająca od prostej, wyrażającej równość obu tych odkształceń.

Na podstawie tak opracowanych wyników można stwierdzić, że tensometr oporowy nadaje się do pomiaru sorpcyjnych i desorpcyjnych odkształceń drewna przy niezbyt dużych zmianach jego wilgotności, za-

wartych w przedziale higroskopijnym. Zakres pomiarowy tensometru jest jednak znacznie mniejszy od całkowitego przedziału sorpcyjnych odkształceń drewna w poprzek włókien; zmniejsza to w pewnym stopniu przydatność tego przyrządu i predystynuje go do pomiarów niewielkich odkształceń, kiedy wymagana jest duża ich dokładność. Należy jednak zauważyć, że dołączenie dodatkowej grupy oporów do układu pomiarowego umożliwia



Rys. 6. Zależność odkształcenia w poprzek włókien ε od zmiany wilgotności ΔW drewna brzozowego: *1* — sorpcja (deformacja), *2* — desorpcja (redeformacja)



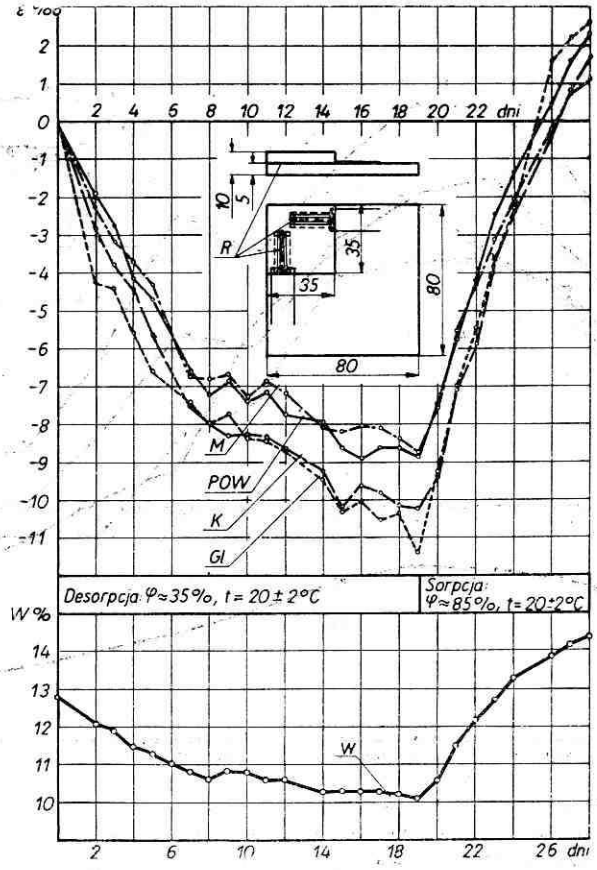
Rys. 7. Porównanie wyników pomiaru odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych w poprzek włókien drewna brzozowego: ε — za pomocą oporowych czujników tensometrycznych, ε' — za pomocą mikromierzy zegarowych; *1* — sorpcja, *2* — desorpcja

znaczne rozszerzenie zakresu pomiarów. Nieodzownym warunkiem uzyskania dokładności wyników jest utrzymanie przez cały czas pomiarów niezmiennej oporności czujnika kompensacyjnego. Wyniki doświadczeń wstępnych wskazują, że można by to osiągnąć stosując czujnik wklejony pomiędzy płytki szklane, co dałoby kompensację o niezmiennej oporności, praktycznie niewrażliwą na zmiany wilgotności powietrza w otoczeniu.

2. Pomiary odkształceń w poprzek i wzdłuż włókien drewna

Pomiary te przeprowadzono na próbkach z drewna bukowego, sklejonych klejami o różnej higroskopijności i różnej sztywności skleiny. Zmiany wilgotności drewna uzyskiwano przez jego suszenie i nawilżanie w eksykatorach, tak jak w poprzednio opisanym doświadczeniu, mającym na celu określenie wpływu wilgotności powietrza na wskazania czujników w próbkach szklanych. Próbki kompensacyjne, oddzielne dla każdego

rodzaju kleju, przechowywano w innym eksykatorze, w którym panowała stała wilgotność powietrza, równoważna z początkową wilgotnością drewna. Wyjmując próbki z eksykatorów do dokonania pomiarów odkształceń, ważono je jednocześnie i na tej podstawie obliczano bieżącą ich wilgotność.

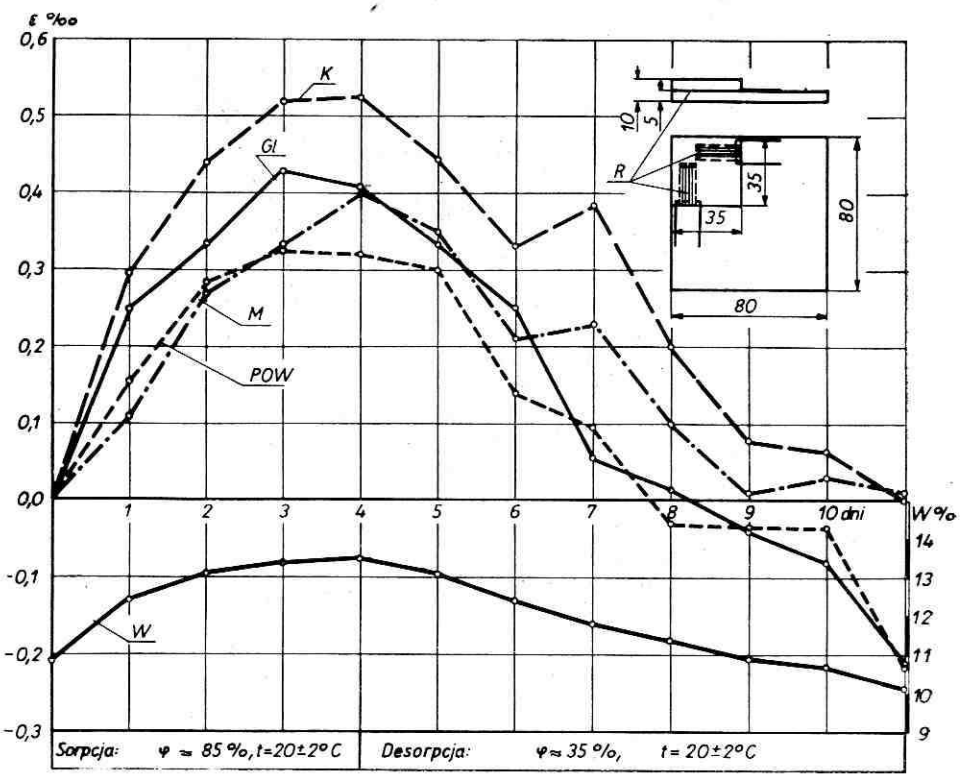


Rys. 8. Odkształcenia sorpcyjne i desorpcyjne ε w poprzek włókien drewna bukowego: *R* — oporowy czujnik tensometryczny, *K* — klej kazeinowy, *Gl* — klej glutynowy, *M* — klej mocznikowy, *POW* — klej polioctanowinylowy, *W* — wilgotność drewna, φ — względna wilgotność powietrza, *t* — temperatura; wartości średnie z dwu pomiarów

Wyniki pomiarów odkształceń w poprzek włókien[1] oraz kształt i wymiary próbek przedstawia rys. 8, wykazujący taki sam charakter odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych, jaki stwierdzono dla drewna brzozowego (rys. 5). Różnice wartości odkształceń otrzymanych dla próbek

[1] Pomiary wykonała A. Prędkiewiczówna.

sklejonych klejami o różnej higroskopijności są wyraźne, przy czym dają się zauważyć mniejsze odkształcenia próbek sklejonych klejami mocznikowym i polioctanowinylowym aniżeli próbek sklejonych higroskopijnym klejem glutynowym lub kazeinowym. Należy więc przypuszczać, że mała higroskopijność skleiny może zmniejszać wartość pomierzonego odkształ-



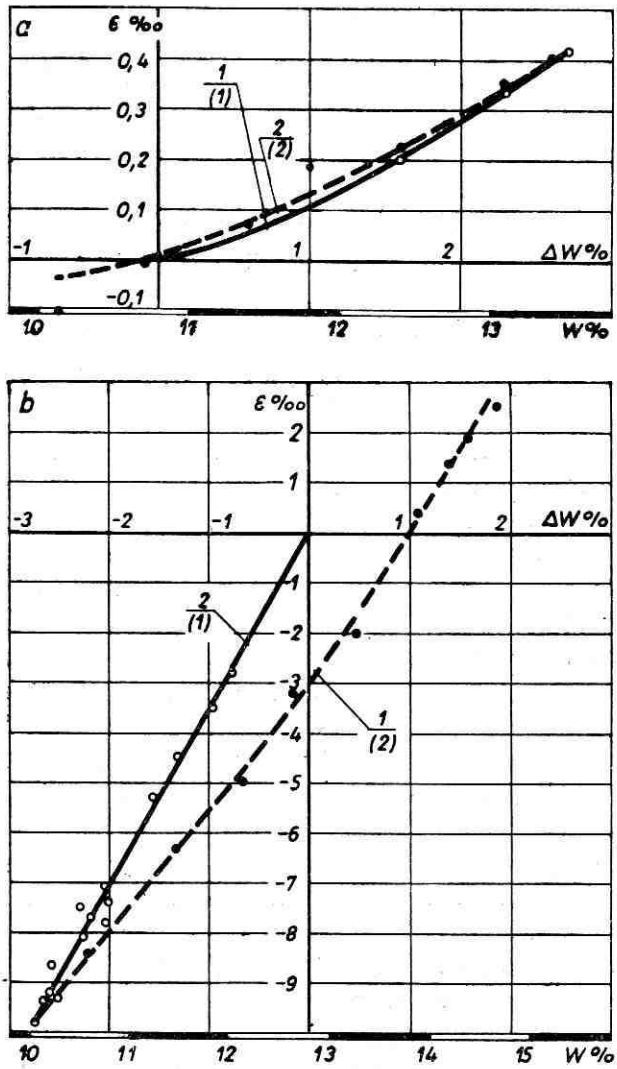
Rys. 9. Odkształcenia sorpcyjne i desorpcyjne ε wzdłuż włókien drewna bukowego: R — oporowy czujnik tensometryczny, K — klej kazeinowy, Gl — klej glutynowy, M — klej mocznikowy, POW — klej polioctanowinylowy, W — wilgotność drewna, φ — względna wilgotność powietrza, t — temperatura; wartości średnie z dwu pomiarów

cenia, prawdopodobnie wskutek wolniejszego wchłaniania wilgoci przez przyskleinowe warstwy drewna, silnie przesycone mało higroskopijnym klejem. Odwrotnego zjawiska można się spodziewać w przypadku klejów o higroskopijności większej od higroskopijności drewna.

Takie same pomiary przeprowadzono na tych samych próbkach za pomocą czujników tensometrycznych, wklejonych wzdłuż włókien drewna. Wyniki tych pomiarów podane na rys. 9 pozwalają stwierdzić, że odkształcenia drewna wzdłuż włókien są przy sorpcji i desorpcji znacznie mniejsze aniżeli poprzednio pomierzone odkształcenia w poprzek włókien, co stanowi odzwierciedlenie anizotropii skurczu i pęcznienia drewna. Wpływ

higroskopijności kleju jest podobny do wpływu zaobserwowanego przy pomiarach odkształceń w poprzek włókien drewna.

Na podstawie wyników obu tych doświadczeń wykreślono krzywe zależności odkształcenia wzdłuż i w poprzek włókien drewna bukowego od zmiany jego wilgotności podczas sorpcji i desorpcji (rys. 10). Odkształcenia wzdłuż włókien przy sorpcji i desorpcji są prawie jednakowe, tzn. redeformacja jest całkowita i nie opóźniona. Różnicy wilgotności wynoszącej



Rys. 10. Zależność odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych ε drewna bukowego od zmiany jego wilgotności ΔW: *a* — wzdłuż włókien, *b* — w poprzek włókien; *1* — sorpcja, *2* — desorpcja, (*1*) — deformacja, (*2*) — redeformacja

1% odpowiada odkształcenie wzdłuż włókien o wartości około 0,14‰; odkształcenie to zawarte jest w granicach wartości podawanych w literaturze (4) dla drewna bukowego. Zależność odkształcenia w poprzek włókien od zmiany wilgotności drewna przy desorpcji jest prostoliniowa, odkształcenie zaś przypadające na 1% wilgotności wynosi około 3,5‰, a więc jest również zawarte w granicach wartości podawanych w literaturze. Natomiast redeformacja przy sorpcji jest opóźniona i wykazuje normalnie obserwowaną histerezę.

Przeprowadzone doświadczenia można zrekapitulować stwierdzeniem, że pomiar odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych drewna tensometrem oporowym daje wyniki zgodne, zarówno co do ogólnego charakteru, jak i co do wartości liczbowych, z wynikami uzyskiwanymi na drodze pomiarów dotychczas stosowanymi metodami.

VI. BADANIE ODKSZTAŁCEŃ PRZY ROZCIĄGANIU, ŚCISKANIU I ZGINANIU

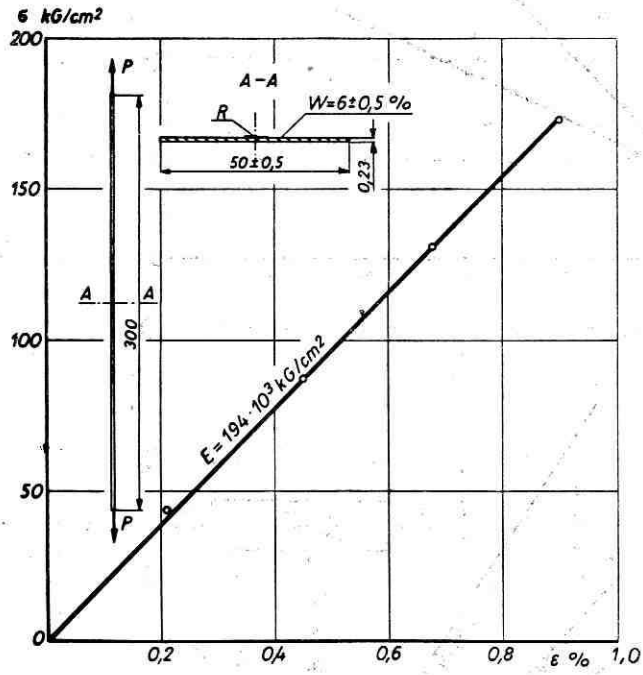
1. Pomiary odkształceń forniru przy rozciąganiu oraz kleju przy ściskaniu

Pomiary odkształceń forniru i kleju miały na celu określenie stałych sprężystych tych materiałów, umożliwiające porównanie uzyskanych wartości tych stałych z wartościami stwierdzonymi w dalszych badaniach dla drewna warstwowego, wykonanego z tego samego forniru i sklejonego tym samym klejem.

Badanie odkształceń forniru brzozowego przeprowadzono przy rozciąganiu wzdłuż włókien; kształt i wymiary próbek oraz wyniki tego badania podano na rys. 11. Zależność odkształcenia od naprężenia okazała się prostoliniowa, a po odciążeniu próbek do obciążenia wstępnego redeformacja ich była prawie całkowita. Kontrolne pomiary odkształceń za pomocą tensometru mechanicznego Mk-3 wykazały praktycznie takie same wartości jak tensometr oporowy, a stwierdzone różnice modułu sprężystości podłużnej tych samych próbek nie przekraczały 5%.

Do pomiaru odkształceń kleju wykonano próbki w postaci walców z kleju mocznikowego, utwardzonego w cylindrach szklanych (próbówkach). Do kleju dodawano różne ilości mąki żytniej, aby zróżnicować w ten sposób jego sprężystość (11). Utwardzony klej wyjęto z próbówek i klimatyzowano do stałego ciężaru w pomieszczeniu laboratorium, w którym wilgotność względna powietrza wynosiła 60 ± 10%, a temperatura 20 ± 2°C. Następnie próbki obrobiono na tokarce, nadając im dokładny kształt i wymiary, i naklejono czujniki tensometryczne stosując do tego celu klej nitrocelulozowy. Czujniki naklejono w kierunku równoległym i prostopadłym do tworzącej walcowych próbek, co umożliwiło równoczesny pomiar odkształceń podłużnych i poprzecznych przy ściskaniu.

Na podstawie wyników tych pomiarów, które przedstawiono na rys. 12, obliczono liczbę Poissona ν jako stosunek odkształcenia poprzecznego [1] do podłużnego, moduł sprężystości podłużnej E i moduł sprężystości poprzecznej G.[2] Stwierdzono, że zależność odkształcenia podłużnego i poprzecznego od naprężenia ściskającego jest wprostproporcjonalna (liniowa) i że od-



Rys. 11. Zależność odkształcenia ε od naprężenia σ przy rozciąganiu wzdłuż włókien forniru brzozowego: R — oporowy czujnik tensometryczny, W — wilgotność drewna; wartości średnie z pięciu pomiarów

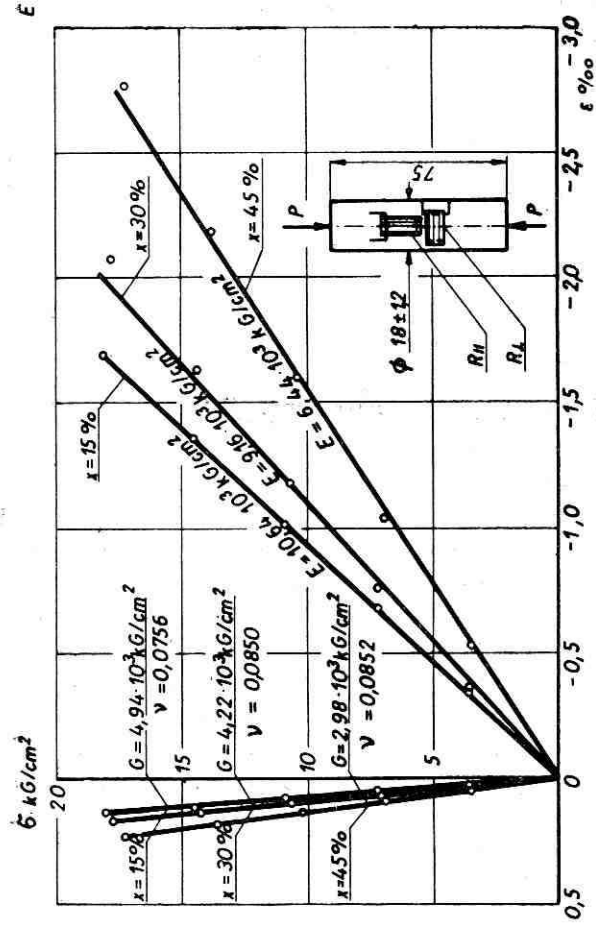
kształcenia te są przeciwnego znaku: podłużne — ujemne, a poprzeczne — dodatnie. Ze wzrostem zawartości mąki żytniej w kleju mocznikowym moduły jego sprężystości podłużnej i poprzecznej maleją, a liczba Poissona nieznacznie wzrasta. Zależność modułów sprężystości od zawartości mąki w kleju okazała się w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalna (rys. 13).

Wszystkie te wyniki są zgodne z przesłankami teoretycznymi, co wskazuje na przydatność tensometrii oporowej w badaniach mających na celu określenie stałych sprężystych utwardzonego kleju. Stwierdzenie to ma

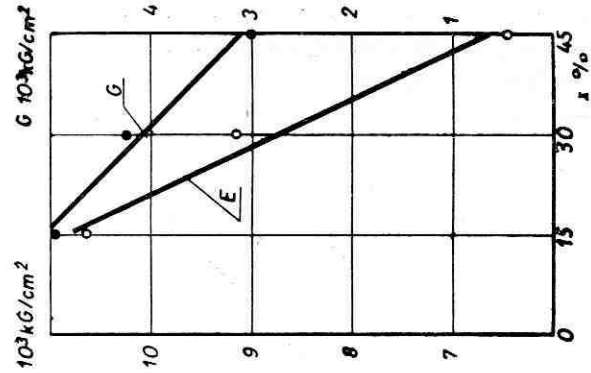
[1] Ze względu na walcowy kształt próbek pomierzone wartości odkształceń na obwodzie próbki podzielono przez π, uzyskując odpowiadające im wartości odkształceń poprzecznych.

[2] Moduł sprężystości poprzecznej obliczono według wzoru:

$$G = \frac{E}{2\,(la + \nu)}$$



Rys. 12. Zależność odkształcenia ε od naprężenia σ przy ściskaniu utwardzonego kleju mocznikowego: $R_{\parallel}$ — czujnik oporowy mierzący odkształcenie podłużne, $R_{\perp}$ — czujnik oporowy mierzący odkształcenia poprzeczne, x — zawartość mąki żytniej w kleju, E — moduł sprężystości podłużnej, G — moduł sprężystości poprzecznej, ν — liczba Poissona; wartości średnie z trzech pomiarów



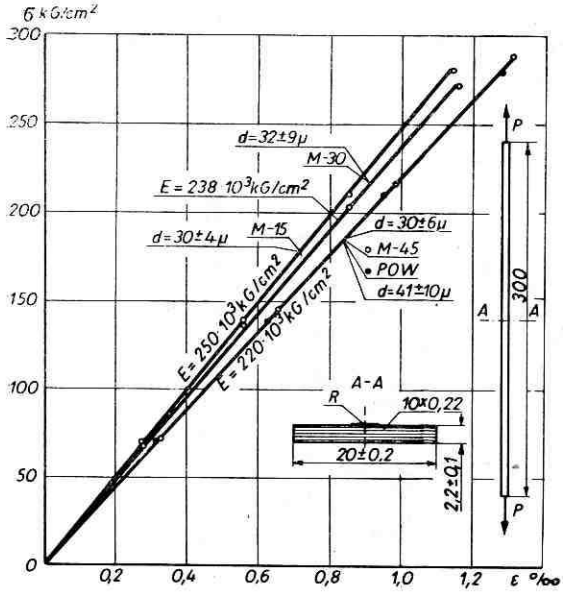
Rys. 13. Przybliżona zależność modułu sprężystości podłużnej E i modułu sprężystości poprzecznej G od zwartości x mąki żytniej w kleju mocznikowym

istotne znaczenie, gdyż dotychczas brak danych co do wartości stałych sprężystych utwardzonego kleju, albowiem inne metody tensometryczne nie umożliwiają dostatecznie dokładnego pomiaru odkształceń.

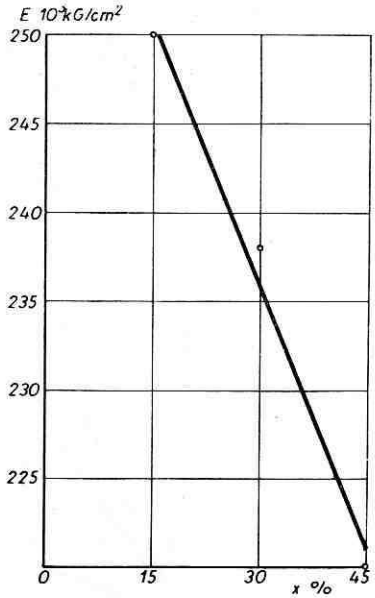
2. Pomiary odkształceń drewna warstwowego przy rozciąganiu i zginaniu

Do badań zastosowano równoległowarstwowe drewno brzozowe, sklejone klejem polioctanowinylowym oraz klejem mocznikowym o takich samych zawartościach mąki żytniej, jak w poprzednim badaniu. Grubości sklein i warstw forniru w drewnie warstwowym pomierzono mikroskopem MM-36, wyposażonym dodatkowo w mikronowy mikromierz zegarowy, co umożliwiło zwiększenie dokładności pomiaru do 2 μ. Wyniki pomiarów odkształceń przy rozciąganiu oraz kształt i wymiary próbek użytych do tego badania przedstawiono na rys. 14.

Zależność odkształcenia od naprężenia rozciągającego okazała się wprost-proporcjonalna (liniowa), a wartość modułu sprężystości — malejąca ze wzrostem zawartości mąki żytniej w kleju mocznikowym. Moduł spręży-



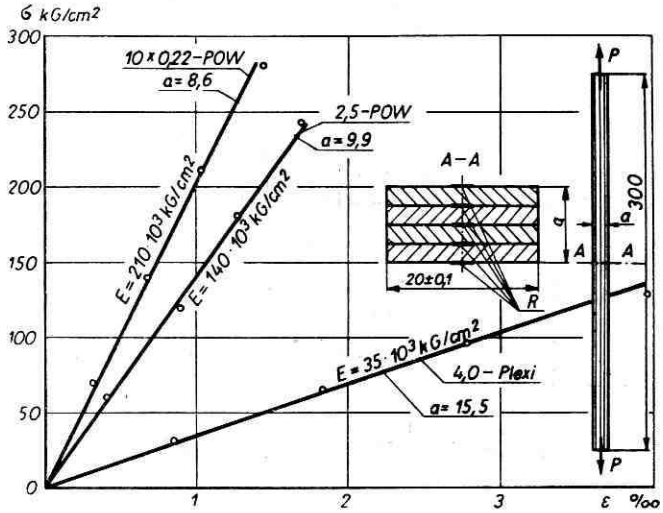
Rys. 14. Zależność odkształcenia ε od naprężenia σ przy rozciąganiu brzozowego drewna warstwowego: d — grubość skleiny, *POW* — drewno sklejone klejem polioctanowinylowym, *M-15* — drewno sklejone klejem mocznikowym o zawartości 15% mąki żytniej, *M-30* — drewno sklejone klejem mocznikowym o zawartości 30% mąki żytniej, *M-45* — drewno sklejone klejem mocznikowym o zawartości 45% mąki żytniej



Rys. 15. Przybliżona zależność modułu sprężystości podłużnej E brzozowego drewna warstwowego od zawartości x mąki żytniej w kleju mocznikowym

stości drewna warstwowego sklejonego klejem polioctanowinylowym wykazał taką samą wartość jak moduł sprężystości drewna sklejonego klejem mocznikowym o największej zawartości mąki żytniej, która wynosiła 45%. Niezależnie od rodzaju kleju wartość modułu sprężystości drewna warstwowego jest zawsze większa od wartości modułu uzyskanej dla forniru, z którego sklejono drewno warstwowe. Stwierdzenie to jest zgodne z wynikami uzyskanymi przez H. Hertla (8) i A. Korzeniowskiego (11). Przedstawiona na rys. 15 przybliżona zależność modułu sprężystości drewna warstwowego od zawartości mąki żytniej w kleju mocznikowym ma charakter odwrotnie proporcjonalny, tak samo jak w przypadku poprzedniego badania utwardzonego kleju; wyniki te są zgodne z wcześniej wykonanymi badaniami autora (11).

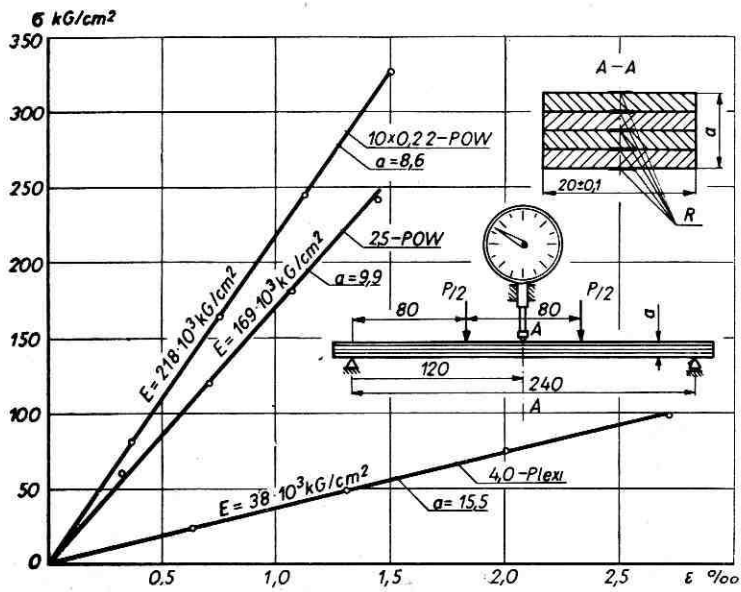
Po przeprowadzeniu badania odkształceń drewna warstwowego przy rozciąganiu, 4 próbki tego drewna, sklejonego klejem polioctanowinylowym, sklejono ze sobą w sposób przedstawiony na rys. 16, otrzymując jedną próbkę czterokrotnie grubszą. Na jednej z powierzchni tej próbki naklejono dodatkowo piąty czujnik tensometryczny. Jednocześnie sklejono klejem polioctanowinylowym próbkę z czterech warstw litego drewna brzozowego o grubości po 2,5 mm oraz próbkę z czterech warstw plexiglasu o grubości po 4 mm. W próbkach tych również umieszczono czujniki tensometryczne w każdej skleinie oraz na obu powierzchniach.



Rys. 16. Zależność średniej wartości odkształcenia ε od naprężenia σ przy rozciąganiu brzozowego drewna warstwowego i plexiglasu: *10×0,22-POW* — drewno warstwowe z fornirów grubości 0,22 mm sklejonych klejem polioctanowinylowym, *2,5-POW* — drewno warstwowe z warstw grubości 2,5 mm sklejonych klejem polioctanowinylowym, *4,0-Plexi* — plexiglas sklejony z warstw o grubości 4 mm

Odkształcenia wszystkich trzech próbek pomierzono przy rozciąganiu i przy zginaniu, odczytując wskazania każdego czujnika. Przy zginaniu dodatkowo zmierzono kolejne strzałki ugięcia przy poszczególnych stopniach obciążenia, używając do tego celu mikromierza zegarowego. Aby uniknąć wgniotów w badanym materiale, pomiędzy naporami i próbką umieszczono podkładki z blachy stalowej, co zapobiegło błędom pomiaru strzałki ugięcia. Zarówno przy rozciąganiu, jak przy zginaniu badano próbki dwukrotnie, obracając je o 180° w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku siły; miało to na celu wyeliminowanie wpływu lokalnych niejednorodności materiału na wynik pomiaru.

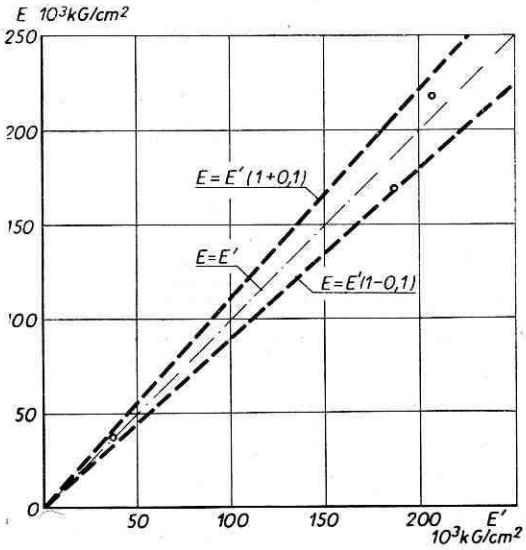
Na rys. 16 przedstawiono zależność średniego odkształcenia, obliczonego ze wskazań wszystkich pięciu czujników tensometrycznych, od naprężenia



Rys. 17. Zależność średniej wartości odkształcenia ε skrajnych włókien w strefie ściskanej i w strefie rozciąganej od naprężenia σ przy zginaniu brzozowego drewna warstwowego i plexiglasu: *10×0,22-POW* — drewno warstwowe z fornirów grubości 0,22 mm sklejonych klejem polioctanowinylowym, *2,5-POW* — drewno warstwowe z warstw grubości 2,5 mm sklejonych klejem polioctanowinylowym, *4,0-Plexi* — plexiglas sklejony z warstw grubości 4 mm

rozciągającego. Na rys. 17 podano zależność średniego odkształcenia skrajnych włókien w strefie ściskanej i w strefie rozciąganej od naprężenia przy zginaniu. Zarówno przy rozciąganiu, jak przy zginaniu zależność ta okazała się wprostproporcjonalna (liniowa). Obliczone na podstawie pomierzonych odkształceń moduły sprężystości podłużnej przy rozciąganiu i zginaniu różnią się o 3,8% dla drewna warstwowego, o 20% dla drewna

litego i o 8,6% dla plexiglasu. Moduły sprężystości tych materiałów, określone na podstawie pomiaru strzałki ugięcia, są równe z dokładnością ± 10% wartościom modułu, obliczonym na podstawie odkształceń pomierzonych tensometrem oporowym (rys. 18). Wreszcie na podstawie wartości odkształcenia, wykazanego przez poszczególne czujniki tensometryczne, określono rozkład odkształceń na grubości próbki przy stałej wartości naprężenia rozciągającego (rys. 19) i zginającego (rys. 20).



Rys. 18. Porównanie modułu sprężystości podłużnej E, obliczonego na podstawie odkształceń zmierzonych oporowymi czujnikami tensometrycznymi, z modułem sprężystości podłużnej E', obliczonym na podstawie strzałek ugięcia zmierzonych mikromierzem zegarowym

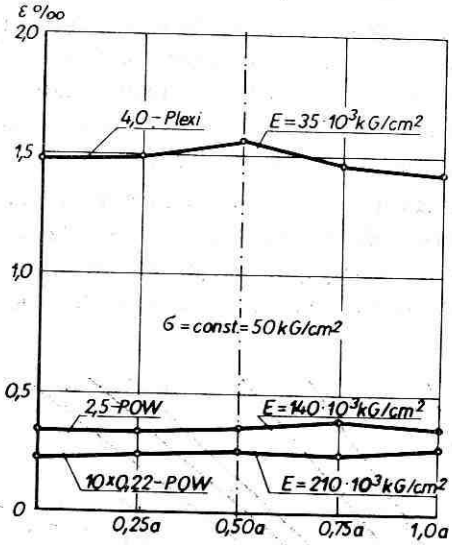
Porównanie wartości modułów sprężystości przy zginaniu, określonych na podstawie odkształceń zmierzonych tensometrem oporowym i na podstawie strzałki ugięcia, dowodzi, że obie te metody są równorzędne. Różnica modułów sprężystości określonych przy rozciąganiu i zginaniu jest większa dla izotropowego plexiglasu niż dla anizotropowego drewna równoległowarstwowego; dowodzi to, że taki stopień anizotropii nie wywiera istotnego wpływu na wyniki pomiaru odkształcenia tensometrem oporowym przy tych rodzajach obciążenia. Natomiast znacznie większe różnice modułów sprężystości przy rozciąganiu i zginaniu drewna litego zdają się wskazywać, że w tym materiale liczbowe wartości modułu sprężystości przy rozciąganiu i zginaniu różnią się w sposób istotny wskutek jego większej anizotropii.

Prawie jednakowe wartości odkształceń, wykazane przez wszystkie czujniki tensometryczne w próbkach rozciąganych, dowodzą równomiernego rozkładu naprężeń na grubości elementu rozciąganego, co jest zgodne z przesłankami teoretycznymi.

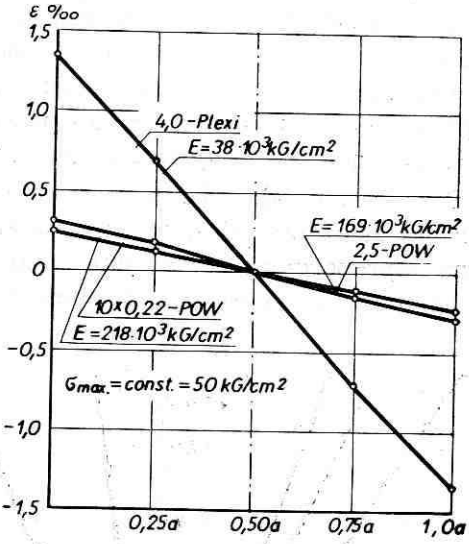
W próbkach zginanych — niezależnie od rodzaju badanego materiału — strefa obojętna pokrywa się z osią symetrii przekroju, a odkształcenia wzrastają liniowo ku skrajnym włóknom, osiągając prawie te same war-

tości maksymalne w strefie ściskanej co w strefie rozciąganej. Wynik ten dowodzi zgodności stwierdzonego rozkładu naprężeń z rozkładem dającym się przewidzieć teoretycznie; również w tym przypadku anizotropia materiału nie wykazuje istotnego wpływu na rozkład odkształceń.

Na podstawie przeprowadzonych badań można ostatecznie stwierdzić, że pomiar odkształceń tensometrem oporowym za pomocą czujników umieszczonych w skleinach umożliwia doświadczalne określenie rozkładu



Rys. 19. Rozkład odkształceń ε na grubości a rozciąganych próbek brzozowego drewna warstwowego i plexiglasu



Rys. 20. Rozkład odkształceń ε na wysokości a przekroju zginanych próbek brzozowego drewna warstwowego i plexiglasu

odkształceń na przekroju elementów rozciąganych i zginanych, stwarzając tym samym możność analizy rozkładu naprężeń wewnątrz materiału, sklejonego z płaskich warstw. Ponieważ różnica pomiędzy obciążeniem rozciągającym i ściskającym polega tylko na odwrotnym znaku naprężeń, można przez analogię odnieść powyższe stwierdzenie również do elementów ściskanych.

VII. BADANIE ODKSZTAŁCEŃ W ROZCIĄGANYCH ZŁĄCZACH WZDŁUŻNO-UCIOSOWYCH

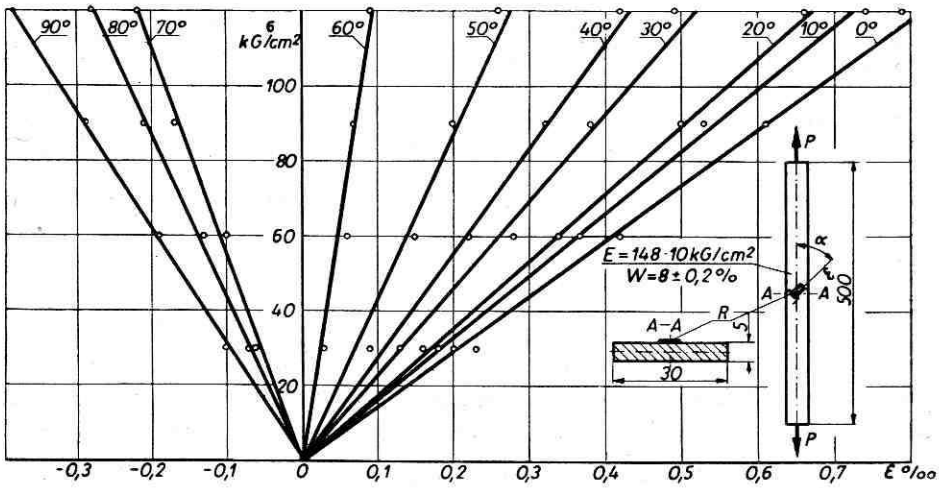
1. Pomiary odkształceń litego materiału

Pomiary przeprowadzone na litym materiale miały na celu określenie liczbowych wartości odkształceń i porównanie ich z wartościami odkształ-

ceń, otrzymanymi w trakcie dalszych badań złączy wzdłużno-uciosowych, wykonanych z tych samych rodzajów materiału. Do badań zastosowano drewno brzozowe oraz plexiglas.

Na bocznej powierzchni próbek z tych materiałów naklejono po 10 czujników tensometrycznych, usytuowanych pod różnymi kątami od podłużnej osi próbki, pokrywającej się z osią działania siły rozciągającej; kąty te zróżnicowano co 10° w zakresie od 0 do 90°. Takie rozmieszczenie czujników umożliwiło równoczesny pomiar odkształceń w wybranych kierunkach i skonfrontowanie otrzymanych wyników z teoretyczną zależnością odkształcenia od wartości kąta. Na podstawie wartości odkształceń w kierunku równoległym od osi próbki można było również obliczyć moduły sprężystości podłużnej drewna i plexiglasu. Wyniki pomiarów dla drewna brzozowego podano na rys. 21 a dla plexiglasu — na rys. 22.

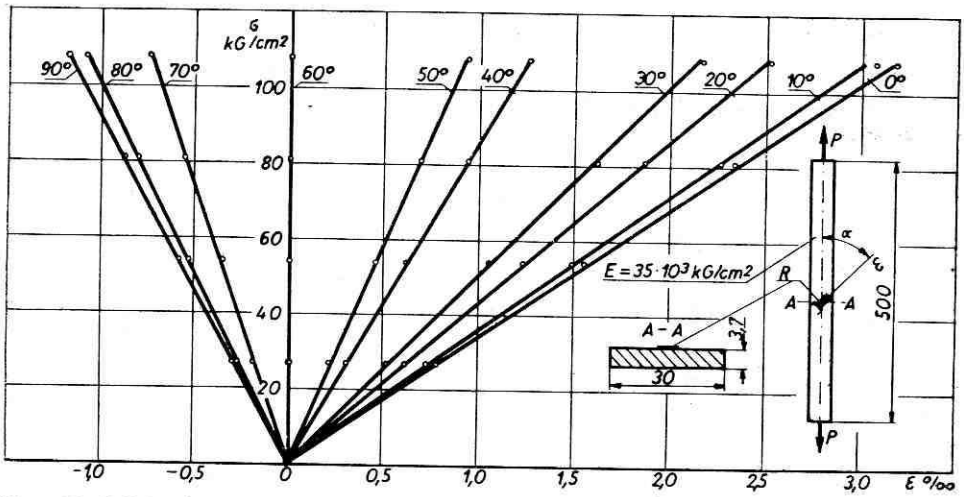
Niezależnie od rodzaju materiału i kąta nachylenia czujnika do osi próbki zależność odkształcenia od naprężenia rozciągającego okazała się wprostproporcjonalna. Wyjątek stanowiły odczyty z czujników nachylonych pod kątem 60°; na drewnie brzozowym czujnik ten wykazał naj-



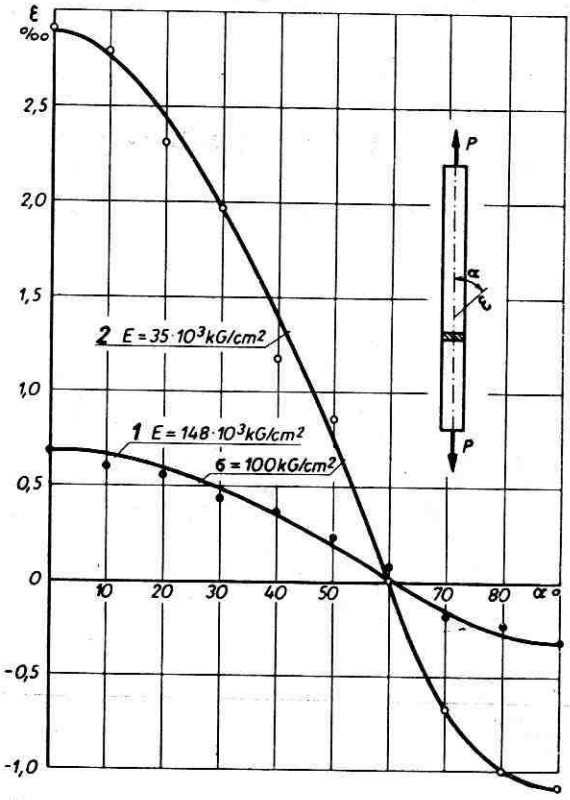
Rys. 21. Zależność odkształcenia ε od naprężenia rozciągającego σ dla różnych wartości kąta α między osią czujnika tensometrycznego a osią podłużną próbki z drewna brzozowego

mniejsze odkształcenia dodatnie (wydłużenia), a na plexiglasie nie wykazał żadnych odkształceń.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że ze wzrostem kąta nachylenia czujnika do osi próbki odkształcenie — wykazujące maksymalną wartość dodatnią przy kącie 0° — stopniowo maleje, przechodząc przy kącie 60° przez wartość zerową, a następnie przybiera znak ujemny. Aby określić kształt krzywej, wyrażającej zależność odkształcenia



Rys. 22. Zależność odkształcenia ε od naprężenia rozciągającego σ dla różnych wartości kąta α między osią czujnika tensometrycznego a osią podłużną próbki z plexiglasu



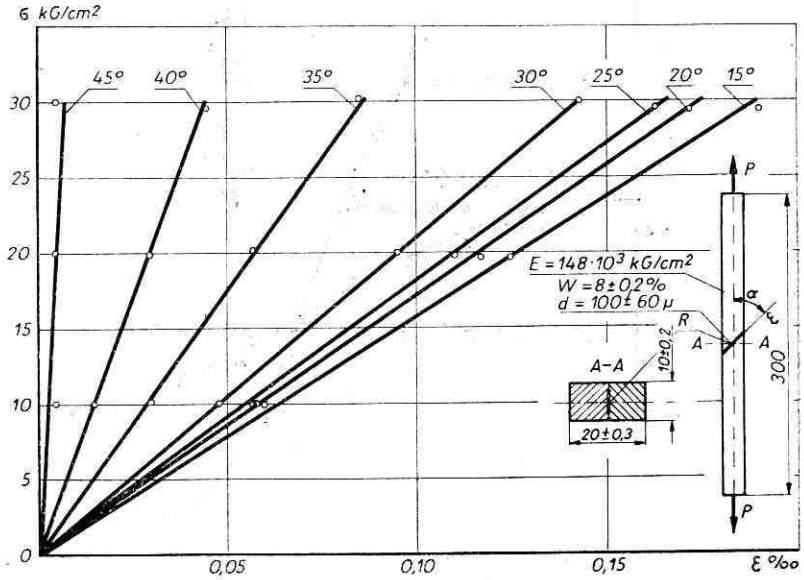
Rys. 23. Zależność odkształcenia ε od kąta α między osią czujnika tensometrycznego a osią podłużną próbki rozciąganej: *1* — drewno brzozowe, *2* — plexiglas

od nachylenia kierunku pomiaru odkształcenia do osi rozciąganej próbki, przedstawiono tę zależność graficznie przy stałej wartości naprężenia rozciągającego (rys. 23). Kształt otrzymanych krzywych jest jednakowy dla obu zbadanych materiałów, przy czym dla wartości kąta równej 60° odkształcenie równe jest zeru. Wpływ rodzaju materiału wyraża się tylko różnym nachyleniem tych krzywych do osi odciętych, co znajduje uzasadnienie w różnych wartościach modułu sprężystości podłużnej drewna brzozowego i plexiglasu. Ogólny charakter obu krzywych jest zgodny z przedstawioną przez Z. Rolińskiego (18) teoretyczną analizą odkształceń pręta przy jednoosiowym stanie naprężeń; wynika stąd wniosek, że sprężysta anizotropia drewna nie wpływa na rozkład odkształceń w pręcie rozciąganym.

2. Pomiary odkształceń złączy w skleinie

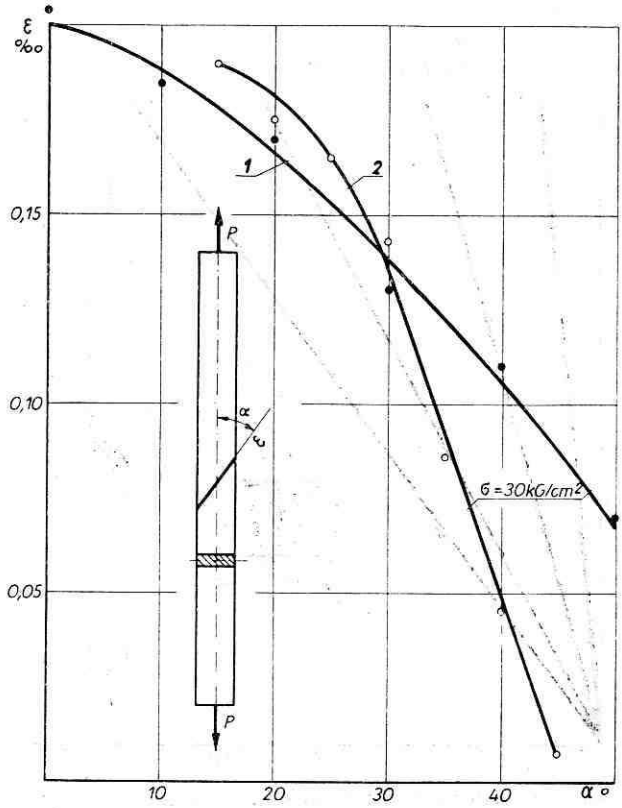
Próbki do tego badania wykonano z listew brzozowych, które przecięto ukośnie w połowie długości, a następnie obie połówki każdej listwy sklejono klejem polioctanowinylowym, umieszczając w skleinie czujnik tensometryczny. W ten sposób otrzymano złącza wzdłużno-uciosowe o kącie uciosu zróżnicowanym co 5° w zakresie od 15 do 45°. Próbki te oraz wyniki pomiaru ich odkształceń przedstawia rys. 24.

Zależność odkształceń od naprężenia rozciągającego okazała się i w tym przypadku wprostproporcjonalna, a z nachylenia otrzymanych prostych



Rys. 24. Zależność odkształcenia w skleinie ε od naprężenia rozciągającego σ dla różnych wartości kąta uciosu α: drewno brzozowe, klej polioctanowinylowy; wartości średnie z trzech pomiarów

wynika, że ze wzrostem kąta uciosu wartość odkształcenia maleje, co jest zgodne z wynikami takiego samego badania elementów z drewna litego. Dla uchwycenia różnic tych zależności w złączach uciosowych i w litym materiale wykreślono na rys. 25 krzywe zależności odkształcenia od kąta nachylenia kierunku pomiaru do podłużnej osi próbki. Jak widać z wykresu, obie krzywe mają prawie jednakowy kształt, przy czym spadek

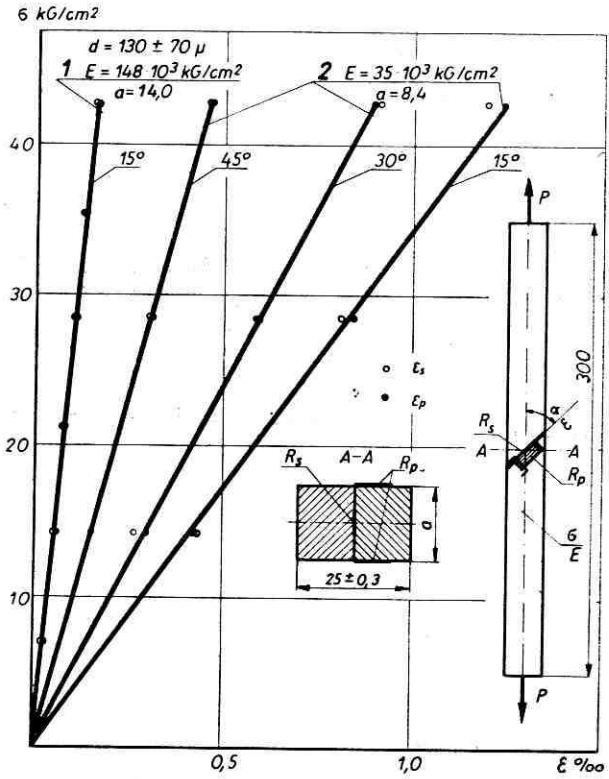


Rys. 25. Zależność odkształcenia ε od kąta α między osią czujnika tensometrycznego a osią podłużną próbki rozciąganej: *1* — na powierzchni drewna litego, *2* — w skleinie złącza uciosowego; drewno brzozowe, klej polioctanowinylowy

wartości odkształcenia ze wzrostem kąta jest większy dla złączy uciosowych niż dla drewna litego. Odkształcenie zmierzone w skleinie tych złączy jest bliskie zera już przy kącie 45°, a nie dopiero przy 60°, jak to stwierdzono w litym drewnie.

Aby wyjaśnić przyczynę tych różnic wykonano następne doświadczenie, mierząc równocześnie odkształcenie w skleinie złączy uciosowych i w przyskleinowych warstwach drewna; odkształcenia tych warstw pomierzono

za pomocą czujników tensometrycznych, naklejonych wzdłuż skleiny na bocznych powierzchniach próbek (rys. 26). Doświadczenie to wykonano na próbkach z drewna brzozowego o kącie uciosu równym 15° oraz na próbkach z plexiglasu o kątach uciosu wynoszących 15, 30 i 45°. Jak widać z wykresu, odkształcenia zmierzone w skleinie i w warstwach przyskleinowych są równe niezależnie od rodzaju materiału i kąta uciosu;



Rys. 26. Zależność odkształcenia ε_s w skleinie i odkształcenia ε_p na powierzchni sklejonych elementów przy skleinie od naprężenia rozciągającego σ dla różnych wartości kąta uciosu α: *1* — drewno brzozowe, klej polioctanowinylowy, *2* — plexiglas

jednocześnie zachowują one proporcjonalność do wartości naprężenia i kąta uciosu, stwierdzoną uprzednio w złączach z drewna brzozowego. Tak więc przyczyną różnicy odkształceń złączy uciosowych i drewna litego nie jest różna odkształcalność skleiny i sklejonego drewna. Przyczynę tę należałoby upatrywać w przecięciu włókien drewna, związanym z wykonaniem złączy uciosowych. Przecięcie włókien umożliwia bowiem swobodne odkształcanie się drewna, hamowane normalnie w litym drewnie przez włókna dalej położone od miejsca pomiaru odkształcenia. Ponieważ

wskutek sprężystej anizotropii drewna (9, 10) jego moduł sprężystości w poprzek włókien jest wielokrotnie mniejszy aniżeli wzdłuż włókien, przecięcie więc ich w miejscu pomiaru odkształcenia uwydatnia wpływ tej anizotropii na wynik pomiaru, czemu nie może przeszkodzić skleina wskutek niskiego modułu sprężystości utwardzonego kleju polioctanowinylowego. Za takim wyjaśnieniem stwierdzonego zjawiska przemawia również fakt, że nie występuje ono w złączach wykonanych z izotropowego plexiglasu, sklejonych tym samym materiałem; odkształcenia tych złączy w skleinie są przy jednakowych kątach nachylenia kierunku pomiaru do osi próbki takie same jak odkształcenia litego plexiglasu.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że pomiar natychmiastowych odkształceń rozciąganych złączy wzdłużno-uciosowych tensometrem oporowym za pomocą czujników umieszczonych w skleinie tych złączy jest możliwy i informuje o rzeczywistych odkształceniach skleiny.

VIII. BADANIE ODKSZTAŁCEŃ W ROZCIĄGANYCH ZŁĄCZACH NAKŁADKOWYCH

1. Pomiary odkształceń złączy o różnym kształcie i wymiarach elementów

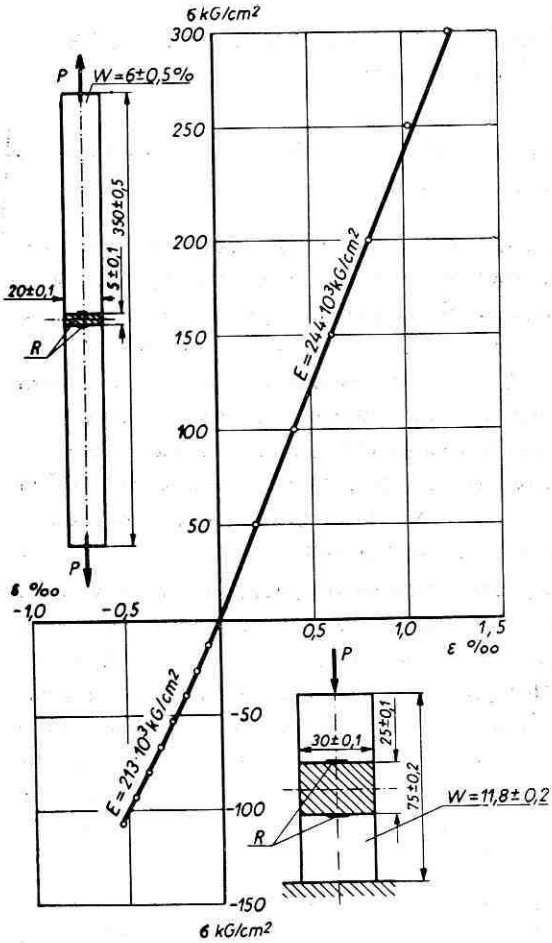
Pomiary te miały na celu stwierdzenie, czy wartość odkształceń pomierzonych w skleinie złączy nakładkowych zależy od kształtu złącza i związanych z nim warunków obciążenia skleiny oraz do wymiarów elementów złączy, które również powodują różnice w rozkładzie naprężeń (7). Do badań tych zastosowano złącza nakładkowe jednocięte, czyli tzw. złącza na nakładkę prostą (rys. 28b i inne), oraz złącza nakładkowe dwucięte, czyli tzw. złącza łubkowe (rys. 32). Złącza te wykonano z drewna brzozowego, sklejonego klejem glutynowym lub polioctanowinylowym; złącza porównawcze tych samych typów, umożliwiające zbadanie wpływu sprężystej anizotropii drewna, wykonano z plexiglasu.

Wszystkie złącza obciążano przez rozciąganie poosiowe, co wywoływało naprężenie styczne w skleinach. Obok naprężeń stycznych w skleinach złączy nakładkowych występują także naprężenia normalne, których wartość jest tym większa, im silniejsze jest zginanie elementów złącza, spowodowane niewspółosiowym ustawieniem tych elementów. Niewspółosiowość ta rośnie z grubością elementów i — jak wskazują N. A. de Bruyne i R. Houwink (3) oraz F. P. Bielankin (2) — wskutek tego naprężenia normalne w płaszczyźnie ścinania mogą być tak znaczne, iż zniszczenie materiału zachodzi głównie za ich przyczyną, a nie pod wpływem naprężeń stycznych. Niezależnie od tego jednostronne utwierdzenie elementów złącza w skleinie oraz ich zginanie muszą powodować

różnice w wartości naprężeń — a tym samym i odkształceń — w skleinie i na powierzchni elementów złącza w obrębie nakładki.

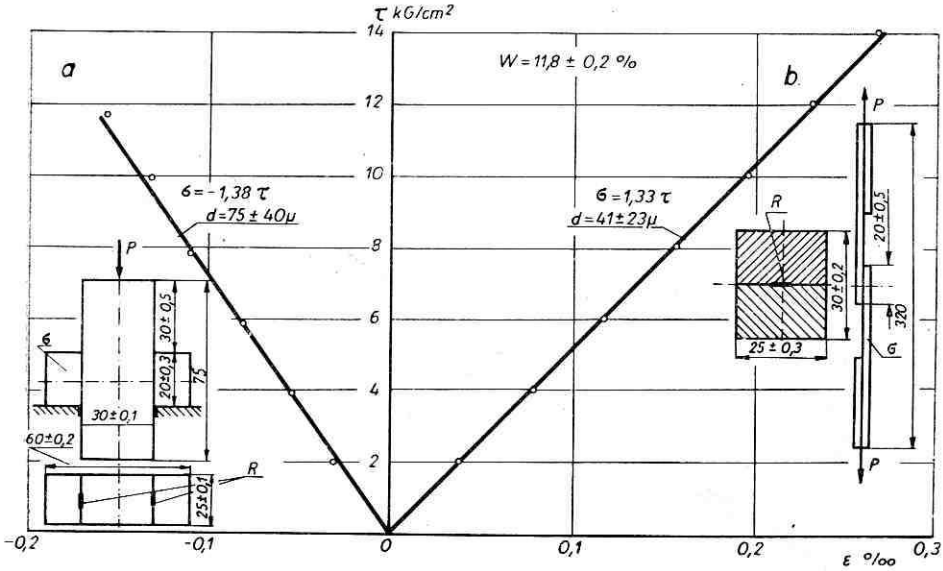
Aby doświadczalnie stwierdzić, czy pomiary odkształceń złączy tensometrem oporowym za pomocą czujników umieszczonych w skleinie wykażą te różnice, należało najpierw sprawdzić wpływ znaku naprężeń normalnych w elementach złącza na wskazania czujników umieszczonych w ścinanej skleinie. W tym celu wykonano wstępne badania na próbkach, w których skleiny były ścinane przy rozciąganiu i ściskaniu elementów złącza. Próbki te sklejono klejem glutynowym z drewna brzozowego. Aby ułatwić wyciągnięcie wniosków z tego badania, określono uprzednio moduł sprężystości podłużnej drewna użytego do wykonania próbek (rys. 27); pomiary odkształceń przy rozciąganiu i ściskaniu drewna przeprowadzono i w tym przypadku tensometrem oporowym.

Wyniki badania wpływu znaku naprężenia normalnego w elementach złącza na wskazania czujników tensometrycznych, umieszczonych w ści-



Rys. 27. Zależność odkształcenia ε od naprężenia σ przy rozciąganiu i ściskaniu drewna brzozowego; wartości średnie z pięciu pomiarów

nanej skleinie, podano na rys. 28; na tym samym rysunku przedstawiono również próbki użyte do tego badania. Jak widać z wykresu, zależność pomierzonego odkształcenia od naprężenia stycznego w skleinie okazała się wprostproporcjonalna zarówno przy ściskaniu, jak przy rozciąganiu elementów, a więc proporcjonalna również do naprężenia normalnego w elementach złącza. Pomierzone odkształcenia mają ten sam znak co

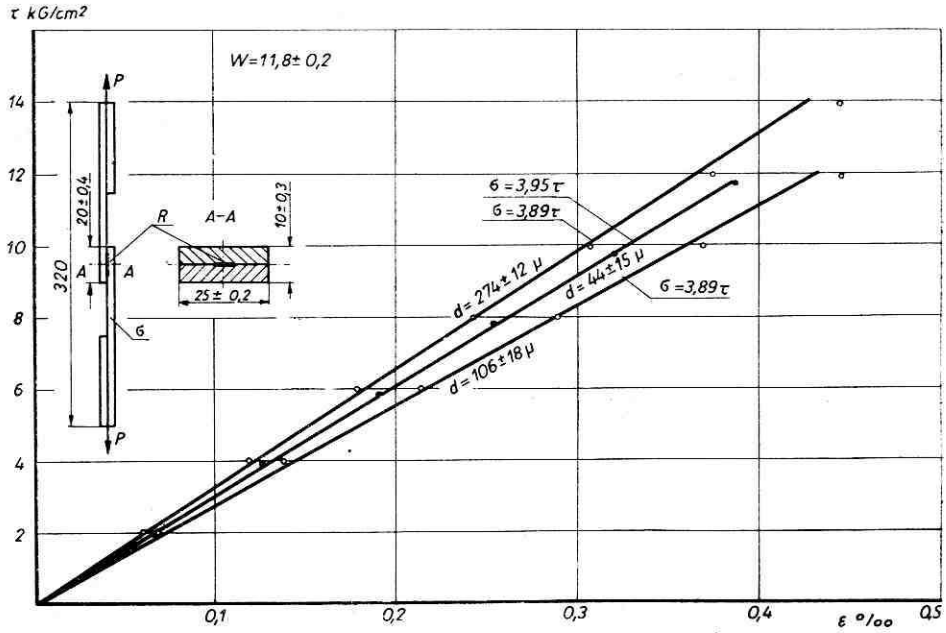


Rys. 28. Zależność odkształcenia w skleinie ε od naprężenia τ: *a* — ścinanie przy nacisku, b — ścinanie przy rozciąganiu, *d* — grubość skleiny; drewno brzozowe, klej glutynowy: wartości średnie z trzech pomiarów

naprężenie normalne w elementach złącza, który okazał się w tym przypadku decydujący. Przy jednakowej wartości naprężenia stycznego w skleinie odkształcenie w próbkach rozciąganych jest większe niż w próbkach ściskanych pomimo mniejszej wartości modułu sprężystości drewna przy ściskaniu niż przy rozciąganiu; fakt ten ma prawdopodobnie swą przyczynę w niewspółosiowości elementów próbki ścinanej przy rozciąganiu, co powoduje zginanie jej elementów.

Następne badanie, wykonane na złączach nakładkowych jednociętych z drewna brzozowego sklejonego klejem glutynowym, miało na celu określenie wpływu grubości skleiny na wartość pomierzonego w niej odkształcenia. Wyniki tego badania, przedstawione na rys. 29, wykazały wprostproporcjonalną zależność odkształcenia od naprężenia stycznego w skleinie, nie rozwiązały jednak jednoznacznie głównego zagadnienia. Stwierdzono mianowicie, że odkształcenia sklein średniej grubości 106 μ są wprawdzie większe od odkształceń sklein najcieńszych grubości 44 μ, jednakże odkształcenia sklein najgrubszych — grubości średniej wynoszącej 274 μ

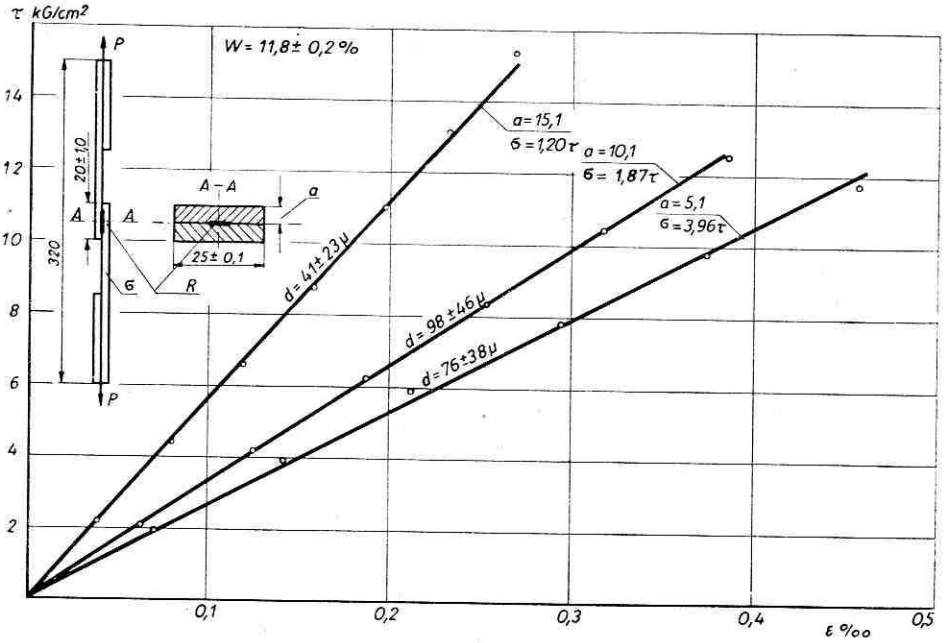
— okazały się najmniejsze, co nie wskazuje na istnienie regularnego związku pomiędzy grubością skleiny a jej odkształceniem. Można natomiast stwierdzić, że nawet przy tak znacznych różnicach grubości sklein różnice pomierzonych odkształceń są stosunkowo niewielkie; pozwala to przypuszczać, że niejednakowa grubość skleiny nie powinna w istotny sposób zaważyć na wynikach badania innych zależności.



Rys. 29. Zależność odkształcenia w skleinie ε od naprężenia τ dla różnych średnich grubości skleiny d; drewno brzozowe, klej glutynowy; wartości średnie z czterech pomiarów

Wpływ grubości elementów złącza na wartość odkształceń pomierzonych w skleinie określono zarówno na jednociętych, jak na dwuciętych złączach nakładkowych. Złącza jednocięte sklejono klejem glutynowym, a złącza dwucięte — klejem polioctanowinylowym; oba typy złączy wykonano z drewna brzozowego. Wyniki pomiarów dla złączy jednociętych podano na rys. 30, a dla złączy dwuciętych — na rys. 31. W obu przypadkach zależność odkształcenia od naprężenia stycznego w skleinie okazała się wprostproporcjonalna. Przy stałej wartości tego naprężenia odkształcenie wzrasta ze spadkiem grubości elementów złącza, czyli ze wzrostem średniego naprężenia normalnego w tych elementach. Aby określić przybliżony charakter zależności odkształceń pomierzonych w skleinie złączy nakładkowych do geometrii złącza, obliczono wartości odkształceń skleiny przy stałej wartości naprężenia stycznego i przy stałej wartości średniego naprężenia normalnego w elementach złącza. Stosunek tych naprężeń do

siebie zależy od stosunku wysokości (długości) nakładki h do grubości elementów złącza a. Na rys. 32 przedstawiono przybliżoną zależność tak obliczonych odkształceń skleiny od stosunku h/a. W obu typach złączy zależności te są prostoliniowe; przy stałej wartości naprężenia stycznego w skleinie odkształcenie wzrasta ze wzrostem wartości h/a, a przy stałej wartości średniego naprężenia normalnego w elementach złącza odkształ-



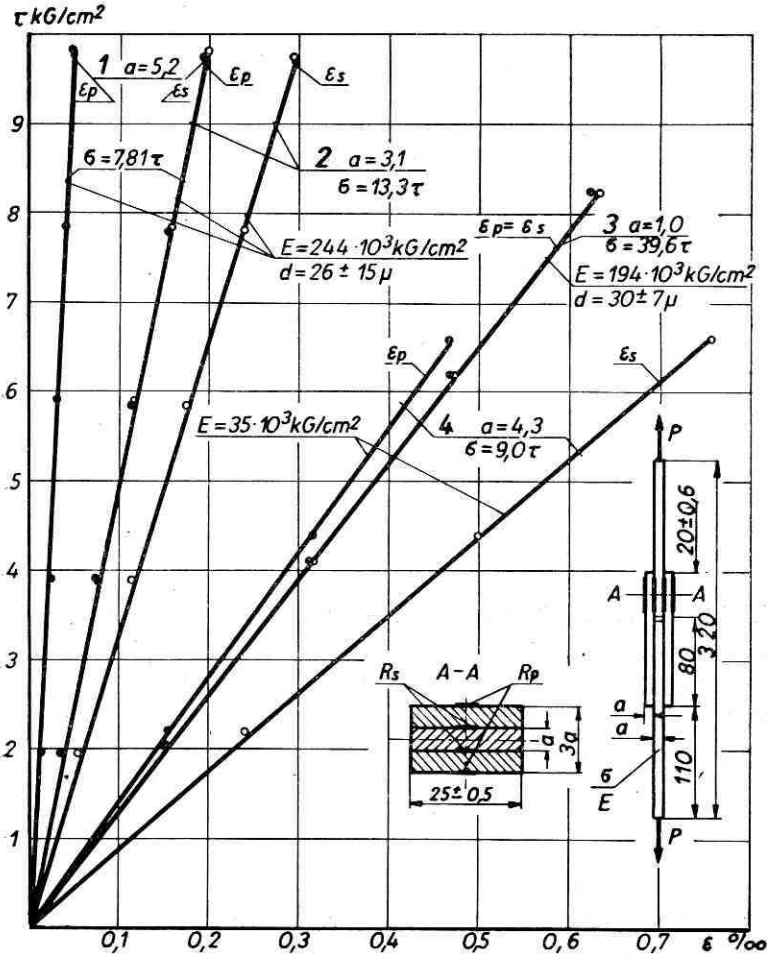
Rys. 30. Zależność odkształcenia w skleinie ε od naprężenia τ dla różnych grubości a elementów złącza; drewno brzozowe, klej glutynowy; wartości średnie z trzech pomiarów

cenie skleiny nieznacznie maleje ze wzrostem stosunku h/a. Świadczy to o bardzo istotnym wpływie naprężenia normalnego, które przy stałej wartości naprężenia stycznego w skleinie wzrasta z wartością h/a; natomiast wpływ naprężenia stycznego na wartość odkształcenia skleiny jest znikomy, zwłaszcza w złączach dwuciętych (łubkowych). Nieco silniejszy wpływ stosunku h/a na wartość odkształcenia skleiny w złączach jednociętych — przy stałej wartości naprężenia normalnego w elementach złącza — należy przypisać ich zginaniu. Ze wzrostem wartości h/a sztywność tych elementów maleje, wskutek czego rozkład naprężeń normalnych na ich grubości powinien być coraz to bardziej równomierny, a wartość tego naprężenia w warstwach przyskleinowych coraz bliższa wartości średniej, przyjętej do określenia rozpatrywanego wpływu stosunku h/a.

Rozkład odkształceń na grubości elementów złączy nakładkowych określono za pomocą czujników tensometrycznych umieszczonych w skleinie

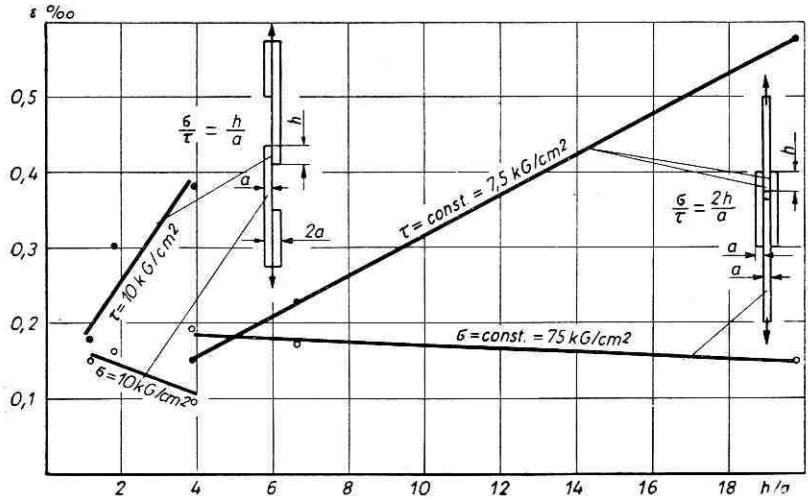
i na powierzchni elementów złącza w obrębie nakładki. Badanie to przeprowadzono na złączach jednociętych, sklejonych z elementów brzozowych grubości 5 mm (rys. 33), oraz na złączach dwuciętych, sklejonych z elementów brzozowych grubości 5,2, 3,1 i 1 mm (rys. 31); dla obu typów złączy wykonano również próbki porównawcze z plexiglasu. Wyniki pomiarów przedstawiono na tych samych rysunkach.

We wszystkich zbadanych złączach — niezależnie od ich typu i rodzaju materiału elementów — zależność odkształceń od naprężenia stycznego w skleinie okazała się wprostproporcjonalna zarówno w skleinie, jak na powierzchni nakładki; odkształcenia na powierzchni nakładki były zawsze mniejsze od odkształcenia skleiny.

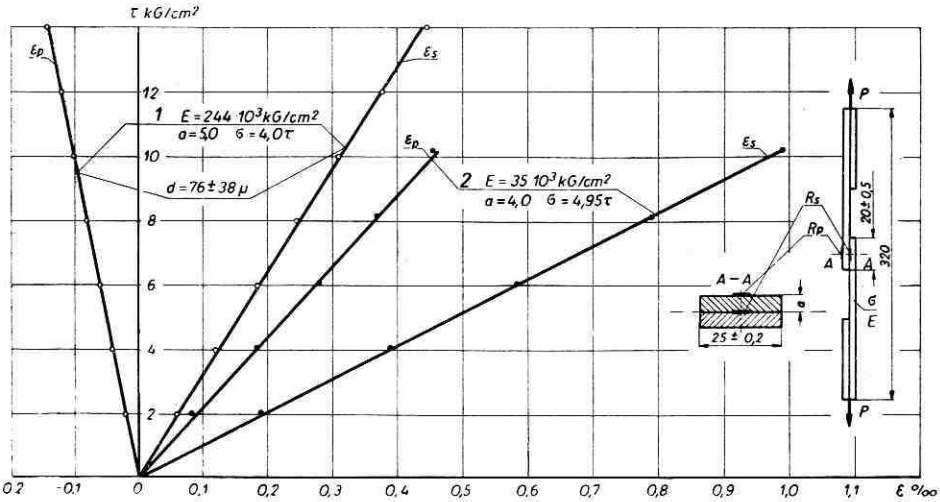


Rys. 31. Zależność odkształcenia w skleinie ε_s i na powierzchni nakładki ε_p od naprężenia τ w skleinie: *1, 2, 3* — drewno brzozowe, klej polioctanowinylowy — wartości średnie z trzech pomiarów, *4* — plexiglas — wartości średnie z dwu pomiarów

W złączach jednociętych z drewna brzozowego (rys. 33) odkształcenia na powierzchni nakładki mają znak ujemny przy jednoczesnych dodatnich odkształceniach skleiny, co dowodzi silnego zginania elementów drewnianych w tym typie złączy; odkształcenie na powierzchni nakładki wynosi około $^1/_3$ bezwzględnej wartości odkształcenia skleiny. W analogicznym złączu z plexiglasu, którego moduł sprężystości podłużnej jest znacznie mniejszy od modułu sprężystości drewna, odkształcenie skleiny jest odpo-



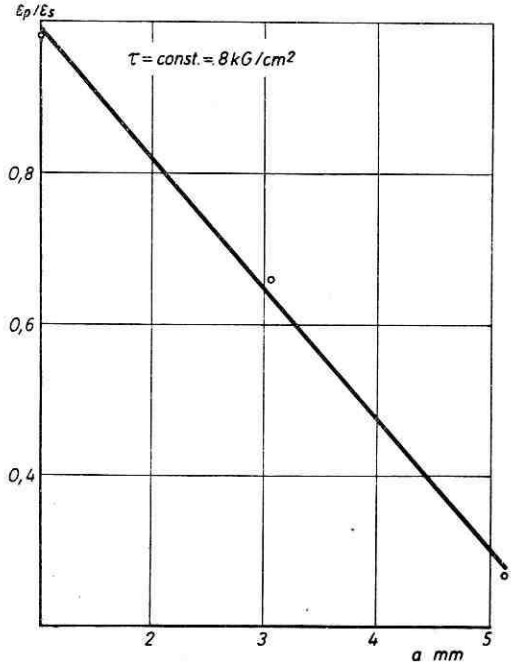
Rys. 32. Przybliżona zależność odkształcenia w skleinie ε od stosunku wysokości (długości) nakładki h do grubości a elementów złączy z drewna brzozowego



Rys. 33. Zależność odkształcenia w skleinie ε_s i na powierzchni nakładki ε_p od naprężenia τ w skleinie: *1* — drewno brzozowe, klej glutynowy — wartości średnie z pięciu pomiarów, *2* — plexiglas — wartości z jednego pomiaru

wiednio większe; oba odkształcenia — zarówno w skleinie, jak na powierzchni nakładki — mają znak dodatni, przy czym to ostatnie wynosi około $^1/_2$ odkształcenia skleiny. Wpływ zginania elementów złącza z plexiglasu na rozkład odkształceń — a tym samym naprężeń — na grubości tych elementów w obrębie nakładki nie jest więc tak znaczny jak w złączach drewnianych. Przyczynę stwierdzonych różnic może stanowić izotropowy charakter plexiglasu i znaczna anizotropia sprężysta drewna.

W dwuciętych złączach nakładkowych z plexiglasu odkształcenie na powierzchni nakładki wynosi około $^3/_5$ wartości odkształcenia w skleinie, a więc — jak wynika również z symetrycznej konstrukcji tego złącza — rozkład odkształceń na grubości nakładki jest bardziej równomierny niż w złączu jednociętym. W takich samych złączach drewnianych stosunek odkształcenia na powierzchni nakładki do odkształcenia skleiny wzrasta ze spadkiem grubości elementów złącza, osiągając jedność przy ich grubości równej 1 mm, co świadczy o jednakowych odkształceniach w skleinie i na powierzchni nakładki. Stwierdzone różnice odkształceń na grubości



Rys. 34. Przybliżona zależność stosunku odkształcenia na powierzchni nakładki do odkształcenia w skleinie $\varepsilon_p/\varepsilon_s$ od grubości a elementów dwuciętych złączy nakładkowych z drewna brzozowego

nakładki są zgodne z wynikami badań O. Grafa i K. Egnera (7), otrzymanymi dla klejonych złączy łubkowych wielkowymiarowych elementów drewnianych konstrukcji budowlanych. Na podstawie pomiarów wykonanych na dwuciętych złączach drewnianych określono w przybliżeniu stopień nierównomierności rozkładu naprężeń w zależności od grubości elementów złącza; przedstawiony na rys. 34 stosunek odkształcenia na powierzchni nakładki do odkształcenia w skleinie złącza okazał

się w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalny do grubości elementów złącza.

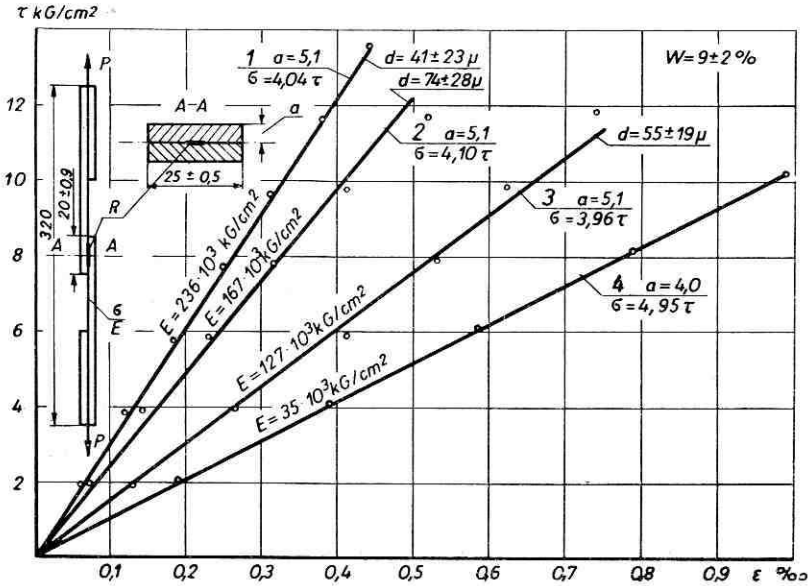
Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń można stwierdzić, że badanie odkształceń złączy nakładkowych tensometrem oporowym, za pomocą czujników umieszczonych w skleinie i naklejonych na powierzchni elementów złącza w obrębie nakładki, umożliwia określenie rozkładu odkształceń i naprężeń w złączu. Zastosowana metoda nie daje informacji tak wszechstronnych, jak badania elastooptyczne, ma jednakże w porównaniu z tymi ostatnimi tę niewątpliwą zaletę, że pomiary wykonuje się bezpośrednio na rzeczywistym złączu, a nie na jego modelu. W przypadku złączy z materiału tak anizotropowego, jak drewno, wyniki uzyskane na rzeczywistym złączu są bowiem niecałkowicie zgodne z otrzymanymi na modelu elastooptycznym, który wykonuje się z materiału izotropowego. Dlatego zastosowana metoda pomiaru odkształceń może dać istotne informacje, uzupełniające dane uzyskane za pomocą badań elastooptycznych.

2. Pomiary odkształceń złączy z różnych materiałów

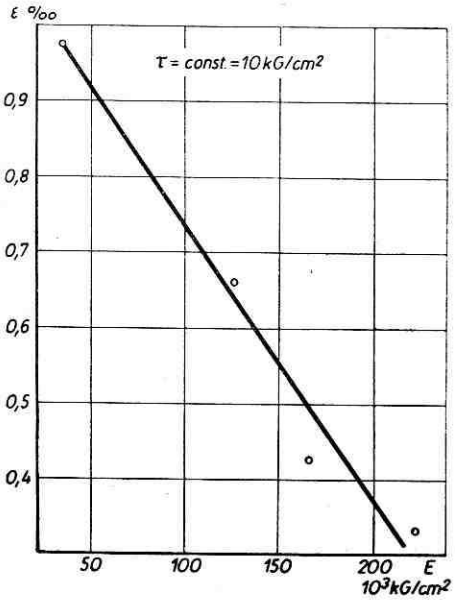
Celem tego badania było sprawdzenie, czy zróżnicowanie modułu sprężystości drewna oraz sprężystości kleju w skleinie wywiera wpływ na liczbową wartość odkształceń skleiny w złączu nakładkowym. Do badań wykonano złącza jednocięte z drewna brzozowego, sosnowego i lipowego, sklejone klejem glutynowym; zróżnicowanie rodzaju drewna spowodowało też odpowiednie różnice modułu sprężystości elementów złączy. Moduły sprężystości drewna określono przed wykonaniem złączy na podstawie odkształceń przy rozciąganiu wzdłuż włókien, zmierzonych tensometrem oporowym. Takie same złącza wykonano również z plexiglasu, którego moduł sprężystości jest jeszcze mniejszy od modułu drewna lipowego. Oprócz tego wykonano złącza jednocięte z drewna brzozowego, sklejone klejem glutynowym, kazeinowym, mocznikowym i polioctanowinylowym; złącza te posłużyły do badania wpływu zróżnicowanej w ten sposób sprężystości kleju w skleinie na wartość pomierzonego odkształcenia złączy.

Na rys. 35 podano wyniki badania złączy wykonanych z różnych rodzajów drewna oraz złączy z plexiglasu. Stwierdzono, że przy stałej wartości naprężenia stycznego w skleinie pomierzone w niej odkształcenie wzrasta ze spadkiem modułu sprężystości materiału elementów złącza. Aby w przybliżeniu określić charakter tej zależności, naniesiono otrzymane wyniki na wykres (rys. 36); okazało się, że zależność odkształcenia w skleinie złącza nakładkowego od modułu sprężystości materiału jego elementów jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalna, co jest zgodne z przesłankami teoretycznymi.

Badanie odkształceń w skleinie złączy z drewna brzozowego, sklejonych różnymi klejami (rys. 37), wykazało, że przy stałej wartości naprężenia

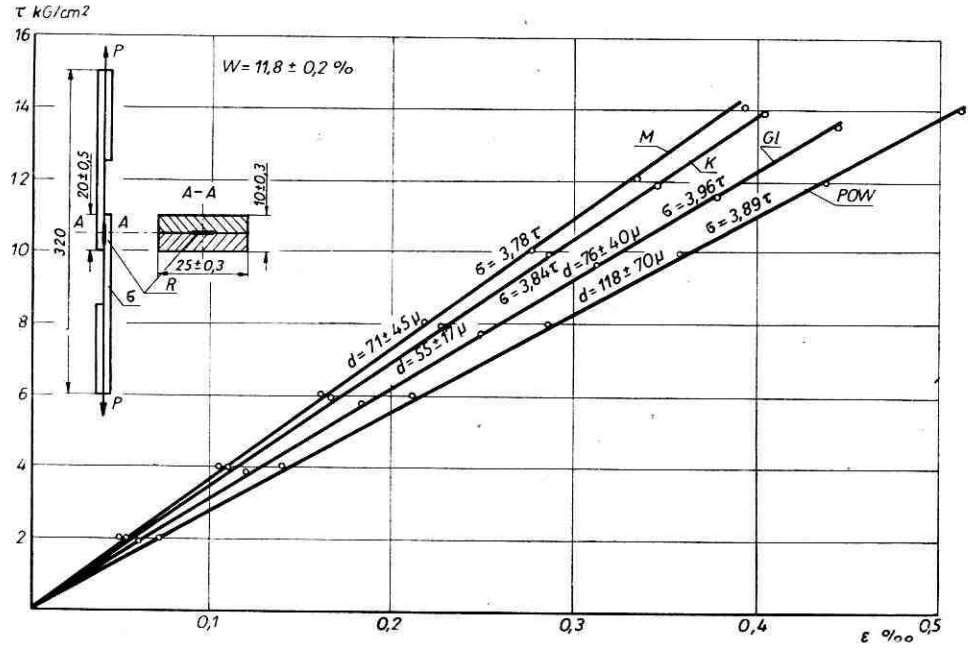


Rys. 35. Zależność odkształcenia w skleinie ε od naprężenia τ dla różnych rodzajów materiału elementów złącza: *1* — drewno brzozowe, *2* — drewno sosnowe, *3* — drewno lipowe, *4* — plexiglas; złącza drewniane sklejone klejem glutynowym; wartości średnie z trzech pomiarów



Rys. 36. Przybliżona zależność odkształcenia ε, zmierzonego w skleinie złącza nakładkowego jednociętego, od modułu sprężystości podłużnej E materiału elementów złącza

stycznego w skleinie pomierzone w niej odkształcenie jest najmniejsze dla kleju mocznikowego, wzrastając kolejno w skleinie kazeinowej, glutynowej i polioctanowinylowej. W porównaniu z różnicami odkształceń skleiny w złączach wykonanych z różnych rodzajów drewna różnice spowodowane odmiennymi klejami nie są znaczne, jednak wzrost odkształceń w kolejności wymienionych klejów jest zgodny z obserwowanymi w praktyce różnicami ich właściwości sprężystych.



Rys. 37. Zależność odkształcenia w skleinie ε od naprężenia τ dla różnych klejów: drewno brzozowe, *Gl* — klej glutynowy, *K* — klej kazeinowy, *M* — klej mocznikowy, *POW* — klej polioctanowinylowy; wartości średnie z pięciu pomiarów

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że odkształcenia złączy nakładkowych, pomierzone tensometrem oporowym za pomocą czujników umieszczonych w skleinie tych złączy, wykazują spodziewany wpływ sprężystych właściwości materiału elementów złączy oraz kleju użytego do ich sklejenia.

WNIOSKI

1. Pomiary odkształceń układu drewno-klej tensometrem oporowym za pomocą czujników tensometrycznych umieszczonych w skleinie są możliwe i dają wyniki odzwierciedlające wpływ sprężystych właściwości drewna oraz kleju. Ogólne wskazania, warunkujące dokładność tych pomiarów, przedstawiają się następująco:

a) pomiary należy wykonywać mostkiem tensometrycznym (Wheatstone'a) w normalnym układzie pomiarowym, z zastosowaniem czujnika czynnego i kompensacyjnego; jeśli konieczna jest bardzo duża dokładność pomiaru należy dla każdego czujnika czynnego stosować oddzielny czujnik kompensacyjny;

b) materiał z czujnikiem czynnym i kompensacyjnym musi być identyczny pod względem właściwości fizyko-mechanicznych i struktury, przy czym jego wilgotność powinna zawierać się w przedziale higroskopijnym i być możliwie mała; czujnik czynny i kompensacyjny muszą być wklejone pod tym samym kątem do włókien drewna;

c) ze względu na higroskopijność drewna i większości klejów do drewna prowadzenie pomiarów długotrwałych nie jest możliwe, nawet przy zastosowaniu kompensacji; pomiary odkształceń natychmiastowych można wykonywać w pomieszczeniach nie klimatyzowanych, pod warunkiem uprzedniego doprowadzenia badanego materiału do stanu równowagi higroskopijnej z warunkami panującymi w tych pomieszczeniach;

d) aby uniknąć błędów spowodowanych wydzielaniem ciepła przez czujniki tensometryczne należy stosować niskie napięcie prądu pomiarowego i małą oporność czujników oraz włączać prąd w obwodzie pomiarowym tylko w momencie dokonywania odczytów wskazania przyrządu; przy napięciu prądu pomiarowego wynoszącym 4 V i oporności czujnika 120 Ω czas włączenia prądu nie powinien przekraczać 30 sekund.

2. Przedstawiona metoda umieszczania oporowych czujników tensometrycznych w skleinie między warstwami badanego materiału umożliwia uzyskanie szeregu informacji, jakich nie dają pomiary tensometryczne za pomocą czujników naklejonych na powierzchni badanych elementów ani też inne powszechnie znane metody pomiarów tensometrycznych. Główną jej zaletę stanowi możność doświadczalnego określenia rozkładu odkształceń i naprężeń wewnątrz elementów rozciąganych, ściskanych i zginanych oraz wewnątrz klejonych złączy konstrukcyjnych. W tym ostatnim przypadku metoda umożliwia określenie wpływu sprężystych właściwości materiału konstrukcyjnego i kleju, uzupełniając w ten sposób informacje możliwe do uzyskania za pomocą elastooptycznych badań modelowych, które nie uwzględniają anizotropii sprężystej drewna ani różnicy właściwości sprężystych drewna i kleju.

3. Przyjęty sposób umieszczania oporowych czujników tensometrycznych umożliwia pomiar odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych drewna; w tym przypadku rola czujnika kompensacyjnego nie polega na kompensacji wpływu wilgoci, lecz umożliwia jego uwydatnienie. Dlatego czujnik kompensacyjny powinien być wklejony pomiędzy warstwy materiału niehigroskopijnego i możliwie mało czułego na zmiany temperatury, np. między płytki szklane. Przy bardzo dokładnych pomiarach pożądane jest umieszczenie próbki z czujnikiem kompensacyjnym w zamkniętym, klimatyzowanym pomieszczeniu.

4. W trakcie przeprowadzonych badań wykazano również możliwość pomiaru odkształceń utwardzonego kleju tensometrem oporowym za pomocą czujników naklejonych na powierzchni badanych próbek i określania w ten sposób stałych sprężystych utwardzonego kleju. Stwarza to możliwości określania liczbowych wartości tych stałych dla klejów do drewna, czego nie dają inne metody tensometryczne ze względu na zbyt małą dokładność pomiarów lub zbyt duże wymiary przyrządów pomiarowych.

Z Katedry Mechanicznej Technologii Drewna
Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie

Praca wpłynęła do Komitetu Redakcyjnego w dniu 5 sierpnia 1964 r.

Niniejsza praca została przez Radę Wydziału Technologii Drewna uznana za rozprawę habilitacyjną

LITERATURA

1. Asano I., Tsuzuki K.: Studies of strain measurements in wood by electrical resistance wire strain gage. „Journ. Jap. Wood Res. Soc." 1960; vol. 6 (4).

2. Bielankin F. P.: Procznost' driewiesiny pri skaływanii wdol wołokon. AN USSR, Kijew 1955.

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

4. Galewski W., Korzeniowski A.: Atlas najważniejszych gatunków drewna. PWRiL, Warszawa 1958.

5. 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.

6. Gillwald W.: Beitrag zur Bestimmung der Formänderung von Holz unter schwingender Beanspruchung. „Holz als Roh- und Werkstoff" 1961.

7. Graf O., Egner K.: Versuche mit geleimten Laschenverbindungen aus Holz. „Holz als Roh- und Werkstoff" 1938.

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

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

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

11. Korzeniowski A.: Badania nad modułem sprężystości warstwowego układu drewno-klej mocznikowy. „Folia Forestalia Polonica" 1965; seria B, z. 6.

12. Kowieski S.: Próba ustalenia zależności modułu sprężystości od bazy pomiarowej i typu tensometrów przy ściskaniu drewna sosny. Praca magisterska wykonana w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna SGGW, Warszawa 1962 (maszynopis).

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

14. Milczarek - Dobrzyńska J.: Próba ustalenia zależności modułu sprężystości od bazy pomiarowej i typu

tensometrów przy rozciąganiu drewna sosnowego. Praca magisterska wykonana w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna SGGW, Warszawa 1962 (maszynopis).

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

16. Prędkiewicz A.: Badania zmian oporności tensometrów oporowych w spoinie klejowej w zależności od rodzaju kleju oraz próba ich zastosowania do pomiarów odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych drewna bukowego. Praca magisterska wykonana w Katedrze Mechanicznej Technologii Drewna SGGW, Warszawa 1962 (maszynopis).

17. Radcliffe B. M.: A method for determining the elastic constants of wood by means of electric resistance strain gages. „Forest Prod. Journal" 1955; vol. 5 (1).

18. Roliński Z.: Zarys elektrycznej tensometrii oporowej. WNT Warszawa 1963.

19. Roš M.: Die Melocol-Leime der CIBA Aktiengesellschaft. Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe, Zürich 1945.

20. Scott I. S. and Kingston R. S. T.: The manufacture of electrical resistance strain gauges for use with timber. CSIRO, Div. of For. Prod., Melbourne 1948; Progress rep. nr 1.

21. Scott I. S. and Kingston R. S. T.: A method of calibrating electrical resistance strain gauges. CSIRO, Div. of For. Prod., Melbourne 1949; Progress rep. nr 2.

22. Sliker A.: Electrical resistance strain gages, their zero shift when bonded to wood. „Forest Prod. Journal", 1959; vol. 9 (1).

23. Solvey J. and Belcher G. L.: Applications of electric resistance strain gauges to strain measurement in plywood faces of sandwich panels. Aero Res. Lab., Dept. of Supply, Melbourne 1952; Structures and materials note 198.

24. Youngquist W. G.: Performance of bonded wire strain gages on wood. US Forest Prod. Lab. Rpt 2087, Madison 5, Wisc., 1957.

25. Zimmermann R.: Pomiary naprężeń i drgań metodami elektrycznymi. PWT, Warszawa 1959.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СИСТЕМЫ ДРЕВЕСИНА-КЛЕЙ ПРОВОЛОЧНЫМИ ДАТЧИКАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ В КЛЕЕВОМ ШВЕ

Краткое содержание

Исследования проведенные до настоящего времени (1, 15, 17, 22, 23, 24) доказали пригодность электрической тензометрии сопротивления в измерениях деформаций древесины, клеенной фанеры и деревянных конструкций. В этих исследованиях применялись проволочные датчики сопротивления, наклеенные на поверхности проб или конструктивных элементов, на которые производилось действие внешними силами.

Автором настоящей работы была поставлена гипотеза, что путем измерения деформаций с помощью датчиков, вклеенных между плоскими слоями исследуемого древесного материала, можно бы получить ряд добавочных информаций, по сравнению с данными, получаемыми с помощью датчиков наклеенных на поверхности материала.

Для проверки возможности измерения деформаций древесины по этому методу, были проведены предварительные опыты, определяющие влияние рода клея, влияние роста температуры в месте вклеивания датчика (вследствие выделяемого им тепла Джоуля), а также влияние изменений влажности окружающего воздуха на показания электрического тензометра сопротивления. Установлено, что при кратковременных измерениях мгновенных деформаций древесины, факторы эти не оказывают существенного влияния на точность измерения.

В дальнейшем были проведены исследования по распределении деформаций при растяжении и изгибе проб из слоистой древесины, а также исследования по распределении деформаций в некоторых типах клееных конструктивных соединений из древесины, подверженных скалыванию при растяжении или при нажиме. Изменяя род древесины и клея, а также размеры элементов соединений и их геометрию, было определено влияние этих факторов на распределение и числовую величину деформаций, измеренных проволочными датчиками сопротивления, помещенными в клеевом шве. Результаты полученные с деревянными пробами проверялись на сравнительных пробах, изготовленных из изотропического и негигроскопического плексигласа. Были тоже произведены сравнительные измерения сорбционных и десорбционных деформаций древесины вдоль и поперек волокон с помощью вклеенных проволочных датчиков сопротивления, а также с помощью механических микрометров. Определено наконец с помощью датчиков наклеенных на поверхности проб упругие постоянные (модуль продольной и поперечной упругости и число Пуассона) затвердевшего мочевинного клея с дифференцированным содержанием ржаной муки.

Установлено, что измерения деформаций системы древесина-клей электрическим тензометром сопротивления с помощью датчиков, помещенных в клеевом шве, являются возможными и дают результаты отражающие влияние упругих свойств древесины и клея. Общие указания, обусловливающие точность этих измерений, следующие:

а) измерения следует производить тензометрическим прибором (Уитстона) применяя нормальную измерительную систему, включающую активный и компенсационный датчики; если же необходима очень большая точность измерения, следует для каждого активного датчика применять отдельный компенсационный датчик;

б) материал с активным и компенсационным датчиками должен быть идентичным по физико-механическим свойствам и по структуре, причем его влажность должна находиться в гигроскопическом пределе и являться по возможности малой; активный и компенсационный датчики должны быть вклеены под одинаковым углом по отношении к волокнам древесины;

в) вследствие гигроскопичности древесины и большинства клеев, продолжительные (реологические) измерения являются невозможными даже

при применении компенсации; измерения мгновенных деформаций можно производить в неклиматизированных помещениях, с условием предварительного приведения исследуемого материала в состояние гигроскопического равновесия с условиями имеющимися в этих помещениях;

г) для того, чтобы избежать ошибок, вызванных выделением тепла проволочными датчиками сопротивления, следует применять возможно низкое напряжение измерительного тока и малое сопротивление датчиков, а также включать ток в измерительной цепи только в моменте отсчитывания показаний прибора; при напряжении измерительного тока составляющего 4 в и сопротивлении датчика 120 ом, время включения тока не должно превышать 30 секунд.

Предложенный метод помещения проволочных датчиков сопротивления в клеевом шве между слоями исследуемого материала, делает возможным получение ряда информаций, каких нельзя получить путем тензометрических измерений с помощью датчиков наклеенных на поверхности исследуемых элементов, а также другими повсеместно известными методами тензометрических измерений. Основным преимуществом этого метода является возможность экспериментального определения распределения деформаций и напряжений внутри растягиваемых, сжимаемых и сгибаемых элементов, а также внутри клеенных конструктивных соединений. В последнем случае метод этот делает возможным определение влияния упругих свойств конструкционного материала и клея, пополняя таким образом возможные для получения информации с помощью эластооптических модельных исследований, которые не учитывают упругой анизотропии древесины и разницы упругих свойств древесины и клея.

Принятый способ помещения проволочных датчиков сопротивления является также пригодным для измерения сорбционных и десорбционных деформаций древесины; в этом случае роль компенсационного датчика не заключается в компенсации влияния влажности, но делает возможным обнаружить это влияние. Поэтому компенсационный датчик должен быть вклеен между слоями негигроскопического и по возможности мало чувствительного к изменениям температуры материала, например между стеклянными плитками. При очень точных измерениях желательным является поместить пробу с компенсационным датчиком в закрытом, климатизированном помещении.

Во время проведенных исследований, доказана также возможность измерения деформаций затвердевшего клея электрическим тензометром сопротивления с помощью датчиков, наклеенных на поверхности исследуемых проб и определения таким образом упругих постоянных затвердевшего клея. Это создает возможность определения числовых величин этих постоянных для клеев для древесины, чего не дают другие тензометрические методы по поводу недостаточной точности измерений или слишком больших размеров измерительных приборов.

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE VERMESSUNGSMÖGLICHKEIT DER DEHNUNGEN VON HOLZ-LEIMANORDNUNG MITTELS DER IN DIE LEIMFUGE EINGELEIMTEN WIDERSTANDS--DEHNUNGSMESSSTREIFEN

Zusammenfassung

Bisherige Untersuchungen (1, 15, 17, 22, 23, 24) haben die Brauchbarkeit der Widerstandstensometrie für die Vermessung der Dehnungen von Holz, Holzwerkstoffen und Holzkonstruktionen nachgewiesen. Bei diesen Untersuchungen wurden die Dehnungsmessstreifen in der üblichen Weise auf die Oberfläche von Proben oder Konstruktionselementen, auf die man mit Aussenkräften einwirkte, aufgeklebt..

Der Verfasser der vorliegenden Abhandlung stellte die Hypothese auf, dass die Messung von Dehnungen mittels Dehnungsmessstreifen, die zwischen platte Schichten des untersuchten Holzmaterials eingeleimt sind, eine Reihe zusätzlicher Informationen im Vergleich mit Daten, die man bei den auf die Oberfläche des Materials aufgeklebten Dehnungsmessstreifen erreichen kann, geben könnte.

Um die Möglichkeit der Vermessung der Dehnungen von Holz in dieser Weise zu prüfen, führte man Vorversuche durch, wobei man den Einfluss der Art des Holzleimes, den Einfluss der Temperatursteigerung an der Stelle, wo der Dehnungsmessstreifen eingeleimt ist (infolge der durch ihn erzeugten Joule'schen Wärme), und den Einfluss der Feuchtigkeitsänderungen der umgebenden Luft auf die Anzeigen des Widerstandstensometers bestimmte. Es wurde festgestellt, dass diese Faktoren bei kurzdauernden Messungen der sofortigen Deformationen von Holz keinen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Vermessung ausüben.

In Fortsetzung der Arbeit untersuchte man die Verteilung der Dehnungen bei Zug- und bei Biegebeanspruchung der Schichtholzproben, sowie die Verteilung der Dehnungen bei manchen Typen von Konstruktionsverbindungen aus Holz, die einer Schubbeanspruchung durch Zug- oder Druckbelastung ausgesetzt wurden. Durch Veränderung der Holz- und Leimart, sowie der Ausmasse und der geometrischen Gestaltung der Verbindungselemente bestimmte man den Einfluss dieser Faktoren auf die Verteilung und Grösse der Dehnungen, die mittels eingeleimten Dehnungsmessstreifens vermessen wurden. Die Ergebnisse dieser Versuche verglich man mit den Ergebnissen der analogen Vermessungen an Vergleichsproben, die aus isotropem und unhygroskopischem Plexiglas ausgefertigt wurden. Man führte auch vergleichende Messungen der Sorptions- und Desorptionsdeformationen (Quellung und Schwindung) des Holzes parallel und senkrecht zum Faserverlauf mittels eingeleimten Dehnungsmessstreifen und mittels mechanischen Mikrometern aus. Mittels der auf die Oberfläche der Proben aufgeklebten Dehnungsmessstreifen bestimmte

man schliesslich die elastischen Konstanten (den Elastizitätsmodul, den Schubmodul und die Poissonsche Zahl) von gehärtetem Harnstoffleim mit verschiedenem Gehalt an Roggenmehl.

Es wurde festgestellt, dass die Vermessungen von Dehnungen der Holz-Leimanordnung mittels Widerstandstensometers mit in die Leimfugen eingeleimten Dehnungsmessstreifen möglich sind und Ergebnisse liefern, die den Einfluss der elastischen Eigenschaften von Holz und Leim widerspiegeln. Für die Genauigkeit dieser Messungen sind folgende Voraussetzungen notwendig:

a) die Vermessungen müssen mit der Wheatstone'schen Brücke in normaler Messanordnung bei Anwendung von aktiven (tätigen) Dehnungsmessstreifen und Kompensations-Dehnungsmessstreifen ausgeführt werden; wenn eine sehr grosse Genauigkeit notwendig ist, muss man für jeden aktiven (tätigen) Dehnungsmessstreifen einen gesonderten (separaten) Kompensations-Dehnungsmessstreifen anwenden;

b) das Material mit aktivem und mit Kompensations-Dehnungsmessstreifen muss hinsichtich der physikalisch-mechanischen Eigenschaften und der Struktur identisch sein, wobei seine Feuchtigkeit im hygroskopischen Bereich enthalten und möglichst klein sein muss; der aktive und der Kompensations-Dehnungsmessstreifen müssen unter demselben Winkel zum Faserverlauf eingeleimt sein.

c) wegen der Hygroskopizität von Holz und der Mehrheit von Holzleimen ist die Durchführung der Dauerversuche sogar bei Anwendung der Kompensation unmöglich; die Messungen der sofortigen Deformationen kann man in nicht-klimatisierten Räumen ausführen, jedoch nur unter der Bedingung, dass das untersuchte Material dem hygroskopischen Gleichgewicht der in diesen Räumen herrschenden Verhältnissen angeglichen wird;

d) um Fehler zu vermeiden, die infolge der durch die Dehnungsmessstreifen erzeugten Wärme entstehen können, muss man eine möglichst niedrige Spannung des Messungsstromes und einen kleinen Widerstand der Dehnungsmessstreifen verwenden und den Strom im Messstromkreis nur im Moment der Ablesung der Anzeigen der Messbrücke einschalten; bei einer Spannung des Messungsstromes von 4 V und einem Widerstand des Dehnungsmessstreifens von 120 Ω darf die Zeit der Stromeinschaltung 30 Sekunden nicht überschreiten.

Das Einleimen der Dehnungsmessstreifen in den Leimfugen zwischen die Schichten des untersuchten Materials ermöglicht es einige zusätzliche Informationen zu erhalten, die bei den tensometrischen Messungen mittels auf die Oberfläche der untersuchten Elemente aufgeklebter Dehnungsmessstreifen, oder bei den anderen üblichen Methoden tensometrischer Messungen nicht erreichbar sind. Ihr Hauptvorteil ist die Möglichkeit der experimentellen Ermittlung der Verteilung von Dehnungen und Spannungen innerhalb der Konstruktionselemente, die der Zug-, Druck- oder

Biegekraft ausgesetzt sind; es besteht auch die Möglichkeit der Vermessung von Dehnungen und Spannungen innerhalb der verleimten Holzverbindungen. Im letzten Fall ermöglicht die Methode die Ermittlung des Einflusses der elastischen Eigenschaften des Konstruktionsmaterials und des Leimes und ergänzt auf diese Weise Informationen, die mittels elastooptischer Modelluntersuchungen, die die elastische Anisotropie des Holzes und den Unterschied der elastischen Eigenschaften des Holzes und des Leimes nicht berücksichtigen, erreichbar sind.

Die angenommene Weise der Einbringung von Dehnungsmessstreifen ermöglicht auch die Messung von Sorptions- und Desorptionsdeformationen (Quellung oder Schwindung) des Holzes; in diesem Fall besteht die Rolle des Kompensations-Streifens nicht in der Kompensation des Einflusses der Feuchtigkeit, sondern ermöglicht die Hervorhebung dieses Einflusses. Aus diesem Grunde muss der Kompensations-Dehnungsmessstreifen zwischen Schichten aus unhygroskopischem und möglichst wenig auf Temperaturveränderungen empfindlichem Material eingeleimt werden, z. B. zwischen Glasscheibchen. Bei sehr genauen Messungen ist die Lagerung der Proben mit Kompensations-Dehnungsmessstreifen in einem geschlossenen klimatisierten Raum erforderlich.

Während der durchgeführten Untersuchungen hat man auch die Möglichkeit der Messung der Dehnungen von gehärtetem Leim mittels des Widerstandstensometers mit den auf die Oberfläche der Proben aufgeklebten Dehnungsmessstreifen und auf diese Weise der Bestimmung der elastischen Konstanten von gehärtetem Leim nachgewiesen. Dieses verschafft weitere Möglichkeiten der Bestimmung der Zahlenwerte dieser Konstanten für Holzleime, was andere tensometrische Methoden durch zu kleine Messungsgenauigkeit oder zu grosse Ausmasse der Messgeräte nicht geben.

TREŚĆ

Wstęp 5
I. Przegląd literatury 8
II. Założenia, cel i zakres badań 10
III. Metodyka badań 11
1. Dobór materiałów i kleju 11
2. Wykonanie pomiarów 14
IV. Doświadczenia wstępne 18
1. Wpływ rodzaju kleju na oporność czujnika tensometrycznego . 18
2. Wpływ ciepła wydzielanego przez czujnik tensometryczny na temperaturę skleiny 19
3. Wpływ wilgotności powietrza na wskazania czujnika tensometrycznego umieszczonego w skleinie 21
V. Badanie odkształceń sorpcyjnych i desorpcyjnych 24
1. Pomiary porównawcze tensometrem oporowym i mikromierzami zegarowymi 24

2. Pomiary odkształceń w poprzek i wzdłuż włókien drewna . . . 26
VI. Badanie odkształceń przy rozciąganiu, ściskaniu i zginaniu 30
1. Pomiary odkształceń forniru przy rozciąganiu oraz kleju przy ściskaniu 30
2. Pomiary odkształceń drewna warstwowego przy rozciąganiu i zginaniu 33
VII. Badanie odkształceń w rozciąganych złączach wzdłużno-uciosowych 37
1. Pomiary odkształceń litego materiału 37
2. Pomiary odkształceń złączy w skleinie 40
VIII. Badanie odkształceń w rozciąganych złączach nakładkowych 43
1. Pomiary odkształceń złączy o różnym kształcie i wymiarach elementów 43
2. Pomiary odkształceń złączy z różnych materiałów 51
Wnioski 53
Literatura 55
Краткое содержание 56
Zusammenfassung 59