

POŁĄCZENIA KLEJONE ELEMENTÓW STALOWYCH W KONSTRUKCJACH BUDOWLANYCH I MOSTOWYCH

HENRYK CZUDEK (WARSZAWA)

Połączenia klejone elementów stalowych znajdują coraz większe zastosowanie w praktyce budowlanej oraz w mostownictwie. W pracy podaje się krótko najistotniejsze zagadnienia związane z nowym sposobem łączenia, przy czym oparto się przede wszystkim na doświadczeniach krajowych. Omówiono projekt doświadczalnego mostu drogowego o elementach klejonych, będącego w stadium realizacji. Zagadnieniami klejenia elementów stalowych zajmuje się w Polsce głównie Politechnika Warszawska, COBiRT Drogownictwa oraz COBiRT Kolejnictwa.

1. Rodzaje klejów stosowanych w Polsce. Dane techniczne

Do klejenia metali służyć mogą następujące kleje krajowe: a) klej epoksydowy «Epidian» 1, 3, 5, 50, 100 itp, b) klej dwuskładnikowy PWF (A i B), c) klej BWF 21, d) klej BWF 41 oraz e) klej karbinolowy. Kleje epoksydowe wytwarzane są na bazie żywic termoreaktywnych (żywice epoksydowe). Klej PWF, BWF 21 i BWF 41 wytwarzane są na bazie żywic fenolowo-formaldehydowych. Klej PWF posiada dodatki o podstawie poliwinylformalu, a kleje PWF dodatki o podstawie poliwinyllobutyralu. Klej karbinolowy wytwarzany jest z żywic termoplastycznych. Głównymi producentami klejów do metali są Zakłady Chemiczne w Sarzynie, Zakłady Chemiczne w Sochaczewie, Instytut Tworzyw Sztucznych w Warszawie (I.T.Sz.).

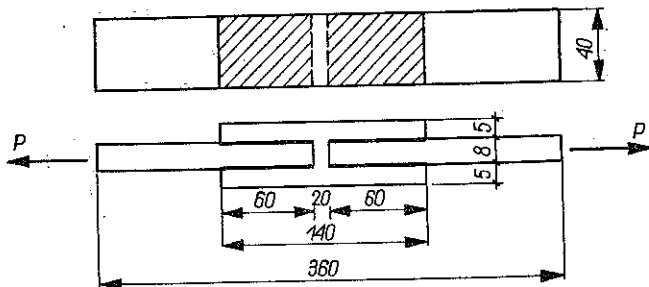
Własności wytrzymałościowe. Kleje produkcji polskiej do klejenia metali poddawano niektórym podstawowym badaniom wytrzymałościowym w szeregu laboratoriów badawczych. W wyniku przeprowadzonych doświadczeń [1, 2] uzyskano dane odnośnie wytrzymałości klejonych połączeń części stalowych przy obciążeniu statycznym: a) na ścinanie spoiny klejowej przy rozciąganiu elementów łączonych w temperaturze pokojowej, -25°C oraz 45°C , b) na ścinanie spoiny klejowej przy zginaniu elementów łączonych w temperaturze pokojowej.

Zbadano również wytrzymałość zmęczeniową przy tętniącym obciążeniu spoiny klejowej średnimi naprężeniami ścinającymi o wielkości τ w przedziale $0-50 \text{ kG/cm}^2$.

Wpływ starzenia się połączeń klejonych zbadano przez pozostawienie próbek w wodzie słodkiej o temperaturze 18°C przez okres czterech miesięcy.

Zbadano wytrzymałość szepną połączeń klejonych przy naprężeniach w stali około 1800 kG/cm^2 , a więc przy naprężeniach bliskich granicy sprężystości stali o $R_r \approx 37 \text{ kG/mm}^2$.

Przytoczone badania na ścinanie przy rozciąganiu wykonano na próbkach przedstawionych na rys. 1. Badania na ścinanie przy zginaniu wykonano na próbkach



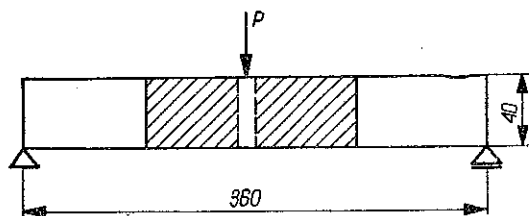
Rys. 1

przedstawionych na rys. 2. Badania zmęczeniowe wykonywano na próbkach z rys. 1. Wyniki badań podaje tablica 1.

Tablica 1. Wytrzymałości połączeń klejonych dla klejów polskich

Rodzaj kleju	Wytrzymałość na ścinanie przy rozciąganiu lub zginaniu, klejenie na gorąco (kG/cm ²)			Ilość cykli obciążenia pulsującego $\tau_a = 0$ $\tau_g = 50 \text{ kG/cm}^2$
	$t = 18^\circ\text{C}$	$t = 25^\circ\text{C}$	$t = 45^\circ\text{C}$	
Epidian WAT	238	188	206	1270000
Epidian ITSz	102	88	87	305000
PWF	2#2	147	170	458000
BWF-21	134	94	108	200000
Karbinolowy	105	48	87	71000

Dobrą przyczepność do metali stwierdzono w przypadku klejów epoksydowych. Strata wytrzymałości klejów epoksydowych w niskich temperaturach wynosiła



Rys. 2

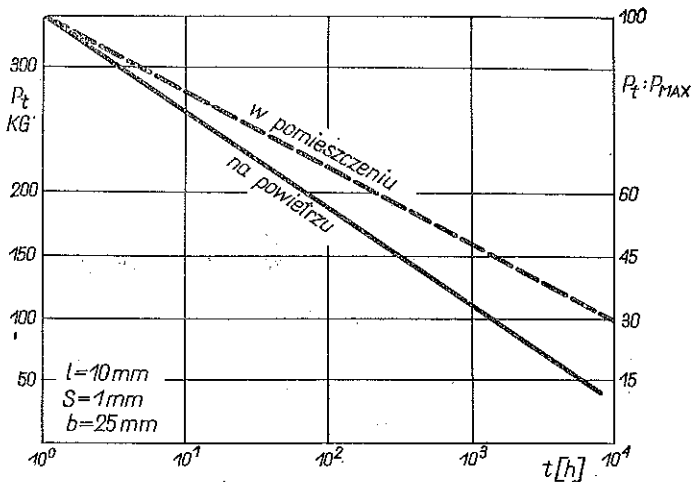
~ 20% i była najniższa w porównaniu ze stratami wytrzymałości innych badanych klejów. Stwierdzono znaczną kruchość klejów karbinolowych.

Właściwy wybór kleju. Klejami w chwili obecnej najbardziej odpowiednimi u nas do zastosowań w konstrukcjach stalowych są kleje epoksydowe. Osiągają one bowiem najwyższą wytrzymałość na ścinanie przy obciążeniu statycznym oraz

zmęczeniowym. Odznaczają się również małymi spadkami wytrzymałości przy niższych temperaturach (-25°C). Kleje epoksydowe umożliwiają klejenie w temperaturze pokojowej bez konieczności stosowania specjalnego docisku.

Idealnym klejem do metali byłby klej, który mógłby być użyty w temperaturze pokojowej bez znacznego dociskania części łączonych i który wykazałby w krótkim czasie wytrzymałość na rozciąganie równą wytrzymałości części klejonych oraz nie podlegający starzeniu i pęcznieniu. Klejów o podobnych własnościach nie ma. Główną wadą połączeń za pomocą obecnych klejów jest ich mała wytrzymałość na odrywanie. Powoduje to konieczność stosowania połączeń, pracujących na ścinanie. Tam, gdzie odrywanie jest nieuniknione, konieczne stać się może stosowanie śrub współpracujących ze spoiną klejową. Ogólnie stwierdzić należy, iż stosowanie dodatkowych śrub jest zawsze korzystne.

Zagadnienia związane ze stosowaniem klejów epoksydowych. Kleje epoksydowe mogą być stosowane bez wywierania znaczniejszych docisków. Mogą być one utwardzane termicznie lub też stosowane na zimno. Wybór rodzaju kleju epoksydowego uzgodnić należy z wytwórcią. Dla stosowania na zimno zalecić można Epidian 3. Ze względów technologicznych oraz ekonomicznych celowe jest stosowanie klejów na zimno, tj. takich, w których proces utwardzania może się odbywać



Rys. 3

bez konieczności doprowadzania ciepła z zewnątrz. Kleje na zimno wykazują szereg zalet technologicznych. Główną jednak ich wadą w warunkach krajowych jest znacznie niższa wytrzymałość na ścinanie, wynosząca około 20–40% wytrzymałości kleju na gorąco. Wytrzymałość na ścinanie kleju epoksydowego na zimno przy łączeniu blach stalowych o grubości około 10 mm nie przekracza 60–100 kG/cm^2 , podczas gdy wytrzymałość tego kleju na gorąco przekroczyć może nawet 250 kG/cm^2 . Dla zastąpienia w istniejącej konstrukcji obciążonej w sposób statyczny połączenia nitowanego połączeniem klejonym, naprężenie dopuszczalne na ścinanie spoiny klejowej przewyższać powinno wartość około 60 kG/cm^2 . Polskie kleje epoksy-

dowe stosowane na zimno tylko w wyjątkowych przypadkach osiągają wytrzymałości gwarantujące taką wartość.

Kleje epoksydowe podlegają procesowi starzenia (rys. 3). Bardziej odporne na starzenie są kleje stosowane na gorąco. Badania doświadczalne wyznaczają spadek wytrzymałości w ciągu 3 lat około 20–30% [2].

Proces starzenia wpływać może również na zwiększenie kruchości spoiny klejowej.

Kleje epoksydowe na zimno wykazują własności reologiczne [3]. Stosowanie ich na gorąco jest więc uzasadnione.

Niebezpieczną własnością kleju epoksydowego jest jego kruchość. Jeżeli za miernik tej kruchości przyjąć udarność klejonego połączenia stalowego, to wynosi ona w temperaturze pokojowej 1–2 kGm/cm². Jest więc niska.

2. Technologia klejenia klejami epoksydowymi

Uwagi ogólne. Kleje epoksydowe mogą być dostarczane w formie produktu końcowego w postaci proszku. Zawierają one wówczas już dodany utwardzacz. Jest to produkt gotowy do stosowania; powinien on być użyty w krótkim czasie. Należy zastosować utwardzacz typu poliaminoamidu PA-C (Poliamid C), dwucjanodwuamidu, metafenylenodwuaminy. Natomiast nie należy używać utwardzaczy działających w temperaturze pokojowej (Tęcza P), gdyż wówczas klej trzeba użyć w czasie co najwyżej kilku godzin.

Kleje mogą być również dostarczone oddzielnie w postaci masy epidianowej oraz utwardzacza, wypełniacza i rozpuszczalnika. Wówczas należy wpięrcz przygotować mieszaninę epidianu oraz rozpuszczalnika (ew. wypełniacza). Zwykle podgrzewa się epidian do temperatury około 100°C oraz dodaje gorący (80–100°C) rozpuszczalnik w odpowiedniej proporcji (średnio 1 : 4). Optymalne proporcje ustala się oddzielnie dla różnych epidianów oraz rozpuszczalników. W drugim etapie dodaje się do mieszaniny utwardzacz (ew. wypełniacz). Proporcje są różne, średnio 8–12% wagi utwardzacza. Składniki należy wymieszać na zimno.

Rozpuszczalniki i wypełniacze. Rozpuszczalniki (zmiękczacze) mają rozpuścić żywicę i nadać jej odpowiednią lepkość. Stosuje się jako rozpuszczalniki: a) ftalen dwubutyłu, b) ftalen, c) toluen, d) ksylen i inne węglowodory aromatyczne, e) estry (octan, etylu, octan butylu) oraz f) ketony (metyloetyloketon, aceton, cykloheksanon itp.).

Wypełniacze (napelniacze) mają na celu zmniejszenie skurczu kleju podczas utwardzania (szczególnie przy klejeniu na gorąco), zmianę współczynnika rozszerzalności cieplnej kleju, podwyższenie udarności skleiny oraz obniżenie kosztów przy większych grubościach skleiny. Stosuje się między innymi: a) piasek drobny, b) szkło mielone, c) mączkę kwarcową, d) wapień mielony, e) cement, f) kaolin, g) grafit oraz h) azbest.

Utwardzacze. Utwardzacze przekształcają żywicę epoksydową ze stanu ciekłego poprzez stan półstały, w którym daje się ona jeszcze rozpuścić w niektórych rozpuszczalnikach, w stan stały. Dla klejenia na gorąco używa się: a) poliaminoamidu (Poliamid C, PA-C), b) metafenylenodwuaminy oraz c) dwucjanodwuamidu.

Dla klejenia na zimno używa się: a) trójetyloczteroamina Tęcza oraz b) utwardzacz P.

Bezpieczeństwo i higiena pracy. Szereg związków chemicznych stosowanych przy klejeniu wykazuje szkodliwe działanie na organizm ludzki. Należy o tym pamiętać przy organizacji procesu klejenia.

Oczyszczanie powierzchni łączonych. Wytrzymałość połączeń klejonych na ścinanie w decydującym stopniu zależy od stanu powierzchni elementów łączonych. Powierzchnie muszą być oczyszczone i odtłuszczone. Zastosowanie znajdują przede wszystkim sposoby oczyszczania mechanicznego. Oczyszczanie chemiczne jest stosowane rzadziej. Powierzchnię wpiery się oczyszcza, potem odtłuszcza. Za dobry sposób uważa się piaskowanie i śrutowanie. Zbyt intensywne polerowanie, szlifowanie lub płomieniowanie może zmniejszyć nośność połączenia, szczególnie obciążonego zmęczeniowo [1, 2, 3]. Odtłuszczenie wykonuje się chemicznie. Jest to zabieg o dużym znaczeniu. Tablica 2 podaje zestawienie sposobów oczyszczania oraz odtłuszczenia.

Tablica 2. Oczyszczanie i odtłuszczenie

Lp.	Rodzaje oczyszczania	Rodzaje odtłuszczenia
1.	Szlifowanie	czterochlorek węgla
2.	Płomieniowanie	trójchloroetylen
3.	Piaskowanie	aceton
4.	Polerowanie	metyloetyloketon
5.	Śrutowanie	

Proces właściwego klejenia. Nakładanie kleju zależne jest od konsystencji tworzywa.

a) Stan ciekły: nakładanie następuje za pomocą pędzelka lub szpachelki.

b) Stan proszku: nakłada się szpachelką lub posypuje powierzchnie łączone. Następnie przez podgrzanie do temperatury około 70°C przez około 15 minut klej przechodzi w stan ciekły (można też nakładać proszek na uprzednio podgrzane elementy).

Grubość skleiny powinna być mała i wynosić 0,1–0,6 mm. Przy łączeniu części stalowych optymalna grubość wynosi około 0,1 mm. Kleje epoksydowe są stosunkowo mało czułe na pogrubienie spoiny ponad grubość optymalną.

Tablica 3. Temperatura i docisk

Lp.	Sposoby uzyskania temperatury	Sposoby docisku
1.	Elektryczne piece grzejne	Zaciski ciesielskie
2.	Lampy podczerwone	Zaciski sprężynowe
3.	Promieniowanie	Belecзки dociskowe
4.	Ogrzewanie elektrooporowe	Obciągnięcie pasami gumowymi
5.	—	Oklejenie lepкими taśmami

Utwardzanie warstwy kleju epoksydowego na zimno następuje w sposób chemiczny, bez stosowania znaczącego docisku. Kleje epoksydowe na gorąco utwardza się w temperaturze około 170°C w czasie około 2 godzin. Temperatura i czas są do siebie odwrotnie proporcjonalne i można je odpowiednio regulować.

Elementy łączone muszą być ze sobą szczipione i dociśnięte. Najczęściej stosowane sposoby uzyskiwania temperatury oraz docisku zestawiono w tablicy 3.

3. Zalety i wady połączenia klejowego. Zastosowania

Zalety klejenia są następujące: a) powierzchniowe przenoszenie sił pozwala na uniknięcie otworów; b) możliwość łączenia różnych rodzajów materiałów; c) klejenie nie zmienia własności mechanicznych materiału łączonego i nie zmniejsza wytrzymałości statycznej lub zmęczeniowej materiałów ulepszonych termicznie; d) proces łączenia jest względnie łatwy i tani.

Wady natomiast są następujące: a) konieczność stosowania przede wszystkim połączeń nakładkowych; b) niska wytrzymałość na oddzieranie i odrywanie (stosowanie śrub); c) niska wytrzymałość udarowa (stosowanie śrub); d) pełzanie i starzenie się masy klejowej; e) zaostrzone warunki BHP.

Zastosowania. Połączenia klejone ze względu na swoje cechy wytrzymałościowe nadają się szczególnie do stosowania w pewnych wybranych elementach konstrukcyjnych. Wyliczymy najważniejsze ich zastosowania:

1. Połączenie szczipne elementów zginanych, ściskanych i rozciąganych. Przymocowują one kątowniki pasowe do środników, nakładki pasowe do kątowników oraz dodatkowe nakładki pasowe.

2. Połączenia elementów usztywniających. Stosuje się je dla przymocowania żeber pionowych i poziomych, przepon i przewiązek w elementach ściskanych i rozciąganych oraz dla łączenia krawędzi usztywniających pełnościennie elementy ściskane.

3. Połączenia wzmacniające miejsca osłabione. Stosuje się jako nakładki wzmacniające miejsca osłabione otworami śrubowymi, odwadniającymi, montażowymi. Jest to szczególnie ważne w elementach rozciąganych i pracujących na obciążenie zmęczeniowe.

4. Połączenia elementów drugorzędnych z głównymi. Stosuje się w połączeniach elementów konstrukcyjnych, nie przenoszących większych obciążeń. Jest to szczególnie ważne w elementach rozciąganych i pracujących na obciążenie zmęczeniowe.

5. Połączenia płyty betonowej z konstrukcją stalową.

6. Połączenia (zamocowania) szyn jezdnych ze stalowymi lub betonowymi dźwigarami podsuwnicowymi itp.

7. Połączenia elementów płyt pomostowych. Stosuje się przy płytach ortotropowych dla łączenia żeber z płytą górną oraz w pomostach skonstruowanych w postaci płyt trójwarstwowych z wypełniaczem lekkim typu «Sandwich».

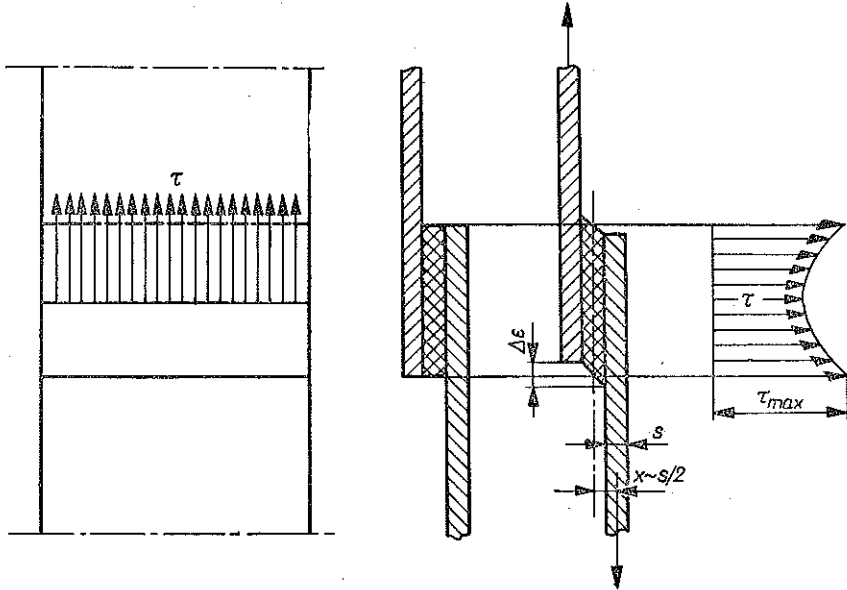
8. Połączenia prętów w dźwigarach kratowych.

Jak widać, zakres możliwości stosowania klejenia jest znaczny. Ogólnie jednak należy stwierdzić, iż w warunkach obecnych najkorzystniejsze będzie stosowanie

klejenia tam, gdzie stosunkowo nieduże siły przekazywane są w sposób uniemożliwiający odrywanie lub gdzie stosowanie spawania zmniejsza wytrzymałość całego połączenia. Unikać należy wpływów środowisk korodujących spoinę klejową.

4. Zasady teoretyczne pracy połączenia klejonego

Połączenie klejone przenoszące siły normalne ścinaniem. Praca połączenia klejonego jedno lub dwuczętowego, przenoszącego siłę osiową ścinaniem, charakteryzuje



Rys. 4

się krzywoliniowym rozkładem naprężeń ścinających wzdłuż długości klejenia (rys. 4), [4, 5, 6]. Rozkład naprężeń ścinających określa wzór (4.1)

$$(4.1) \quad \tau_{max} = \tau_{sr} \sqrt{\frac{\Delta}{W} \left[\frac{W - l + \text{ch} \sqrt{\Delta W}}{\text{sh} \sqrt{\Delta W}} \right]}$$

oraz podaje wykres (rys. 5). Napisano go dla połączenia jednociętego. Średnie naprężenie ścinające

$$(4.2) \quad \tau_{sr} = \frac{P}{A}$$

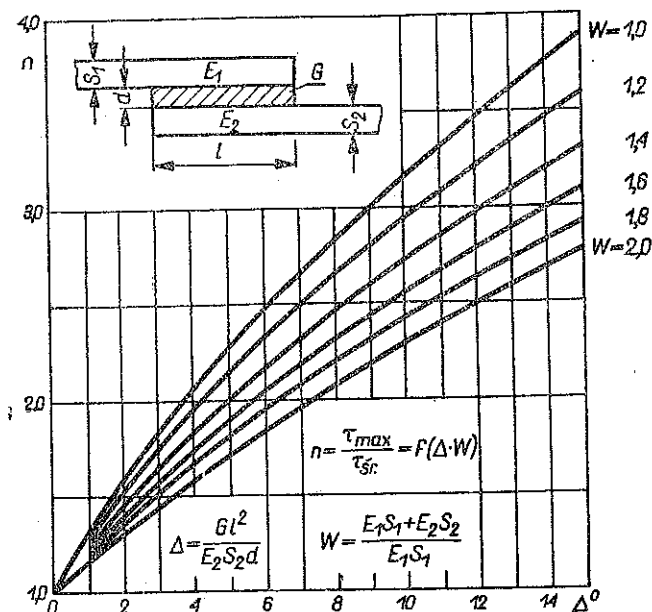
We wzorze tym przyjęto następujące oznaczenia: E_1 i E_2 oznaczają odpowiednio moduły Younga elementów łączonych, s_1 i s_2 grubości elementów łączonych, l długość klejenia, d grubość warstwy kleju, G moduł na ścinanie oraz

$$(4.3) \quad \Delta = \frac{Gl^2}{E_2 s_2 d^3}$$

$$(4.4) \quad W = \frac{E_1 s_1 + E_2 s_2}{E_1 s_1}$$

Dla złącz «dwuciętych» należy przyjąć

$$s_1 = s_{sr}/2 \quad \text{oraz} \quad s_2 = s_{skrajne}$$



Rys. 5

5. Wymiarowanie

Wiadomości wstępne. Jeśli łączone części wykonano z tego samego materiału, grubość skleiny jest stała, a grubości blach w połączeniu «jednociętym» są równe i wynoszą s , to można największe naprężenie ścinające τ_{max} , a tym samym i nośność całego połączenia, uzależnić jedynie od jednego parametru geometrycznego. Parametrem tym jest współczynnik kształtu

$$(5.1) \quad f = \frac{\sqrt{s}}{l}$$

Tak więc

$$(5.2) \quad \tau_{max} = \tau_{sr} \varphi(f)$$

Funkcję $\varphi(f)$ można wyznaczyć ze wzoru (4.1).

Zasady ogólne wymiarowania. Z analizy wzoru (4.1) wynikają bezpośrednio pewne wnioski związane z wymiarowaniem połączeń klejonych. Biorąc bowiem pod uwagę fakt, iż musi być spełniona zależność

$$(5.3) \quad \tau_{max} = \tau_{sr} \varphi(f) \leq R_t,$$

gdzie R_t oznacza wytrzymałość utwardzonej klejiny na ścinanie, dochodzimy do następującego wniosku: nośność pracującego na ścinanie przy rozciąganiu (lub ściskaniu) połączenia klejonego przy pewnej stałej długości klejenia l zależy od grubości elementów łączonych s . Tak więc mając z góry dane grubości elementów łączonych nie można uzyskać zwiększenia nośności połączenia poprzez zwiększenie długości klejenia poza pewną długość optymalną. Należy stosować klej bardziej wytrzymały lub inaczej rozwiązać konstrukcję połączenia.

Długość optymalna klejenia wyznaczona być może np. z warunku, aby spoina klejowa osiągnęła największą nośność wtedy, gdy naprężenia w elementach łączonych osiągną granicę plastyczności (lub wytrzymałości). W praktyce bardziej słuszne jest stosowanie połączenia o nieco mniejszej wytrzymałości, gdyż można wtedy liczyć na wyrównanie rozkładu naprężeń ścinających.

Sposób wymiarowania. W dalszym ciągu rozważań zakładamy, że w spoinie klejowej nie pojawia się naprężenie rozciągające.

Postępowanie przy wymiarowaniu połączenia klejonego zmienia się w zależności od tego, czy dysponujemy jednym wybranym gatunkiem kleju, czy też możemy dobrać właściwy gatunek spośród wielu innych.

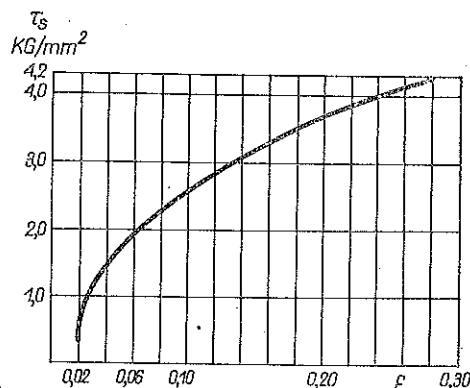
Przypadek jednego wybranego kleju. Sporządzamy wykres zależności τ_{\max} od współczynnika kształtu ze wzoru (5.2) lub też w wyniku przeprowadzonej serii prób (Można wstępnie korzystać wprost z rys. 6). Z wykresu znajdujemy odpowiednią długość optymalną l . Takie postępowanie doprowadza do zaprojektowania połączenia optymalnego. Można też przyjąwszy pewną długość klejenia l , sprawdzić największe naprężenie styczne i przyrównać je do dopuszczalnego.

Naprężenie styczne w spoinie klejowej powinno być mniejsze od dopuszczalnego ze współczynnikiem pewności v . Trudność istnieje we właściwym ustaleniu wytrzymałości spoiny klejowej na ścinanie, gdyż wielkość ta powinna ujmować nie tylko cechy kleju, lecz również cechy materiału łączonego oraz sposób oczyszczania powierzchni. Przyjmujemy

$$(5.4) \quad \tau_{\max}^{\text{dop}} \leq \frac{R_t}{v},$$

gdzie R_t oznacza wytrzymałość spoiny klejowej na ścinanie przy rozciąganiu.

Zakładając, iż naprężenie przyczepności wyższe jest od wytrzymałości na ścinanie kleju, można dla klejów epoksydowych bez wypełniacza przyjąć wstępnie R_t od 300 do 400 kG/cm².



Rys. 6

Korzystając ze wzoru (5.4) najlepiej posługiwać się wartością R_t wyznaczoną doświadczalnie na próbkach o odpowiednio małej nakładce, wykonanej z materiału, dla którego dokonujemy obliczeń.

Przypadek możliwości wyboru kilku klejów. W dalszym ciągu ograniczymy się do rozważenia połączeń «jednociętych», pracujących na ścinanie przy rozciąganiu. W sposób podobny można wymiarować połączenie «dwucięte».

Jeśli mamy do dyspozycji kilka gatunków klejów i znamy cechy geometryczne połączenia, tzn. wartość współczynnika kształtu f , to możemy zwymiarować połączenie jednocięte w sposób przybliżony. Wzory, które podamy, opierają się na danych statystycznych z bardzo licznych prób, wykonanych na różnych materiałach klejonych różnymi klejami [7]. Są to wzory empiryczne. Powinny być one zastąpione wzorami bardziej uzasadnionymi z chwilą pełniejszego opracowania teorii połączeń klejonych.

Przyjmijmy następujące dane wyjściowe:

1. Zastępcze moduły odkształcalności postaciowej poszczególnych klejów κ_s przyjmujemy zgodnie z (5.5). Moduł sprężystości postaciowej wynosi dla klejów epoksydowych średnio $G \approx 0,1 E$, zaś moduł odkształcalności podłużnej $E = 300$ do 400 kG/mm^2 . Wytrzymałość masy klejowej na ścianie wynosi 3 do 4 kG/mm^2 . Wytrzymałość przyczepności do stali około 3 kG/mm^2 . Ta ostatnia wartość może podlegać znacznym wahaniom w zależności od stopnia czystości powierzchni łączonych. Wszystkie te wielkości powinny być sprawdzone doświadczalnie.

Średnia wartość zastępczego modułu odkształcalności postaciowej kleju epoksydowego wynosi

$$(5.5) \quad \kappa_s = \frac{R_t}{\sqrt{6}} = \frac{3}{\sqrt{30}} = 0,55.$$

2. Przyjmujemy minimalną wytrzymałość doraźną R_r materiału łączonego (dla stali St 37 wynosi ona $R_r = 37 \text{ kG/mm}^2$).

3. Przyjmujemy, że grubość elementów łączonych wynosi s .

Tok obliczeń. a) Wytrzymałość połączenia wyrażona przez największe średnie naprężenie ścinające wynosi

$$(5.6) \quad R_t^{sr} = 0,8 a \sqrt{f} [\text{kG/mm}^2].$$

b) Współczynnik a nazywany «współczynnikiem połączenia» określa się za pomocą wzoru

$$(5.7) \quad a = \frac{a_F a_K}{a_N}.$$

c) Współczynnik a_F , nazywany «współczynnikiem materiału łączonego», określa się za pomocą wzoru

$$(5.8) \quad a_F = 0,934 (R_r)^{0,635}.$$

d) Współczynnik a_K , nazywany «współczynnikiem substancji klejącej», wynosi

$$(5.9) \quad a_K = 50 \kappa_s - 16,7.$$

e) Stała a_N wynosi

$$a_N = 10,8.$$

Jest to stała wymiarowa.

Jeśli chce się wyznaczyć długość nakładki, czyli tzw. długość klejenia, korzysta się z następującego wzoru, wynikającego bezpośrednio ze wzorów (5.1) i (5.5):

$$(5.10) \quad l_0 = \frac{v^2 P^2}{0,64 a^2 b^2 \sqrt{s}}.$$

Oznaczenia są tu następujące: P oznacza siłę normalną zewnętrzną, przenoszoną przez połączenie (kG), b szerokość połączenia, v współczynnik pewności oraz l_0 długość klejenia.

6. Przykłady obliczeń połączenia klejowego

Sposób wymiarowania I. Klej epoksydowy. Wyznaczyć długość optymalną klejenia dla połączenia jednociętego. Obciążenie siłą rozciągającą $P = 5000$ kG. Szerokość połączenia $b = 100$ mm, grubość blachy $s = 7$ mm. Współczynnik pewności $v = 2$. Współczynnik odkształcenia postaciowego $G = 30$ kG/mm².

Grubość spoiny klejowej $d = 0,1$ mm. Wytrzymałość kleju na ścinanie $R_t = 3,3$ kG/mm². Wytrzymałość przyczepności do stali $R_{prz} = 3,3$ kG/mm². Stal St 37.

Korzystamy ze wzoru (4.1) oraz z wykresu 6:

$$W = 2,$$

$$(6.1) \quad \Delta = \frac{G l^2}{E s d} = \frac{30 l^2}{21000 \cdot 7 \cdot 0,1} = \frac{l^2}{490},$$

$$\tau_{sr} = \frac{2P}{bl} = \frac{2 \cdot 5000}{100l} = \frac{100}{l}, \quad \tau_{max} = n \tau_{sr} = \frac{n \cdot 100}{l};$$

$$(6.2) \quad \tau_{max} = \frac{n \cdot 100}{l} \ll 3,3 \text{ kG/mm}^2.$$

Zamiast kreślić wykres, prowadzimy obliczenia w tablicy 4.

Tablica 4. Ustalenie optymalnej długości klejenia

Lp.	l (mm)	Δ ze wzoru (6.1)	n z wykresu 6	τ_{max} [kG/cm ²] ze wzoru (6.2)	R_t [kG/mm ²]
1	10	0,204	1,06	10,60	3,3
2	20	0,818	1,14	5,70	3,3
3	40	3,260	1,46	3,65	3,3
4	60	7,350	2,00	3,33	3,3
5	80	13,030	2,59	3,24	3,3

Stąd

$$l_0 = 60 + (80 - 60) \cdot \frac{0,03}{0,09} = 67 \text{ mm.}$$

Napężenie średnie

$$\tau_{sr} = \frac{P}{bl_0} = \frac{5000}{100 \cdot 67} = 0,75 \text{ [kG/mm}^2\text{]};$$

$$\tau_{\max} = 3,240 < R$$

pryczepności równej 3,3 [kG/mm²].

Sposób wymiarowania II. Należy wyznaczyć długość klejenia dla przykładu poprzedniego. Korzystamy ze wzorów (5.7)–(5.10). Współczynnik materiału łączonego (5.8) dla $R_r = 37 \text{ kG/mm}^2$ wynosi $a_F = 0,934 \cdot (37)^{0,635} = 0,32$.

Zastępczy moduł odkształcalności postaciowej wynosi $\kappa_s = 0,55$. Współczynnik substancji klejącej wg. (5.9) wynosi

$$a_K = 50 \cdot 0,550 - 16,7 = 10,8.$$

Współczynnik połączenia

$$a = \frac{10,8 \cdot 9,32}{10,8} = 9,32.$$

Długość klejenia otrzymuje się ze wzoru (6.1):

$$l_0 = \frac{2^2 \cdot 5600^2}{0,322 \cdot 100^2 \cdot \sqrt{7} \cdot 0,64} \approx 68 \text{ mm.}$$

Stwierdza się dość dobrą zgodność wyników obu sposobów wymiarowania.

7. Opis klejonego stalowego mostu doświadczalnego

Doświadczalny charakter klejonego mostu drogowego spowodował przyjęcie następujących założeń projektowych:

1. Zabezpieczenie możliwości czasowej eksploatacji mostu nawet w razie całkowitego wyeliminowania z ustroju nośnego elementów klejonych. Teoretycznie fakt ten może wystąpić w razie zniszczenia połączeń klejonych wskutek wpływów atmosferycznych, działania obciążeń, złej jakości wykonania lub zmian własności kleju w czasie. Praktycznie jednak liczyć się należy z kolejnym wyjmowaniem klejonych belek z mostu w celu poddawania ich badaniom do złamania włącznie na stanowisku pomiarowym. W ten sposób zaprogramowano badanie wpływu czasu i środowiska na zachowanie się elementów klejonych mostu.

2. Wykonanie stosunkowo dużej ilości różnego rodzaju połączeń klejonych w celu przeprowadzenia możliwie szerokiego zakresu badań.

Przyjęte założenia spowodowały wybór mostu wielodźwigarowego, którego część dźwigarów jest spawana, część zaś klejona. W celu zbadania możliwości wykorzystania klejenia do połączeń szczepnych zaprojektowano pas dolny z dwóch kątowników oraz nakładki poziomej. Konieczność przekazania obciążeń od poprzecznic bezpośrednio na środek dźwigara (odrywanie kątowników) uniemożliwiła zastosowanie górnej nakładki. Przekrój dźwigarów klejonych jest więc niesymetryczny.

Żebra pionowe oraz słupki podpory połączono ze środnikiem za pomocą klejenia. Podkładka wyrównująca otwory śrubowe w środniku posiada charakter wyłącznie badawczy. Niektóre blachy węzłowe wiatrownic połączono z kątownikami pasa górnego za pomocą klejenia stosując śruby tylko przy końcach blach jako zabezpieczenie od odrywania i odginania.

Wiatrownice i ich blachy węzłowe zaprojektowano w sposób umożliwiający szybką zamianę mostu klejowo-spawanego w most wyłącznie spawany.

Opis technologii wykonania oraz badanie mostu stanowić będzie treść oddzielnego artykułu.

Most doświadczalny zaprojektowano na zlecenie Ministerstwa Komunikacji.

Literatura cytowana w tekście

1. F. SZELAŃGOWSKI, *Badania klejonych połączeń części stalowych*, Biuletyn WAT, 1958.
2. F. SZELAŃGOWSKI, *Badania wytrzymałościowe klejonych połączeń stalowych*, Arch. Inżyn. Ładow., 4, 1961.
3. H. SCHWARZ, H. SCHLEGEL, *Metallkleben und glasfaserverstärkte Kunststoffe in der Technik*, VEB Verlag Technik, 1961.
4. F. SZELAŃGOWSKI, *Stress distribution in a glucol joint*, Bull. de l'Acad. Polon. Sci., Série Sci. Tech., 6, 1958.
5. H. PTAKOWSKA-WYŻANOWICZ, *Klejenie metali*, PWT, 1961.
6. H. CZUDEK, *Połączenia elementów stalowych*, Biuro Studiów i Proj. Typ. Bud. Przemysłowego, w druku.
7. H. WINTER, H. MECKELBURG, *Untersuchungen zur Verklebung von Stahl*, Der Stahlbau, 1, 1961.

Резюме

КЛЕЕННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В работе обсуждаются вопросы, связанные с выбором клея для металлов, который может найти применения в отечественном строительстве стальных мостов. Одновременно рассматриваются основные сведения о технологии клейки соединений стальных элементов. Рассматривается шире вопрос соединения стальных элементов с помощью эпоксидного клея отечественного производства. Приводятся некоторые результаты статических и усталостных исследований соединений стальных элементов. Анализ пороков и достоинств привел к попытке определения области применений, обсуждаемых соединений в строительстве стальных мостов.

Кратко рассматриваются вопросы связанные с анализом прочности клеённого соединения, обращая при этом внимание на явление ползучести и на старение клея.

Шире рассматриваются вопросы определения размеров клеённых соединений стальных элементов, восприимчивающих растягивающие силы за счет сдвига клеённого шва. Обсуждается случай определения размеров таких соединений при использовании эпоксидного клея, а также эмпирический случай определения размеров если, априори, не задается род клея, но группа сортов клея. Этот способ дает возможность выбрать из статических условий не только величины поверхности клейки, но также сорта клея, входящего в состав заданной группы и удовлетворяющего условиям задачи.

В заключение даются сведения о работах, касающихся прототипа стального проекта моста с клеённым соединением.

Summary

GLUED JOINTS OF STEEL ELEMENTS

The present paper is devoted to problems of glue selection for metals that may find application in the construction of steel bridges in Poland. It gives also some information on the technique of glued joints of steel. Home produced epoxy glues are discussed in particular. The author presents also some results of static and fatigue tests of glued joints of steel elements. As a result of an analysis of the drawbacks and advantages of glued joints a tentative method is proposed for the determination of the applicability range of the glued joints in the construction of steel bridges.

Problems connected with the strength analysis of a glued joints are considered in brief, the phenomenon of creep and ageing of glues being pointed out.

Problems of dimensioning glued joints of steel elements subjected to shear are treated in greater detail. The problem of dimensioning such joints is considered for an epoxy glue. An empirical method for dimensioning the joints is proposed for the case in which not one but a set of glues are prescribed. This method enables the obtainment from the mechanical conditions of not only the glued area but also the type of glue satisfying the conditions of the problem.

Finally, the paper contains some information on the construction of a prototype steel bridge span with glued joints.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
KATEDRA BUDOWY MOSTÓW

Praca została złożona w Redakcji dnia 15 maja 1964 r.
