

KRZYSZTOF WARMBIER  
ARNOLD WILCZYŃSKI

## **REOLOGIA SPOIN KLEJOWYCH ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM POŁĄCZEŃ ELEMENTÓW DREWNIANYCH**

### **1. Wstęp**

Klejone konstrukcje drewniane znajdujące coraz szersze zastosowanie, już nie tylko w meblarstwie, ale również w budownictwie, wymagają dokładnej znajomości właściwości mechanicznych elementów wchodzących w skład tych konstrukcji. Elementami tymi są: drewno, materiały drewnopochodne i spoiny klejowe. Wśród ich właściwości mechanicznych istotne miejsce zajmują cechy reologiczne, gdyż wymienione konstrukcje są z reguły obciążane w sposób długotrwały, a materiały w nich wykorzystywane są ciałami lepkosprężystymi, w których efekty reologiczne: pełzanie i releksacja naprężeń, pojawiają się już przy stosunkowo niewielkich obciążeniach.

Zdecydowana większość dotychczasowych badań reologicznych dotyczyła samego drewna i materiałów drewnopochodnych. Przegląd prac z tego zakresu można znaleźć w obszernych pracach Niemza [4,5] oraz zbiorach referatów z I i II Sympozjum "Reologia drewna i konstrukcji drewnianych" [10,11]. Znacznie rzadziej spotyka się opracowania dotyczące reologii połączeń klejowych - najczęściej zresztą ograniczone do pełzania. Zupełnie zaś nieliczne są prace poświęcone reologii samej spoiny klejowej, będącej tylko częścią połączenia.

Zagadnienia związane z reologią połączeń klejowych są przedmiotem zainteresowań badaczy od ponad trzydziestu lat. Pierwsze publikacje z tego zakresu pochodzą z początku lat sześćdziesiątych. Są to prace Keylwertha i Höfera [3] oraz Waltera [9]. Jednak mimo upływu czasu, rozwoju metod i narzędzi badawczych oraz wielu prób podejmowanych przez reolo-

gów, w dalszym ciągu pełzanie spoiny klejowej jest jednym z najłabiej rozpoznanych problemów z zakresu badań drzewnych. Wiąże się to z licznymi trudnościami, na które natrafiają badacze. Najistotniejsza z nich sprowadza się do wyodrębnienia możliwości pomiaru pełzania samej spoiny w obrębie połączenia obejmującego zarówno spoinę jak i elementy łączone.

Dotychczasowe próby rozwiązania tego problemu opisane w literaturze są nieliczne, merytorycznie zaś wycinkowe i niepełne. Dodatkowym utrudnieniem dla badacza jest również duże rozproszenie publikacji oraz brak choćby próby całościowego spojrzenia na zagadnienie, porównania metod, narzędzi, rodzajów próbek czy też wyników eksperymentów.

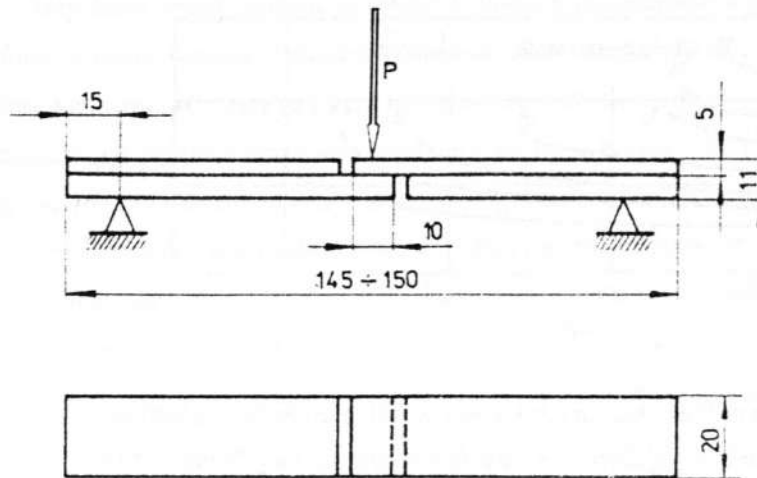
Z tego też względu celowe wydaje się krótkie przedstawienie tych nielicznych badań dotyczących pełzania spoiny klejowej w jednym opracowaniu. Pomoże to z pewnością zorientować się o aktualnym stanie wiedzy w tej dziedzinie, jak również dzięki krótkiej analizie poszczególnych publikacji i opisanych w nich badań, ułatwi pracę osobom zajmującym się reologią spoiny klejowej, pozwalając chociażby uniknąć błędów popełnianych przez poprzedników.

Należy dodać, że analizę badań przedstawiono w sposób chronologiczny. Pomoże to czytelnikowi zaobserwować postępy wiedzy i rozwój metod i narzędzi badawczych. Ponadto do przeglądu włączono również ciekawsze publikacje analizujące zjawisko pełzania spoiny klejowej w połączeniach metalowych. Badania te wybrano pod kątem możliwości ich ewentualnego zastosowania w badaniach drzewnych.

## 2. Przegląd badań

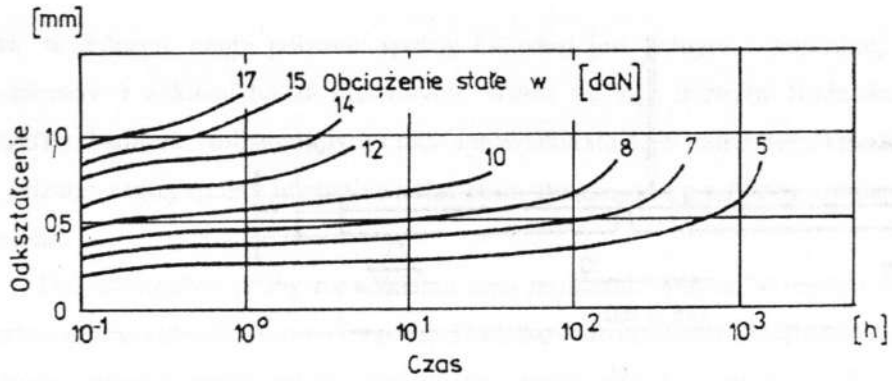
Jak już wspomniano, jednym z prekursorów badań reologicznych połączeń klejowych był Walter [9]. W jego badaniach wykorzystana została próbka zakładkowa, która według normy DIN 53254 przeznaczona jest do oznaczania wytrzymałości na ścinanie spoiny klejowej. Kształt i wymiary próbki oraz sposób jej obciążenia przedstawiono na rys. 1.

Badaną próbkę umieszczoną na dwóch podporach obciążano w środku jej długości stałą siłą zginającą. Wywołała ona w spoinie naprężenia normalne - rozciągające oraz w mniejszym zakresie naprężenia styczne. Istota próby polegała na pomiarze odkształceń próbki wywołanych długotrwałym obciążeniem zginającym.

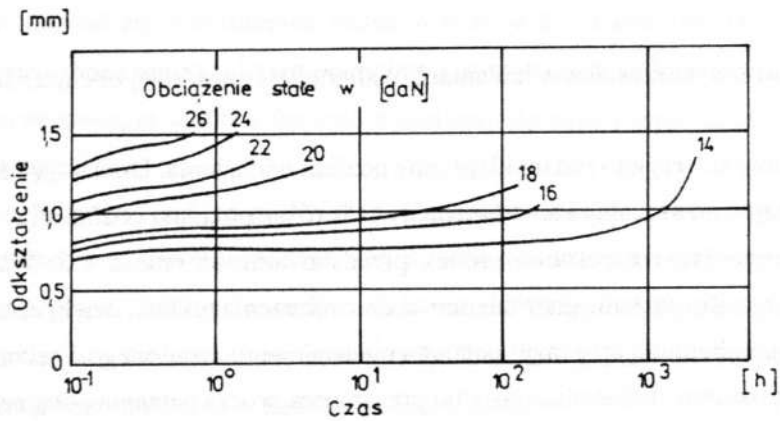


Rys. 1. Próbką zakładkowa wykorzystana w badaniach Waltera [9] i sposób jej obciążenia

Jako czynniki badawcze przyjęto rodzaj kleju oraz poziom obciążenia. Dobierając dwa rodzaje kleju syntetycznego: odwracalny i nieodwracalny oraz różne poziomy obciążenia - od 5 do 26daN - wyznaczono krzywe pełzania próbek przedstawione na rys. 2. i 3. Warto zwrócić uwagę na fakt, iż próby pełzania prowadzono aż do zniszczenia próbek, dzięki czemu uzyskane krzywe pełzania obejmują trzy fazy: pełzania nieustalonego, ustalonego i pełzania do zniszczenia. Wzrost poziomu obciążenia znacznie przyspiesza proces pełzania połączenia klejowego. Na przykład dla próbek obciążonych siłą o wartości 5daN proces pełzania trwał ponad 1000h, a dla próbek obciążonych siłą o wartości 17daN zaledwie około 1h. W przypadku kleju odwracalnego pełzanie próbek jest znacznie intensywniejsze niż w przypadku kleju nieodwracalnego. Kleje syntetyczne odwracalne są podatne na pełzanie już przy niewielkich obciążeniach połączeń klejowych.



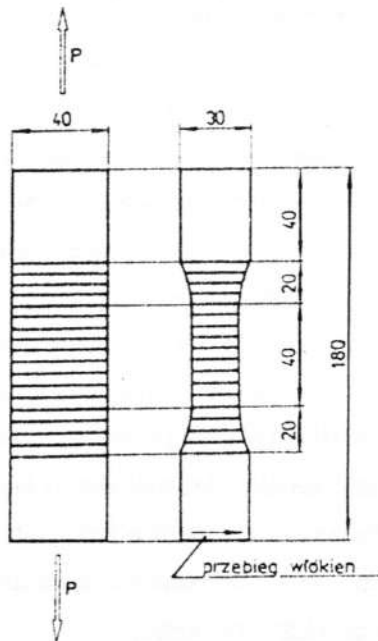
Rys. 2. Krzywe pełzania próbek sklejoných klejem syntetycznym odwracalnym, obciążonych siłami zginającymi o różnych wartościach (wg Waltera [9])



Rys. 3. Krzywe pełzania próbek sklejoných klejem syntetycznym nieodwracalnym, obciążonych siłami zginającymi o różnych wartościach (wg Waltera [9])

Uzyskane wyniki podane w formie krzywych przedstawiających odkształcenia próbek w funkcji czasu trwania obciążenia są sumą deformacji drewna zawartego w próbce oraz spoiny klejowej. W związku z tym możliwe jest jedynie względne, jakościowe porównanie podatności na pełzanie spoin wykonanych z różnych klejów. Nie ma natomiast możliwości jednoznacznego określenia właściwości reologicznych samych spoin.

Niedogodność tę wyeliminowali w swojej metodzie Keylwerth i Höfer [3] stosując dwa typy próbek: klejone i lite. Próbki te wykonano z drewna o jednakowych właściwościach nadając im identyczną geometrię. Idea metody polega na pośrednim wyznaczeniu odkształcenia spoiny przez porównanie deformacji tych próbek. W celu zwiększenia odkształcenia całkowitego i ułatwienia jego pomiaru zastosowano próbki wielospoinowe, w których deformacje poszczególnych spoin kumulują się. Kształt próbki, jej wielkość i sposób obciążenia pokazano na rys. 4. Próbki poddawano obciążeniu rozciągającemu, które z kolei wywoływało rozciąganie spoin.

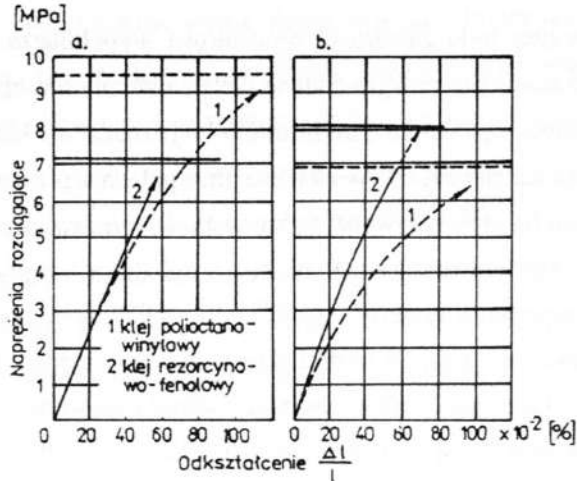


Rys. 4. Próбка wielospoinowa użyta przez Keylwertha i Höfera [3]

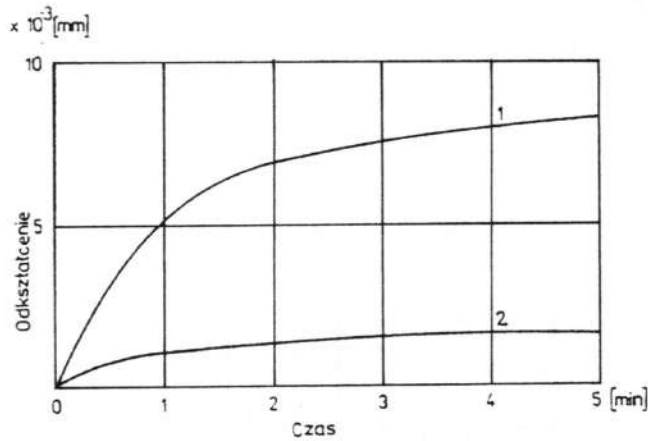
W badaniach uwzględniono dwa rodzaje kleju: polioctanowinylowy (z grupy klejów odwracalnych) i rezorcynowo-fenolowy jako klej nieodwracalny. Jednym z czynników badawczych była prędkość obciążania próbki. Wpływa ona zarówno na odkształcenia, jak i na wytrzymałość złączy klejowych. Jak wynika z rys. 5. spoiny kleju polioctanowinylowego wykazały przy szybkim obciążaniu, pomimo większych odkształceń, wyższą wytrzymałość niż spoiny kleju rezorcynowo-fenolowego. Natomiast przy wolnym obciążaniu wytrzymałość spoin kleju polioctanowinylowego była niższa przy znacznie większych odkształceniach próbki.

Ograniczono się do krótkich, 5-minutowych prób pełzania. Przykładowe wyniki tych prób przedstawiono na rys. 6. Krzywe pełzania dotyczą spoin klejowych, których odkształcenia zostały obliczone jako różnice pomiędzy odkształceniami próbek klejonych i litych. Podobnie jak w badaniach Waltera [9] odwracalny klej polioctanowinylowy charakteryzuje się znacznie większą podatnością na pełzanie niż nieodwracalny klej rezorcynowo-fenolowy. Pomimo pomysłowej konstrukcji próbki i możliwości wyodrębnienia pełzania samej spoiny, metoda ta ma istotną wadę. Otóż spoiny klejowe próbki poddawane były rozciąganiu, podczas gdy spoiny pracujące w konstrukcjach drewnianych są przede wszystkim narażone na ścinanie.

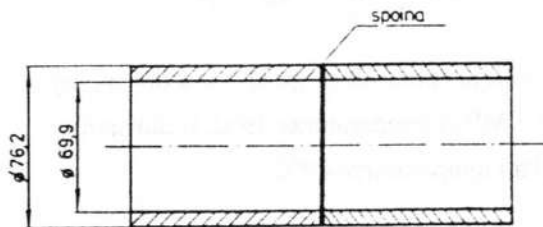
W 1979r. opublikowane zostały wyniki ciekawych badań Rutheforda i Hughesa [8]. Dotyczyły one wprawdzie pełzania spoiny klejowej łączącej elementy metalowe, ale biorąc pod uwagę uwzględnione czynniki badawcze, m.in. temperaturę połączenia, badania te warto odnotować. Przeprowadzono dwa rodzaje prób pełzania: na próbkach rurkowych (rys. 7) poddawanych skręcaniu wywołującemu w spoinie naprężenia ścinające i na próbkach wykonanych z dwóch prętów sklejonych doczołowo (rys. 8) poddawanych rozciąganiu wywołującemu w spoinie naprężenia rozciągające. Próbki te wykonano ze stopu tytanowo-aluminiowo-wanadowego przy użyciu kleju epoksydowego. Grubość spoiny łączącej poszczególne elementy wynosiła od 0.05 do 0.1mm. Spoiny utwardzono w temperaturze 47°C przez 50min, a następnie przez 20min. w temperaturze 93°C. Do pomiaru odkształceń spoiny zastosowano czujniki pojemnościowe o rozdzielczości  $0.2 \times 10^{-4}$ mm.



Rys. 5. Zależność odkształcenia próbek wielospoinowych od napężenia rozciągającego: a- przy szybkim obciążeniu (czas zniszczenia 0.73-0.93 min) b- przy powolnym obciążeniu (czas do zniszczenia 24-27.4 min) (wg Keylwertha i Höfera [3])

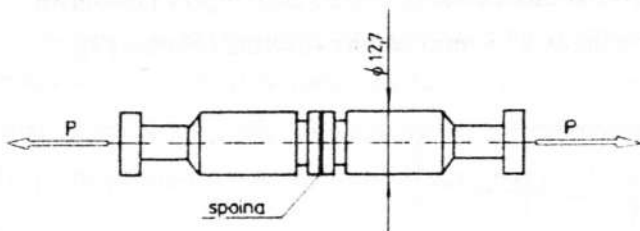


Rys. 6. Krzywe pełzania dla spoin klejowych  
 1- dla kleju polioctanowinyłowego przy napężeniu w spoinie 2.4 MPa  
 2- dla kleju rezorcynowo-fenolowego przy napężeniu w spoinie 3.3 MPa

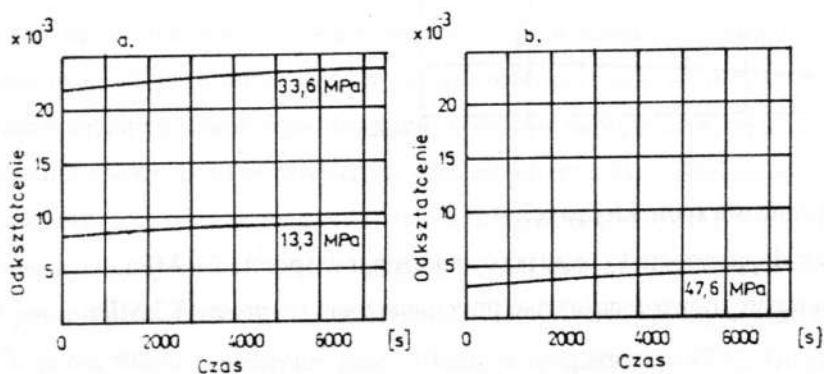


Rys. 7. Próbka skręcana wykorzystywana w badaniach Rutheforda i Hughesa [8]

Podstawowym czynnikiem badawczym była zawartość procentowa wypełniacza w kleju. Poza żywicą epoksydową i utwardzaczem aminowym badane kleje zawierały następujące ilości wypełniacza w postaci sproszkowanego tlenku aluminium: 60% (oznaczenie kleju SK-5), 70% (oznaczenie H-74) i 80% (oznaczenie SK-7). Większość prób pełzania przeprowadzono w temperaturze 49°C ze względu na przewidywane wykorzystanie wymienionych klejów w konstrukcjach pracujących w tej temperaturze. Ponadto uwzględniono wpływ temperatury złącza klejowego. Zakres temperatury wynosił od -40°C do +82°C, przy czym badania w tym zakresie temperatur ograniczono tylko do próbki skręcanej zawierającej klej H-74. W przypadku spoin ścinanych (próbki skręcane) próbki obciążano siłami zapewniającymi naprężenia w spoinie klejowej zmieniające się w przedziale od 13.1 do 41MPa, w przypadku próbek rozciąganych operowano tylko jednym poziomem naprężenia w spoinie wynoszącym 47.6MPa. Czas wszystkich prób pełzania był jednakowy, wynosił 2 godziny.



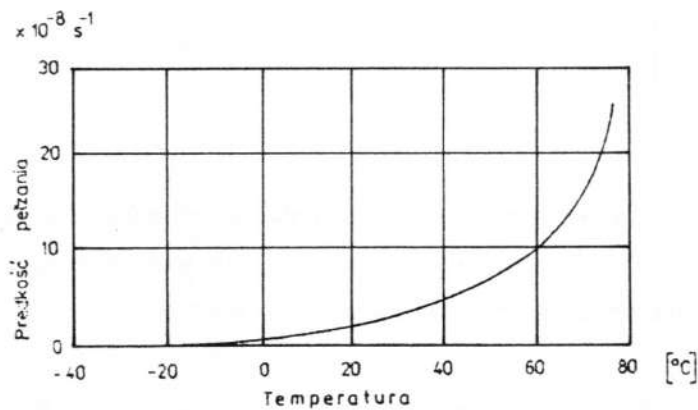
Rys. 8. Próbkę rozciągana wykorzystywana w badaniach Rutheforda i Hughesa [8]



Rys. 9. Krzywe pełzania spoiny wykonanej z kleju epoksydowego H-74; a-dla spoiny ścinanej przy naprężeniach 13.1 i 33.1 MPa i temperaturze 49°C, b-dla spoiny rozciąganej przy naprężeniu 47.6 MPa i temperaturze 49°C

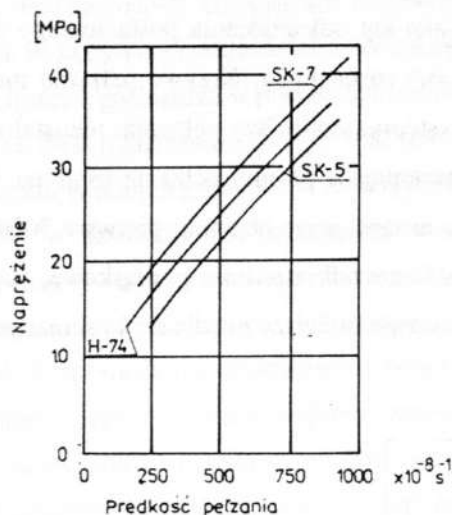


Przykładowe wyniki badań w postaci krzywych pełzania spoin klejowych przedstawiono na rys. 9. Jako odkształcenie spoiny przyjmowano kąt odkształcenia postaciowego dla spoiny ścinanej i wydłużenie jednostkowe dla spoiny rozciąganej. Krzywe pełzania mają typowy przebieg. W przypadku spoiny ścinanej występują dwie fazy pełzania: nieustalone trwające w przybliżeniu przez pierwsze 1000 s i następujące po nim pełzanie ustalone. W przypadku spoiny rozciąganej natomiast faza pełzania nieustalonego obejmuje pierwsze 3000 s, po czym pełzanie ustaje. Warto zauważyć, że zarówno odkształcenie początkowe, jak i odkształcenia pełzania dla spoin rozciąganych są znacznie mniejsze niż dla spoin ścinanych.



Rys. 10. Zależność prędkości pełzania od temperatury dla spoiny kleju H-74 przy obciążeniu ścinającym i naprężeniu o wartości 13.8 MPa (wg Rutherforda i Hughesa [8])

Temperatura spoiny klejowej w istotny sposób wpływa na jej pełzanie. Na rys. 11. przedstawiono zależność prędkości pełzania spoiny (w fazie pełzania ustalonego) od jej temperatury. Dla  $-40^{\circ}\text{C}$  prędkość ta jest równa zero, w temperaturze pokojowej osiąga wartość  $2.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ , a dla temperatur większych od  $65^{\circ}\text{C}$  gwałtownie wzrasta.

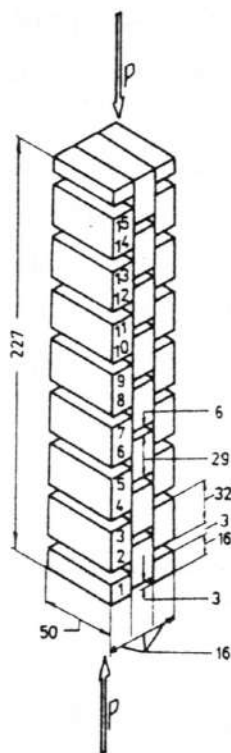


Rys. 11. Zależność między wartością naprężenia w spoinie a prędkością jej pełzania w fazie pełzania ustalonego-dla spoin kleju epoksydowego o różnej zawartości wypełniacza, poddanych ścinaniu w temperaturze 49°C (wg Rutherforda i Hughesa [8])

Wpływ zawartości wypełniacza w kleju epoksydowym na pełzanie spoiny wykonanej z tego kleju odzwierciedla rys. 11. Wzrost zawartości wypełniacza powoduje obniżenie prędkości tego pełzania bez względu na wartość naprężenia w spoinie. Warto zaznaczyć, że prędkość pełzania spoiny jest w przybliżeniu proporcjonalna do istniejącego w niej naprężenia.

Odmienne charakter od poprzednio opisanych badań miały doświadczenia Gauderta [1]. Ich podstawowym celem była ocena przydatności amerykańskiej normy ASTM D 3535-90 [6] w warunkach kanadyjskich. Norma ta dotyczy odporności konstrukcyjnych klejów do drewna na odkształcenia wywołane działaniem długotrwałego obciążenia w podwyższonej temperaturze lub wilgotności otoczenia. Pomimo, że w normie tej nie używa się określenia "pełzanie", opisywana procedura badawcza jest w istocie ukierunkowana na badanie pełzania wzorcowych spoin klejowych utworzonych z badanego kleju, zaś podstawą oceny kleju jest zmierzona po ustalonym czasie wartość sumarycznego odkształcenia wszystkich złączy wykorzystywanej próbki wielospoinowej (rys. 12). Próbka ta zasługuje na szczególną uwagę - jest to symetryczna, wielonakładkowa próbka ściskana, zawierająca ułożone szeregowo

jednakowe ścinane złącza nakładkowe. Dzięki takiej konstrukcji odkształcenia spoin klejowych stanowią znaczącą część deformacji całej próbki, co podnosi dokładność i wiarygodność wyników oceny badanych klejów. Symetria kształtu pojedynczego złącza nakładkowego zawartego w próbce sprzyja uzyskiwaniu w spoinach stanu naprężenia zbliżonego do czystego ścinania, któremu towarzyszą stosunkowo niewielkie naprężenia normalne. Wadą omawianej próbki jest jej kłopotliwe wykonanie wynikające z faktu, że duża ilość odrębnych elementów należy precyzyjnie skleić operując specjalnymi przekładkami metalowymi.



Rys. 12. Wielonakładkowa próbka ściskana (wg normy ASTM D 3535-90 [6])

Zgodnie z normą ASTM D 3535-90 [6] próbkę ściska się siłą o wartości 2182N przez okres 7 dni, po czym mierzy się skrócenie próbki z dokładnością 0.13mm. Próbkę przeprowadza się albo w podwyższonej do 71°C temperaturze lub w podwyższonej do 90% wilgotności powietrza. Dla obydwu warunków otoczenia przeprowadza się po dwie próby.

Badaniom odporności spoin na długotrwałe obciążenia w podwyższonych warunkach [1] poddano trzy rodzaje klejów: stosowany do klejenia drewna warstwowego klej rezorcynowo-fenolowo-formaldehadowy w dwóch wariantach - z katalizatorem ciekłym (wariant I) i

proszkowym (wariant II), klej kazeinowy - również jako wykorzystywany do produkcji drewna warstwowego oraz coraz szerzej stosowany w konstrukcjach drewnianych klej polioc-tanowinyłowy w trzech postaciach - zwykłej, katalizowanej i utwardzanej na zimno oraz katalizowanej i utwardzanej na gorąco. Ponadto dla porównania uwzględniono próbki z litego drewna (nie klejone).

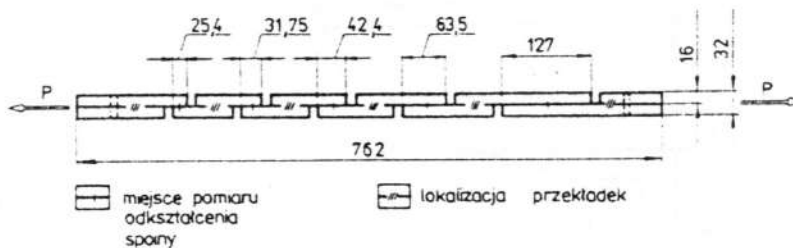
Wyniki badań przedstawiono w tab.1. Kleje konstrukcyjne: rezorcynowy i kazeinowy charakteryzują się małą podatnością na pęczanie. Klej polioc-tanowinyłowy wykazuje bardzo dużą podatność na pęczanie szczególnie w warunkach podwyższonej wilgotności, natomiast w warunkach podwyższonej temperatury próbki ulegają szybkiemu zniszczeniu. Wprowadza-nie katalizatora do kleju polioc-tanowinyłowego uodparnia go na pęczanie, zwłaszcza w przypadku klejenia na gorąco.

Inną próbkę wielozłączową, znacznie łatwiejszą do wykonania, zastosowali River i Gillespie [7]. Próbka ta (rys. 13) zawiera szereg złączy zakładkowych, których długości są zróżnicowane. Dzięki temu podczas jej rozciągania siłą o stałej wartości uzyskuje się różne poziomy średniego naprężenia ścinającego w spoinach klejowych poszczególnych złączy. Za pomocą jednej próbki można zrealizować jednocześnie kilka prób pęczania o różnym stopniu wyteżenia spoiny.

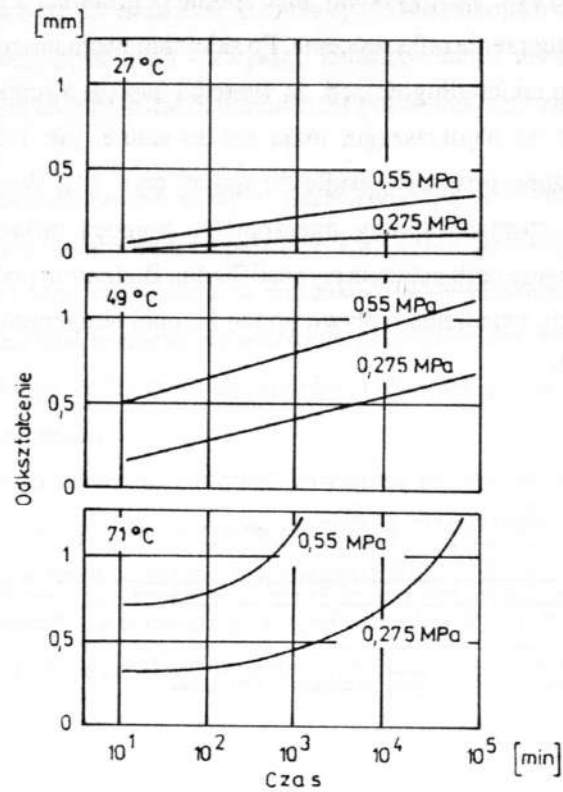
**Tabela 1.** Odształcenia próbek po upływie 7 dni w mm (wg Gauderta [1])

Warunki otoczenia	Nr próbki	Próbka lita	Rodzaj kleju					
			Rezorcynowy I	Rezorcynowy II	Kazeinowy	Polioc-tanowinyłowy zwykły	Polioc-tanowinyłowy utwardzany na zimno	Polioc-tanowinyłowy z katalizatorem utwardzany na gorąco
Podwy- ższona tempera- tura	1	0.24	0.20	0.25	0.45	9.40	3.18	0.70
	2	0.14	0.22	0.58	0.53	5.50	1.48	0.72
Podwy- ższona wilgotność	1	0.12	0.37	0.15	0.55	zniszczona	zniszczona	5.87
	2	0.14	0.12	0.13	0.57	zniszczona	4.17	2.35

Próbki sklemano z dwóch deseczek stosując przekładki o grubości 0.4mm usytuowane w miejscach pokazanych na rys. 13. Uzyskano więc spoinę pogrubioną a przez to wykazującą większe, łatwiejsze do zmierzenia odkształcenia. Po sklejeniu nacinano rowki, wyodrębniając 5 złączy zakładowych o takich długościach, że wartości naprężeń ścinających w klejonych złączach, rozpoczynając od najdłuższego, mają się do siebie, jak 1:2:3:4:5. Na każdym badanym złączu zaznaczono rysę prostopadłą do spoiny (rys. 13). Wzajemne przesunięcie odcinków rysy po obu stronach spoiny mierzono za pomocą mikroskopu z dokładnością 0.0076mm. Czas trwania prób pełzania wynosił 70 dni. Badaniom poddano konstrukcyjne kleje elastomerowe w celu określenia wpływu podwyższonej temperatury (27, 49 i 71°C) na pełzanie spoin klejowych.



Rys. 13. Próбка użyta w badaniach Rivera i Gillespiego [7]



Rys. 14. Krzywe pełzania spoiny wykonanej z kleju elastomerowego dla trzech temperatur i dla dwóch poziomów natężenia (wg Rivera i Gillespiego [7])

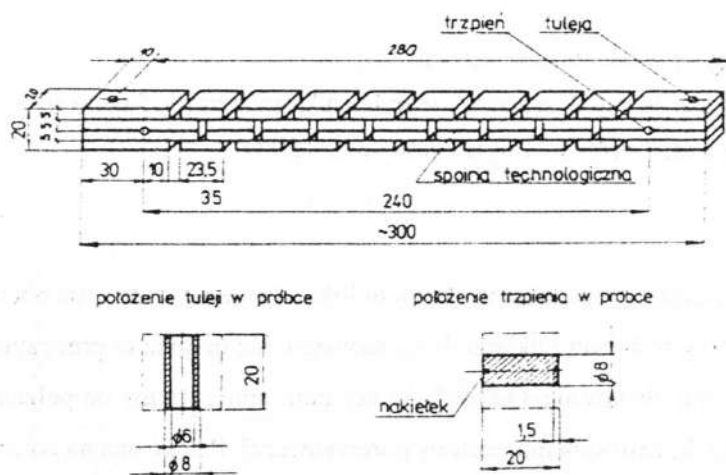
Przykładowe wyniki badań Rivera i Gillespiego [7] pokazano na rys. 14. Widoczny jest wyraźny wpływ temperatury na odkształcenia pełzania spoiny klejowej. Wzrost temperatury intensyfikuje proces pełzania spoiny, w temperaturze 71°C pojawia się faza “pełzania do zniszczenia”.

Podobnie jak poprzednie metody badań i ta zaproponowana przez Rivera i Gillespiego [7] posiada pewne ujemne cechy. Należy do nich przede wszystkim konieczność indywidualnego pomiaru odkształcenia każdej ze spoin, co realizuje się metodą optyczną lub tensometryczną. Komplikuje to procedurę pomiarową i nie daje możliwości wyznaczania ciągłych krzywych pełzania. Ponadto budowa próbki - połączenie zakładkowe - prowadzi do występowania w spoinach niepożądanych naprężeń normalnych.

W połowie lat osiemdziesiątych badania dotyczące pełzania spoin klejowych w połączeniach drewnianych podjęto również w Instytucie Techniki Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Bydgoszczy. Jednym z efektów tych badań była praca doktorska M. Gogolina [2] zatytułowana: *Metoda badania pełzania spoiny klejowej w drewnie*. Przeanalizowano w niej między innymi badania poprzedników dotyczące konstrukcji próbki i pełzarki w oparciu o szereg kryteriów, takich jak:

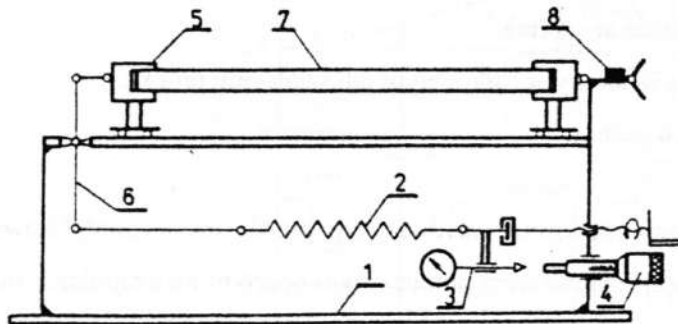
- prostota konstrukcji i jej technologiczność,
- łatwość przyłożenia obciążenia,
- równomierność rozkładu naprężeń w spoinie,
- możliwie duży udział deformacji spoiny w całkowitym odkształceniu próbki,
- brak niepożądanych deformacji próbki,
- łatwość wykonania.

W oparciu o tę analizę zaproponowano zarówno typ próbki jak i zmodyfikowaną konstrukcję pełzarki wraz z oprzyrządowaniem pomiarowym opartym na czujnikach indukcyjnych. Konstrukcję próbki i pełzarki pokazano na rys. 15. i 16.



Rys. 15. Próbką użyta w badaniach Gogolina [2]

Jak widać budowa próbki nawiązuje do konstrukcji opisanej przez normę ASTM D 3535-90 [6]. Jednak w znaczny sposób zmodyfikowano technologię samej próbki, rezygnując z wykonania przekładek w czasie klejenia. Poszczególne spoiny uzyskuje się przez wykonanie nacięć na próbce przy pomocy piły tarczowej lub frezu. Istotną nowością było zastosowanie do tego typu próbki obciążenia rozciągającego wywołującego w spoinie stan ścinania, podczas gdy norma amerykańska zaleca obciążenie ściskające. Dzięki tej zmianie zniwelowane zostało niebezpieczeństwo wyboczenia próbek o większej długości.



Rys. 16. Schemat pełzarki użytej w badaniach Gogolina [2];

1-podstawa, 2-sprężyna, 3-czujnik zegarowy, 4-śruba mikrometryczna, 5-uchwyty,  
6-dźwignia dwustronna, 7-próbka, 8-układ kasowania luzów

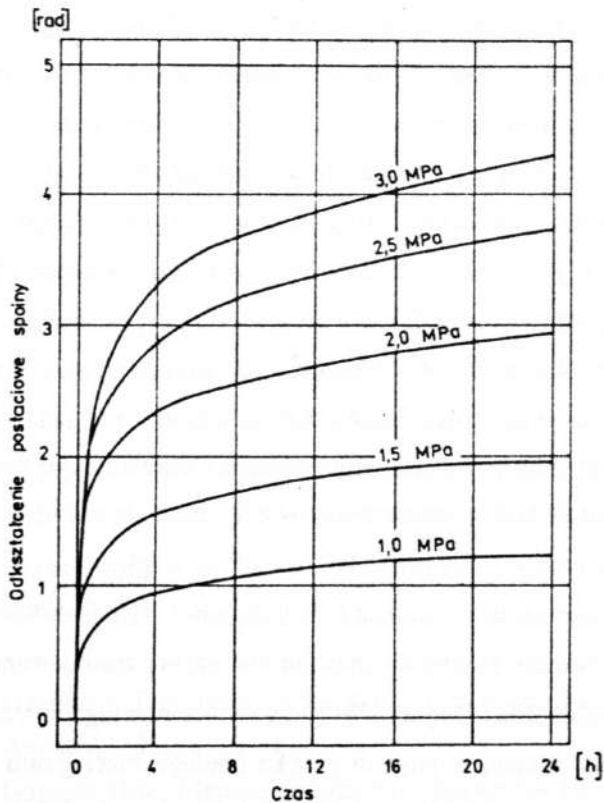
Jeśli chodzi o budowę pełzarki i sposób obciążenia próbki, to wykorzystano siłę obciążającą pochodzącą od sprężyny śrubowej i układu dźwigniowego. Umożliwia to precyzyjne ustawienie wybranego poziomu obciążenia. Oddzielenie pełzania samej spoiny od pełzania całej próbki możliwe było dzięki zastosowaniu metody porównawczej. Polega ona na porównaniu odkształceń próbek klejonych i analogicznych kształtem i wymiarami próbek litych. Materiałem wyjściowym do wykonania próbek były drewno bukowe i klej poliocetanowinylowy.

Czynnikiem badawczym był poziom naprężenia w spoinie klejowej wynoszący: 1; 1.5; 2; 2.5 i 3MPa. Wyniki doświadczeń w postaci rodziny krzywych pełzania dla różnych poziomów obciążenia przedstawia rys. 16. Zaletami tej metody są przede wszystkim:



- możliwość seryjnego wykonywania próbek przy użyciu prostego oprzyrządowania, które pozwala uzyskać dobrą powtarzalność wymiarów próbek,
- symetria próbki wielospoinowej, dzięki czemu badane spoiny klejowe poddawane są działaniu naprężeń ścinających o rozkładzie w przybliżeniu równomiernym,
- możliwość wyodrębnienia deformacji spoin klejowych z całkowitego odkształcenia próbki,
- prostota konstrukcji pełzarki sprężynowo-dźwigniowej zapewniającej dobrą powtarzalność przykładanych do próbek obciążeń,
- precyzyjny pomiar odkształceń za pomocą czujników indukcyjnych oraz możliwości rejestracji przebiegu odkształceń w sposób ciągły i automatyczny.

Jedynym istotnym mankamentem tej metody jest zmiana wartości obciążenia wywołana przez deformację próbki. Usterkę tę można jednak usunąć zastępując stosowaną w pełzarce sprężynę śrubową sprężyną stałosiłową. Problem ten został zasygnalizowany podczas VI Sesji Naukowej "Badania dla Meblarstwa", która odbyła się 29.01.1993r. w Akademii Rolniczej, w Poznaniu.



Rys. 17. Rodzina krzywych pełzania uzyskanych w badaniach Gogolina [2]

### 3. Podsumowanie

Opisane badania dotyczące reologii spoiny klejowej uwidaczniają trudności związane z analizą tego zagadnienia.

Najważniejszą z nich jest zróżnicowanie badanych wielkości mierzonych. Można tu wyróżnić co najmniej trzy sposoby postępowania. Pierwszy z nich koncentruje się na pomiarze odkształcenia całej próbki. Drugi – na pomiarze odkształceń złącza klejowego będącego częścią próbki. Wreszcie trzeci – na analizie deformacji samej spoiny klejowej. Najwłaściwszy wydaje się sposób trzeci. Jednak o ile jego realizacja jest stosunkowo łatwa w odniesieniu do spoin klejowych w połączeniach metalowych, gdzie nie ulegają istotnej deformacji metalowe elementy łączone, o tyle w przypadku połączeń klejowych drewnianych jest ona utrudniona dodatkowym – oprócz spoiny – odkształceniem drewna elementów łączonych. Stąd konieczność stosowania badań porównawczych z wykorzystaniem próbek klejonych i bliźniaczych próbek litych, jak to uczynili Gogolin [2] oraz Keylwerth i Höfer [3].

Istotne problemy pojawiają się również przy analizie metodycznej poszczególnych badań. Jak łatwo zauważyć, praktycznie w każdym z opisanych badań stosowano próbki o odmiennych kształtach i geometrii. Mało dogodnie do analizy reoefektów okazały się próbki stosowane przez Waltera [9] – ze względu na nietypowy sposób obciążenia i niesymetryczny kształt połączenia. Są one zresztą przeznaczone zasadniczo dla badań wytrzymałościowych. Liczne wątpliwości nasuwają również próbki wykorzystane w badaniach Gauderta [1] i normie ASTM D 3535-90 [6] – ze względu na trudności technologiczne oraz próbka Rivera i Gillespiego [7] – z powodu niesymetrycznego kształtu połączenia powodującego powstawanie niepożądanych naprężeń normalnych. Polecieć natomiast należy próbki użyte w badaniach Gogolina [2], jako łatwe do wykonania i dające równomierny, właściwy rozkład naprężeń.

Sposoby obciążania próbek również budzą zastrzeżenia. Niedopuszczalny wydaje się być sposób przyłożenia siły do próbki zastosowany przez Waltera [9] ze względu na fakt, iż wywołuje ona w spoinie naprężenie rozciągające, zamiast konstrukcyjnie wymaganych naprężeń ścinających. Te same zarzuty odnieść można do sposobu obciążania zastosowanego przez Keylwertha i Höfera [3] oraz Rutheforda i Hugnesa [8] (przy próbce rozciąganej). Jako właściwe należy uznać te sposoby obciążenia, w których próbka podlega rozciąganiu lub ścisłaniu wywołującemu powstawanie w spoinie klejowej naprężeń ścinających. Tego typu obciążenie stosowali Gaudert [1], River i Gillespie [7] i Gogolin [2]. Taki sposób obciążenia zaleca również norma ASTM D3535-90 [6].

Jeśli chodzi o sposoby pomiaru odkształceń to wyróżnić można co najmniej trzy metody pomiarowe. Metodę optyczną wykorzystywali River i Gillespie [7] mierząc deformację za pomocą mikroskopu linearnego. Metodę pomiaru przy użyciu czujników pojemnościowych wykorzystywali Rutheford i Hugnes [8], a czujnikami indukcyjnymi posługiwał się Gogolin [2]. Co do przewagi którejś z tych metod trudno jest o rzeczową ocenę. Jednak najtrudniejsza do realizacji wydaje się być metoda optyczna.

Trudności pojawiają się też przy analizie merytorycznej poszczególnych badań, gdyż praktycznie każde z nich obejmowało inny fragment zagadnień reologicznych. I tak do najczęstszych czynników badawczych uwzględnionych przez autorów zaliczyć można: rodzaj kleju i poziom obciążenia. Wpływ tych elementów na reologię połączeń klejowych został poznany w stopniu największym. Zdecydowanie słabiej zbadano wpływ takich czynników, jak: temperatura i wilgotność. Zupełnie zaś brak doniesień o badaniach analizujących wpływ grubości spoiny, jakości powierzchni sklejanых elementów, oddziaływania czynników chemicznych i promieniowania ultrafioletowego. Całkowicie niezbadany pozostaje również drugi obok pełzania efekt reologiczny – relaksacja naprężeń.

Dodatkowym utrudnieniem jest sposób prezentacji i interpretacji wyników. W sposób tabelaryczny przedstawia rezultaty swoich badań Gaudert [1]. Reszta autorów obrazuje wyniki w postaci wykresów. Niestety możliwość ich porównania jest mocno ograniczona ze względu na stosowanie zróżnicowanych parametrów i skal, np. czas prezentowany jest na skali wykresu w sposób liniowy lub logarytmiczny.

Konkludując, stwierdzić należy, iż dalsze badania, których konieczność jest oczywista winny zostać wsparte opracowaniem całościowej normy uwzględniającej zarówno metodykę badań jak i kształt, wielkość próbek, sposób obciążania oraz rodzaj pomiaru odkształceń. Brak tego typu unormowania powoduje bowiem kłopoty metodyczne i uniemożliwia porównywanie i weryfikację przeprowadzonych już badań.

## LITERATURA

- [1] Gaudert P., Evaluation of the standard creep test for wood laminated adhesives. Adhesives Age nr 4, 1980, s. 31-34
- [2] Gogolin M.R., Metoda badania pełzania spoiny klejowej w drewnie. Rozprawa doktorska SGGW, Warszawa 1992
- [3] Keylwerth R., Hofer W., Rheologische Untersuchungen an Leimfugen bei Quersugbelastung. Holz als Roh- und Werkstoff nr 3, 1962, s. 91

- [4] Niemz P., Über einige Erkenntnisse zum Kriechverhalten von Holzpartikelwerkstoffen. Holztechnologie nr 20, 1973, s.131-136
- [5] Niemz P., Über einige Erkenntnisse zum Kriechverhalten von Vollholz. Holztechnologie nr 21, 1980, s. 195-199
- [6] Norma ASTM D 3535-90, Resistance to deformation under static loading for structural wood laminating adhesives used under exterior (wet use) exposure conditions
- [7] River B.H., Gillespie R.H., Behavior of construction adhesives under long-term load, Forest Products Laboratory research paper FPL 400, 1981
- [8] Rutheford J.L., Hughes E.J.: Creep in adhesive – bonded metal joints. Adhesives Age nr 11, 1977, s.55-58
- [9] Walter F., Fragen der Entwicklung und Vereinheitlichung der mechanisch - technologischen Prüfung von Klebstoffen. Holztechnologie (Sonderheft), 1964
- [10] Zbiór referatów z: I Sympozjum "Reologia drewna i konstrukcji drewnianych", Zielonka, 1982, Wyd. AR Poznań
- [11] Zbiór referatów z: II Sympozjum "Reologia drewna i konstrukcji drewnianych" Rydzyna, 1986, Wyd. AR Poznań

## **RHEOLOGY OF GLUELINES WITH SPECIAL REGARD TO JOINTS OF WOODEN ELEMENTS**

### **Summary**

In this paper the reseaches hitherto mde into glueline creep were presented. They were discussed in a chronological order, putting stress on the development of methods of testing. The results of reserches conducted at the Institue of Technology of the Pedagogikal University in Bydgoszcz were also included. It was pointed out that the methods of testing creep of gluelines joining wooden elements should be unified.